

УДК 524.77/78-325.4

СТРУКТУРА СКОПЛЕНИЙ С БИМОДАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ГАЛАКТИК III: A1831

© 2010 А. И. Копылов, Ф. Г. Копылова

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 14 декабря 2009 г.; принята в печать 22 марта 2010 г.

В рамках программы изучения скоплений галактик с бимодальным распределением лучевых скоростей (с разностью скоростей между подсистемами $\Delta cz \sim 3000$ км/с) мы исследовали скопление A1831. В скоплении выделены две подсистемы: A1831A ($cz = 18970$ км/с) и A1831B ($cz = 22629$ км/с). Получены оценки прямых расстояний до подсистем по галактикам ранних типов тремя способами: с помощью соотношения Корменди, фотометрической плоскости и фундаментальной плоскости. Для этого использовались данные наших наблюдений на 1-м телескопе САО РАН и данные каталога SDSS DR6. С уровнем достоверности 99% мы установили: подсистемы находятся на разных расстояниях, которые близки к их хаббловским расстояниям, соответствующим лучевым скоростям подсистем, и расположены почти точно друг за другом по лучу зрения и не связаны гравитационно. Оба скопления имеют сложную внутреннюю структуру, что затрудняет определение их динамических параметров. Полученные нами оценки дисперсий лучевых скоростей и масс: 480 км/с и $1.9 \times 10^{14} M_{\odot}$ для A1831A, 952 км/с и $1.4 \times 10^{15} M_{\odot}$ для A1831B — должны рассматриваться как ограничения сверху. В фоновом скоплении A1831A можно выделить как минимум три пространственно и кинематически обособленные группы галактик, что указывает на незавершенность динамической релаксации. Не исключена и возможность случайной проекции. Для основного скопления A1831B особенности кинематической структуры и тот факт, что оценка массы скопления по дисперсии лучевых скоростей галактик в 2–3 раза превышает независимые оценки массы, полученные по полной светимости скопления в K-полосе, температуре и светимости рентгеновского газа скопления, дают основания предполагать, что скопление находится в динамически активном состоянии: происходит аккреция на вириализованное ядро скопления (возможно, вдоль филамента, направленного близко к лучу зрения) галактик и групп галактик с большими лучевыми скоростями относительно центра скопления.

Ключевые слова: *галактики, группы и скопления галактик, межгалактический газ*

1. ВВЕДЕНИЕ

Это третья работа серии, посвященной изучению скоплений галактик с бимодальным распределением лучевых скоростей, в которой мы исследуем скопление A1831. Ранее была определена структура скоплений A1035 [1] и A1775 [2]. Скопление A1569 будет рассмотрено в заключительной работе.

Скопления A1775 и A1831 вместе с A1795 и A1800 образуют компактный квартет богатых рентгеновских скоплений с размером в картинной плоскости около 20 Мпк — ядро сверхскопления Волопас (Bootes) [3]. В такой массивной системе можно ожидать большие пекулярные скорости компонентов, если ее размер вдоль луча зрения сравним с размером в картинной плоскости. Одновременно в ней ярко выражена бимодальность распределения скоростей скоплений: лучевые скорости A1795 и одной из подсистем в каждом из

скоплений A1775 и A1831 группируются около значения $cz \approx 19000$ км/с, а две другие подсистемы и A1800 имеют скорости близкие к $cz \approx 22500$ км/с. Большое различие скоростей повышает вероятность того, что имеет место визуальное наложение двух независимых структур, находящихся на соответствующих их лучевым скоростям хаббловских расстояниях. Для скопления A1775 в [2] мы определили, что реализуется этот вариант. В данной работе аналогичный вывод делается и для A1831.

Основной целью работы было определение структуры скопления A1831 — расстояния между его подсистемами вдоль луча зрения — с применением нескольких способов оценки прямых расстояний по галактикам ранних типов. Кроме того, мы попытались оценить динамическую массу и отношение масса-светимость, но оказалось, что сложная внутренняя структура обеих подсистем

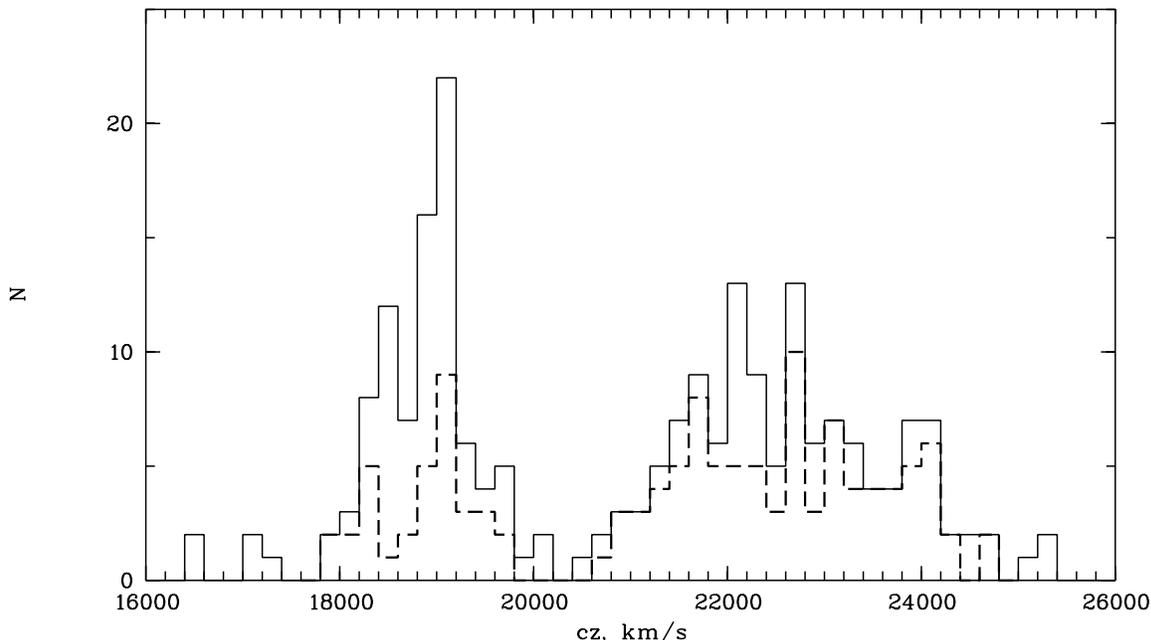


Рис. 1. Распределение лучевых скоростей галактик в A1831 в пределах $45'$ от ярчайшей галактики скопления ($13^h 59^m 15^s$; $+27^\circ 58' 34''$). Штриховой гистограммой показано распределение в пределах R_{200} для каждой из подсистем.

позволяет получить только верхние оценки этих параметров.

Нами использовался наблюдательный материал, полученный на 1-м телескопе CAO РАН, и данные из каталога SDSS DR6 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 6) [4]. Для определения инфракрасной светимости скоплений мы привлекали данные каталога 2MASS.

Статья организована следующим образом. Во втором разделе определяются основные характеристики двух основных подсистем скопления, соответствующих пикам в распределении лучевых скоростей: A1831A и A1831B. В третьем разделе представлены выборки галактик ранних типов, использовавшиеся для измерения расстояний. В четвертом — определяются прямые расстояния до подсистем в A1831. В пятом — рассматривается внутренняя структура подсистем и проводится сравнение оценок массы, полученных по дисперсии скоростей, инфракрасной светимости и рентгеновским данным. В заключении обсуждаются полученные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70$ км/с/Мпк.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОПЛЕНИЯ A1831

В каталоге Эйбелла [5] скопление A1831 имеет класс богатства I и тип по Bautz-Morgan III.

Для ярчайшей галактики в центре скопления красное смещение, $z = 0.0749$, было определено в работе [6]. Первое указание на возможную бимодальность скопления было получено в [7] по измерениям лучевых скоростей для 6 галактик, которые разделились поровну на две подсистемы: A1831A ($cz \approx 19100$ км/с) и A1831B ($cz \approx 21950$ км/с). Последующие измерения лучевых скоростей [8] и [9] подтвердили бимодальность скопления по лучевым скоростям. Благодаря тому, что подсистема A1831A включала примерно вдвое больше галактик с измеренными скоростями, ее среднее $z \approx 0.0615$ как правило принималось в качестве красного смещения скопления A1831, а подсистема A1831B рассматривалась как фоновая группа ([10] и NED).

Данные каталога SDSS DR6 позволяют достаточно надежно, по существенно большему числу галактик с измеренными лучевыми скоростями, выделить те же две основные подсистемы в скоплении: A1831A и A1831B. По распределению лучевых скоростей в области радиусом $45'$ вокруг центра скопления, совпадающего с ярчайшей cD-галактикой (Рис. 1), в качестве граничной лучевой скорости между подсистемами можно принять 20300 км/с. Несколько галактик с лучевыми скоростями меньше 17400 км/с и больше 25000 км/с могут быть отнесены к переднему и заднему фону соответственно.

Таблица 1. Данные для скоплений

| Свойства скоплений | A1831A | A1831B |
|--|-----------------|------------------|
| α (J2000), hhmmss | 13 59 17.26 | 13 59 15.09 |
| δ (J2000), ddmms | +27 56 05.8 | +27 58 34.5 |
| z_h | 0.062942 | 0.075481 |
| cz_h , км/с | 18870 | 22629 |
| σ , км/с | 480 ± 82 | 952 ± 101 |
| R_{200} , ' | 15.9 | 26.5 |
| R_{200} , Мпк | 1.15 | 2.27 |
| N_{200} | 34 | 89 |
| M_{200} , $10^{14} M_\odot$ | 1.86 ± 0.94 | 14.42 ± 4.60 |
| L_{200} , $10^{12} L_\odot$ | 2.91 ± 0.1 | 8.62 ± 0.1 |
| M/L_K , M_\odot/L_\odot | 64 ± 33 | 167 ± 76 |
| $L_x(0.1 - 2.4 \text{ кэВ})$, 10^{44} эрг/с | — | 1.5 |

Чтобы более детально охарактеризовать структуру и кинематику каждого из скоплений, на Рис. 2, 3 на четырех панелях представлены:

1) отклонение лучевых скоростей галактик — членов скопления и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости скопления в зависимости от квадрата радиуса (углового расстояния от центра скопления);

2) интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса для наглядного выявления плотного ядра скопления, более разреженного гало и внешней области, где распределение выходит на линейную зависимость в выбранных координатах, то есть наблюдается однородное в среднем распределение галактик окружения;

3) расположение галактик в картинной плоскости в экваториальных координатах;

4) гистограмма распределения лучевых скоростей для всех галактик в пределах радиуса R_{200} (для нее показана функция Гаусса, соответствующая дисперсии скоростей скопления из Таблицы 1) и галактик, расположенных в пределах $10'$ от центра скопления.

В Таблице 1 представлены параметры скоплений, определенные нами для области радиусом R_{200} , по данным каталога SDSS, дополненным небольшим числом измерений лучевых скоростей из базы данных NED. R_{200} — это радиус вириализованной области скопления, в пределах которого плотность массы в 200 раз превышает критическую плотность Вселенной. Данный радиус и масса скопления в области, ограниченной этим

радиусом, M_{200} , определены тем же способом, что и в [11], по дисперсии лучевых скоростей галактик (также в пределах R_{200}), которая приведена в Таблице 1 с учетом космологической поправки $(1+z)^{-1}$. N_{200} — число галактик с измеренными лучевыми скоростями в пределах R_{200} . Кроме того, в Таблице 1 приведены полные светимости скоплений в К-полосе, вычисленные по галактикам ярче $M_{K,lim} = -21^m$, и отношение массы к К-светимости. Методика определения светимости описана в [11].

В рентгеновском диапазоне для скопления A1831 имеются измерения потока в интервале $0.1 - 2.4$ кэВ по данным ROSAT: $F_X \simeq 11.8 \times 10^{-12}$ эрг/с/см² [12], и температуры по данным SUZAKU: $kT = 4.22$ кэВ [13]. При $z = 0.0755$ рентгеновская светимость равна

$$L_X(0.1 - 2.4 \text{ кэВ}) \simeq 1.5 \times 10^{44} \text{ эрг/с.}$$

По распределению температуры скопление классифицировано в [13] как скопление с охлаждающимся ядром. Пик яркости рентгеновского излучения совпадает с ярчайшей галактикой скопления типа cD, которая принадлежит подсистеме A1831B. Таким образом, по всем своим характеристикам эта подсистема является основной в скоплении A1831.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ

В этом разделе мы описываем наблюдательные данные — параметры галактик ранних типов, ко-

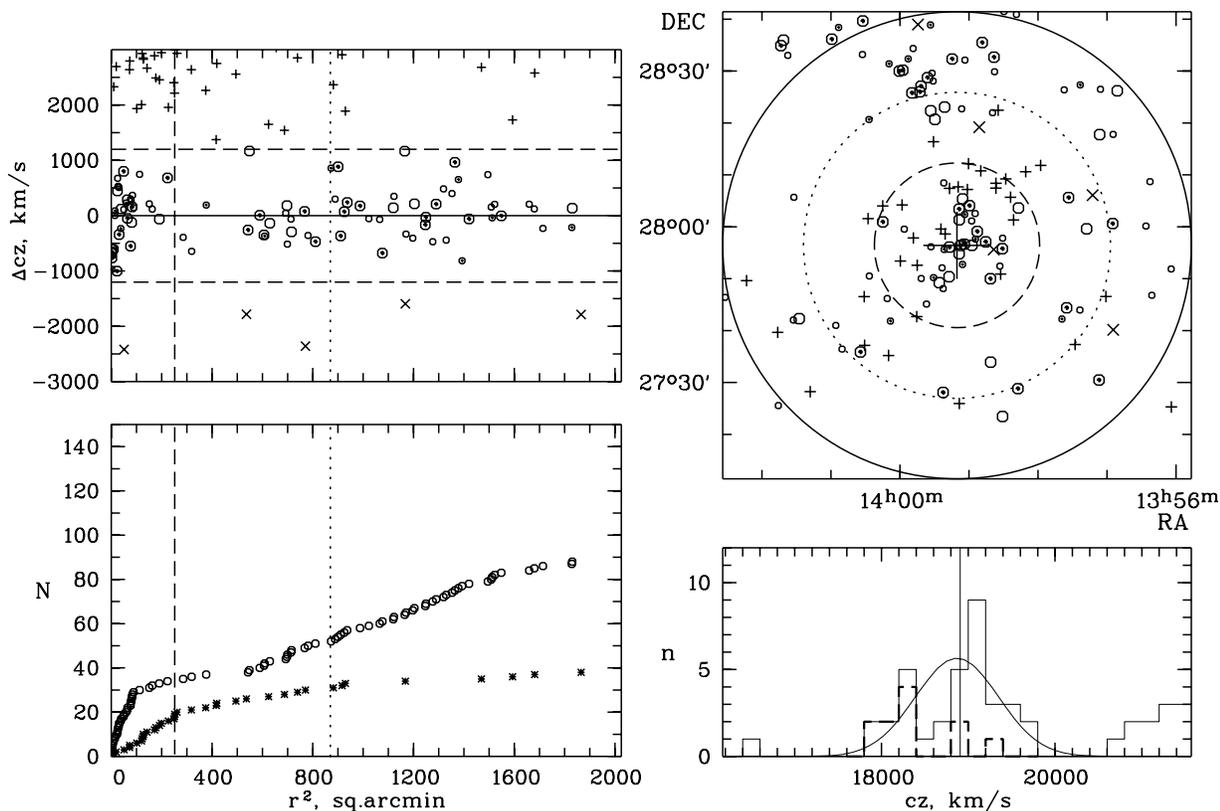


Рис. 2. Распределение галактик в A1831A. На *левом верхнем* рисунке показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.5\sigma$, вертикальной штриховой линией отмечен радиус R_{200} , пунктирной — радиус Эйнелла (2.143 Мпк). Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -23^m.29$, кружками с точкой внутри — галактики ранних типов, плюсами — галактики заднего фона, крестиками — галактики переднего фона. На *левом нижнем* рисунке дано интегральное распределение полного числа галактик в зависимости от квадрата углового расстояния от центра скопления. Кружки соответствуют обозначениям на левом верхнем рисунке, звездочки — галактикам фона. На *правом верхнем* рисунке показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на верхнем левом рисунке (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусом R_{200} (штрихи) и радиусом Эйнелла (пунктир). Область исследования ограничена кругом с радиусом равным $45'$ (сплошная линия). Большим крестом отмечен центр скопления. На *правом нижнем* рисунке представлено распределение по лучевым скоростям галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана) и галактик, расположенных в пределах $10'$ от центра скопления (штриховая линия). Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления.

торые были использованы нами для определения расстояний до подсистем в скоплении A1831.

3.1. Параметры галактик ранних типов, полученные на 1-м телескопе

Мы определили фотометрические характеристики 13 галактик в A1831 по прямым снимкам в фильтре R_c (система Крона-Казинса), полученным нами на 1-м телескопе САО РАН в апреле 1999 года. Для наблюдений были отобраны галактики с морфологией раннего типа, определенной визуально по картам Паломарского атласа неба, с известными на тот момент времени лучевыми скоростями из работ [8] и [9].

Снимки были получены при среднем качестве изображений $1.75 \pm 0.05''$. Использовалась ПЗС матрица типа ISD015A формата (520 × 580) с размером элемента 18×24 мкм, что соответствует угловому размеру $0.28'' \times 0.37''$. Время экспозиции составляло 500 сек. Наблюдения стандартных звезд Ландолта [14] проводились несколько раз в течение каждой ночи, чтобы обеспечить фотометрическую привязку снимков. Фотометрические условия во время наблюдений были не очень хорошими, поэтому привязка была уточнена по фотометрическим данным из SDSS для звезд в поле каждого из наших снимков. Сопоставление с

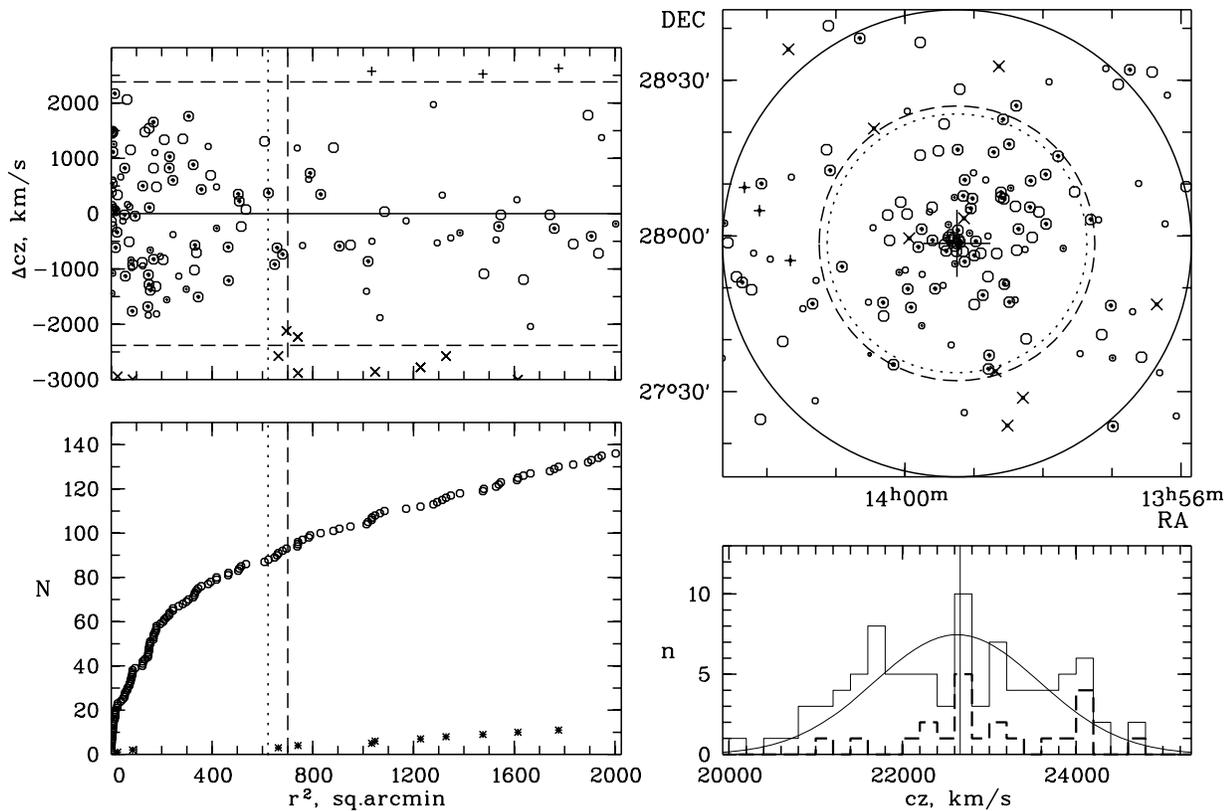


Рис. 3. То же, что и на предыдущем рисунке, для A1831B.

данными SDSS показало, что поглощение в атмосфере не превышало 0.3 звездной величины.

Наблюдательный материал обрабатывался с помощью пакета MIDAS. Применялась стандартная процедура обработки снимков: вычитание медианного темного кадра, деление на плоское поле и вычитание фона неба, аппроксимированного поверхностью 2-ой степени. Методом многоапертурной фотометрии определялась полная (асимптотическая) величина галактики. Затем по полной величине находился эффективный радиус R_e круговой апертуры, в пределах которой светимость галактики уменьшается вдвое, и эффективная поверхностная яркость μ_e на этом радиусе. Характеристика формы профиля поверхностной яркости n определялась путем подгонки профиля Серсика [15] $R^{1/n}$ к наблюдаемому профилю в диапазоне от радиуса равного 3 FWHM (для уменьшения влияния качества изображения) до радиуса, на котором поверхностная яркость составляла $24 - 25^m/\square''$. Полученные фотометрические параметры галактик R_e , μ_e были скорректированы за качество изображения методом, описанным в работе [16]. В поверхностные яркости введена космологическая поправка $10 \log(1+z)$. Таким

образом, в нашей работе использованы модельно независимые параметры галактик (R_e , μ_e), определенные по полной асимптотической величине, и модельно зависимая величина n .

Результаты наших фотометрических измерений приведены в Таблице 2. В ней представлены следующие данные для галактик: номер скопления по каталогу [5]; экваториальные координаты галактик на эпоху J2000; гелиоцентрическое красное смещение (по данным SDSS или NED); полная асимптотическая величина; эффективный радиус галактики в угловых секундах; эффективная поверхностная яркость на эффективном радиусе; параметр формы профиля Серсика n с его ошибкой. У ярчайшей галактики скопления A1831B наличие протяженной оболочки затрудняло определение полной асимптотической величины, поэтому для этой галактики все наблюдаемые характеристики были определены путем подгонки профиля Серсика к наблюдаемому профилю. К измеренным нами параметрам галактик мы добавили центральную дисперсию скоростей звезд галактик из работы [17].

Таблица 2. Параметры галактик ранних типов, полученные на 1-м телескопе

| Скопл. | α (J2000) δ | z_h | cz_h | m_R | R_e | μ_e | n | σ | R |
|--------|---------------------------|----------|--------|---------|----------|----------------------|-----------------|----------|----------|
| | hhmmss ddmms | | км/с | зв.вел. | угл.сек. | зв.вел./ \square'' | | км/с | угл.мин. |
| A1831A | 13 59 08.74+28 01 21.3 | 0.064485 | 19332 | 14.10 | 7.28 | 21.22 | 2.62 ± 0.12 | 240 | 4.94 |
| | 13 59 17.26+27 56 05.7 | 0.060450 | 18122 | 14.34 | 3.48 | 19.99 | 2.34 ± 0.13 | 261 | 1.49 |
| | 13 59 08.86+28 03 23.6 | 0.065669 | 19687 | 14.49 | 4.77 | 20.75 | 2.00 ± 0.27 | 190 | 6.98 |
| | 13 58 59.89+28 04 04.3 | 0.062835 | 18837 | 15.24 | 4.13 | 21.16 | 2.22 ± 0.30 | 164 | 8.00 |
| | 13 59 07.57+27 56 24.8 | 0.060735 | 18208 | 15.42 | 3.24 | 20.86 | 2.50 ± 0.47 | 206 | 0.68 |
| | 13 58 45.74+27 57 05.8 | 0.061859 | 18545 | 15.60 | 3.29 | 21.13 | 1.76 ± 0.23 | 142 | 5.55 |
| | 13 59 08.85+27 54 48.8 | 0.060949 | 18272 | 15.81 | 2.78 | 20.84 | 1.78 ± 0.35 | — | 1.67 |
| A1831B | 13 59 15.09+27 58 34.4 | 0.075926 | 22762 | 13.17 | 25.70 | 23.15 | 3.31 ± 0.17 | 285 | 0.00 |
| | 13 58 34.28+28 07 09.1 | 0.070859 | 21243 | 14.65 | 4.38 | 20.83 | 3.53 ± 0.36 | 275 | 12.43 |
| | 13 59 36.63+28 05 31.4 | 0.073786 | 22120 | 15.03 | 4.76 | 21.26 | 1.23 ± 0.08 | 256 | 8.42 |
| | 13 58 03.79+28 04 36.4 | 0.079988 | 23980 | 15.14 | 3.32 | 20.41 | 1.23 ± 0.09 | — | 16.85 |
| | 13 59 14.19+28 01 04.5 | 0.080415 | 24108 | 15.16 | 3.57 | 20.87 | 2.14 ± 0.19 | 230 | 2.51 |
| | 13 59 08.37+27 55 01.2 | 0.075645 | 22678 | 15.75 | 2.62 | 20.62 | 1.36 ± 0.16 | 162 | 3.85 |

3.2. Параметры галактик ранних типов по каталогу SDSS

Нами составлена выборка галактик ранних типов в скоплениях A1831A и A1831B по данным каталога SDSS DR6 (фильтр r) для построения фундаментальной плоскости (ФУП). Галактики были отобраны по тем же критериям, что и в наших предыдущих работах [1] и [2]. Для того, чтобы уменьшить влияние ошибок определения дисперсии скоростей звезд и параметров профиля де Вокулера, мы отбирали только объекты с $\sigma > 100$ км/с и эффективным радиусом, превышающим $1''$. Кроме того, мы взяли недостающие измерения дисперсий скоростей звезд для 17 галактик из работы [17], с рекомендованной поправкой ($\Delta \log \sigma = -0.026$) для учета систематического отличия этих измерений от данных SDSS, и привели их к круглой апертуре (описано в следующем разделе). Всего отобрано 10 галактик в A1831A и 37 в A1831B в пределах соответствующих радиусов R_{200} . В Таблице 3 приведены следующие данные для этих галактик: экваториальные координаты на эпоху J2000; гелиоцентрическое красное смещение; центральная дисперсия скоростей звезд σ ; параметры профиля де Вокулера: полная величина и эффективный радиус, умноженный на $\sqrt{(b/a)}$; $fracDeV_r \geq 0.8$ — величина характеризующая вклад балджа де Вокулера в полную

светимость галактики; $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$ — индекс концентрации равный отношению радиусов, содержащих 90% и 50% потоков Петросьяна; $eClass \leq 0$ — параметр характеризующий спектр галактики: отрицательные величины соответствуют спектрам без заметных эмиссионных линий; расстояние галактики от центра скопления в угловых минутах.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ПОДСИСТЕМ В A1831

Как и в предыдущих работах, для определения расстояний до исследуемых скоплений мы использовали параметры галактик ранних типов и зависимости между ними: соотношение Корменди, фотометрическую плоскость (ФОП) и фундаментальную плоскость (ФУП). Соотношение Корменди в фильтре R_c для большой выборки галактик имеет вид: $\log R_e = 0.38\mu_e + \gamma$. На Рис. 4 (слева) показано это соотношение для 7 наблюдавшихся нами галактик в A1831A и 6 галактик в A1831B. Определение расстояний до скоплений по соотношению Корменди [18], исправленному за зависимость остаточных отклонений от величины галактики, подробно описано в нашей работе [19], где мы аппроксимировали зависимость остаточных отклонений от величины галактики полиномом второй степени и вводили соответствующую поправку в определяемые нуль-пункты (расстояния). На Рис. 4 (слева) построено это соотношение для

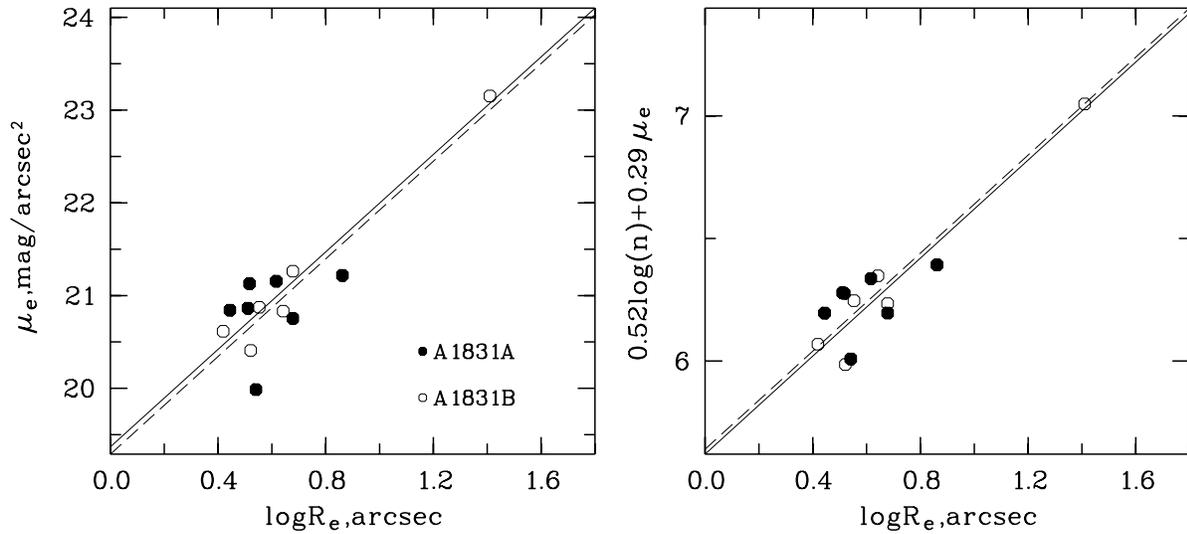


Рис. 4. Соотношение Корменди (слева) и фотометрическая плоскость (справа) для галактик ранних типов в A1831A и A1831B, по измерениям на 1-м телескопе. Штриховая линия соответствует среднему нуль-пункту для A1831A, сплошная — A1831B.

7 наблюдавшихся нами галактик в A1831A и 6 галактик в A1831B. По оси абсцисс указаны определенные по данным наших наблюдений $\log R_e$ в угловых секундах, исправленные за качество изображения. В поверхностные яркости (ось ординат) введена космологическая поправка $10 \log(1+z)$. К-поправка и поправка за эволюцию для $z \sim 0.07$ примерно равны по абсолютной величине, но имеют разные знаки, поэтому они не учитывались. Линии на рисунке соответствуют усредненным (по всем галактикам соответствующей подсистемы) нуль-пунктам соотношений, которые представлены в Таблице 4. Разность нуль-пунктов для соотношения Корменди равна $\Delta\gamma_{KR} = 0.031 \pm 0.073$. После введения поправки за зависимость от величины галактики получаем $\Delta\gamma_{KRm} = 0.089 \pm 0.052$. Если мы построим фундаментальную плоскость (ее форму в фильтре R мы взяли из [20]) для тех же галактик, добавив третий параметр — их дисперсии скоростей из работы [17] (они даны в Таблице 2), то получим следующую разность нуль-пунктов (Рис. 5) $\Delta\gamma_{FP(R)} = 0.149 \pm 0.047$.

Соотношение Корменди и без поправки и с поправкой не позволяет с достаточной точностью определить расстояния до подсистем, чтобы можно было сделать выбор в пользу одного из двух вариантов: 1) скопления находятся приблизительно на одном расстоянии и движутся с большой относительной скоростью и 2) разность расстояний скоплений соответствуют разности их лучевых скоростей в согласии с хаббловским законом

(около 50 Мпк в данном случае). Промежуточные варианты — скопления достаточно удалены друг от друга, но тем не менее имеют заметные пекулярные скорости — гораздо менее вероятны *a priori*, поскольку известно, что пекулярные скорости изолированных скоплений невелики (порядка 300 км/с). Использование ФУП позволяет с уровнем достоверности 99% заключить, что подсистемы находятся не на одном и том же расстоянии. При этом разность средних нуль-пунктов превосходит ожидаемую в том случае, если подсистемы находятся на хаббловских расстояниях. Для наблюдаемой разности лучевых скоростей разность нуль-пунктов должна составлять $\Delta\gamma_H = 0.078$.

Фотометрическая плоскость (ФОП) получается из фундаментальной плоскости галактик ранних типов, если спектрально измеряемый параметр, центральную дисперсию скоростей звезд в галактике, заменить на фотометрически измеряемый параметр Серсика n , который характеризует форму профиля поверхностной яркости. В наших предыдущих работах ([1] и [2]) мы подробно описали применение ФОП для определения расстояний. На Рис. 4 (справа) приведена ФОП для 7 галактик в A1831A и 6 галактик — в A1831B, а значения средних нуль-пунктов приведены в Таблице 4. Разность средних нуль-пунктов равна $\Delta\gamma_{PP} = -0.027 \pm 0.063$. ФОП, как и соотношение Корменди, не позволяет с достаточной точностью определить разность расстояний подсистем в скоплении A1831.

Таблица 3. Параметры галактик ранних типов из каталога SDSS

| Скопл. | α (J2000) δ | z_h | cz_h | σ | m_r | R_e | $fracDeV_r$ | $r90/r50$ | $eClass$ | R |
|------------------------|---------------------------|----------|--------|----------|---------|----------|-------------|-----------|----------|----------|
| | hhmmss ddmss | | км/с | км/с | зв.вел. | угл.сек. | | | | угл.мин. |
| A1831A | 13 59 07.59+27 56 24.6 | 0.060735 | 18208 | 206* | 15.704 | 3.388 | 1.000 | 3.373 | — | 0.68 |
| | 13 59 04.33+27 56 39.0 | 0.060815 | 18232 | 154 | 16.451 | 1.528 | 0.892 | 2.795 | -0.144 | 1.42 |
| | 13 59 17.26+27 56 05.7 | 0.060450 | 18122 | 270 | 14.695 | 3.447 | 0.934 | 3.126 | -0.172 | 1.49 |
| | 13 58 54.64+27 57 38.0 | 0.063010 | 18890 | 102 | 16.901 | 1.797 | 1.000 | 3.105 | -0.179 | 3.74 |
| | 13 58 53.04+27 59 06.0 | 0.059654 | 17884 | 141 | 16.271 | 1.689 | 1.000 | 3.211 | -0.142 | 4.72 |
| | 13 59 08.74+28 01 21.3 | 0.064485 | 19332 | 238 | 14.166 | 10.168 | 0.567 | 2.957 | -0.154 | 4.94 |
| | 13 58 45.74+27 57 05.8 | 0.061859 | 18545 | 158 | 15.787 | 3.740 | 0.925 | 3.055 | -0.170 | 5.55 |
| | 13 59 08.86+28 03 23.6 | 0.065669 | 19687 | 202 | 14.703 | 5.643 | 1.000 | 2.663 | -0.177 | 6.98 |
| | 13 58 59.89+28 04 04.3 | 0.062835 | 18837 | 164* | 15.832 | 3.102 | 1.000 | 3.126 | -0.153 | 8.00 |
| | 14 00 15.17+28 00 56.1 | 0.065273 | 19568 | 112 | 17.316 | 1.943 | 0.942 | 3.126 | -0.254 | 14.94 |
| A1831B | 13 59 15.09+27 58 34.4 | 0.075926 | 22762 | 285* | 14.040 | 11.916 | 0.892 | 2.769 | — | 0.00 |
| | 13 59 12.45+27 58 48.3 | 0.076782 | 23019 | 105 | 17.282 | 2.062 | 0.968 | 3.122 | -0.104 | 0.63 |
| | 13 59 17.27+27 59 39.0 | 0.080451 | 24119 | 200 | 16.772 | 1.149 | 0.919 | 2.791 | -0.166 | 1.18 |
| | 13 59 22.19+27 59 46.3 | 0.077290 | 23171 | 206* | 16.953 | 1.162 | 1.000 | 2.905 | — | 1.97 |
| | 13 59 24.64+27 59 34.3 | 0.071891 | 21552 | 117 | 17.261 | 1.506 | 0.977 | 2.832 | -0.131 | 2.33 |
| | 13 59 14.19+28 01 04.5 | 0.080415 | 24108 | 230* | 15.530 | 2.801 | 1.000 | 3.345 | -0.151 | 2.51 |
| | 13 59 24.49+27 57 05.7 | 0.079198 | 23743 | 186 | 17.117 | 1.265 | 1.000 | 2.911 | -0.143 | 2.55 |
| | 13 59 08.37+27 55 01.2 | 0.075645 | 22678 | 162* | 16.011 | 2.555 | 1.000 | 3.168 | -0.133 | 3.85 |
| | 13 59 22.46+28 02 10.1 | 0.075758 | 22712 | 108 | 17.539 | 1.456 | 0.887 | 2.730 | -0.115 | 3.94 |
| | 13 58 59.98+27 56 13.7 | 0.073430 | 22014 | 134 | 16.955 | 2.609 | 1.000 | 3.018 | -0.105 | 4.08 |
| | 13 59 02.98+28 05 16.8 | 0.075409 | 22607 | 117* | 16.808 | 1.414 | 1.000 | 2.940 | — | 7.22 |
| | 13 59 45.74+28 01 17.0 | 0.078222 | 23450 | 151* | 16.420 | 1.596 | 0.987 | 2.915 | -0.122 | 7.29 |
| | 13 59 48.66+27 57 51.1 | 0.071710 | 21498 | 158* | 16.345 | 2.613 | 0.869 | 3.044 | -0.177 | 7.45 |
| | 13 59 17.21+28 07 23.8 | 0.072680 | 21789 | 117 | 17.323 | 1.420 | 0.866 | 2.706 | -0.117 | 8.84 |
| | 13 58 52.54+27 48 34.8 | 0.077145 | 23127 | 230 | 16.729 | 1.190 | 0.989 | 2.719 | -0.143 | 11.17 |
| | 13 58 33.84+27 50 42.6 | 0.069875 | 20948 | 192* | 15.588 | 3.269 | 0.986 | 3.172 | — | 12.04 |
| | 13 58 21.53+28 01 19.1 | 0.071795 | 21524 | 148* | 16.530 | 1.318 | 0.983 | 2.859 | -0.125 | 12.14 |
| | 13 58 36.88+28 07 26.8 | 0.071205 | 21347 | 136 | 17.128 | 1.284 | 0.975 | 2.739 | -0.129 | 12.24 |
| | 13 59 08.28+28 10 46.0 | 0.075840 | 22736 | 177* | 15.589 | 4.771 | 1.000 | 2.625 | -0.164 | 12.29 |
| | 13 58 34.31+28 07 09.2 | 0.070859 | 21243 | 275* | 14.999 | 3.938 | 1.000 | 3.375 | — | 12.43 |
| 13 59 57.87+27 49 45.7 | 0.080998 | 24283 | 161* | 16.008 | 3.188 | 0.972 | 3.245 | -0.140 | 12.92 | |
| 13 58 36.78+28 08 23.0 | 0.072731 | 21804 | 122* | 16.768 | 1.345 | 0.944 | 2.710 | -0.115 | 12.95 | |
| 13 58 29.53+27 47 14.0 | 0.078230 | 23453 | 216 | 15.898 | 2.456 | 1.000 | 2.971 | -0.156 | 15.16 | |

Таблица 3. (Продолжение)

| Скопл. | α (J2000) δ | z_h | cz_h | σ | m_r | R_e | $fracDeV_r$ | $r90/r50$ | $eClass$ | R |
|--------|---------------------------|----------|--------|----------|----------|----------|-------------|-----------|----------|----------|
| | hhmmss ddmss | | км/с | км/с | зв.в.ел. | угл.сек. | | | | угл.мин. |
| A1831B | 13 59 55.07+27 46 12.0 | 0.078913 | 23658 | 177 | 17.117 | 1.212 | 1.000 | 3.148 | -0.114 | 15.21 |
| | 13 58 11.61+28 05 30.8 | 0.077488 | 23230 | 101 | 16.886 | 2.319 | 1.000 | 2.727 | -0.116 | 15.63 |
| | 13 57 57.54+28 02 18.0 | 0.081349 | 24388 | 113* | 16.879 | 1.916 | 1.000 | 2.629 | -0.108 | 17.52 |
| | 13 59 14.42+28 16 36.1 | 0.078426 | 23512 | 125 | 16.776 | 1.708 | 1.000 | 2.923 | -0.126 | 18.03 |
| | 14 00 19.30+27 47 08.8 | 0.073575 | 22057 | 162 | 15.889 | 2.910 | 0.835 | 2.736 | -0.135 | 18.22 |
| | 13 58 10.96+28 10 36.8 | 0.070459 | 21123 | 119 | 16.639 | 2.338 | 1.000 | 2.752 | -0.124 | 18.57 |
| | 13 58 43.14+28 16 06.5 | 0.076937 | 23065 | 127 | 16.992 | 1.436 | 1.000 | 3.038 | -0.104 | 18.90 |
| | 13 58 29.77+28 17 39.2 | 0.073459 | 22022 | 149 | 16.407 | 2.402 | 0.831 | 2.843 | -0.137 | 21.54 |
| | 13 57 57.93+28 11 49.6 | 0.071440 | 21417 | 205 | 16.427 | 1.102 | 1.000 | 2.834 | -0.155 | 21.57 |
| | 13 58 47.08+27 36 59.8 | 0.076658 | 22981 | 146 | 16.973 | 1.125 | 1.000 | 2.918 | -0.099 | 22.45 |
| | 14 00 55.04+27 54 02.5 | 0.076229 | 22853 | 220* | 15.476 | 3.438 | 1.000 | 3.058 | -0.192 | 22.54 |
| | 13 58 47.63+27 34 21.0 | 0.076729 | 23003 | 176* | 16.511 | 1.436 | 1.000 | 3.105 | -0.152 | 24.97 |
| | 13 57 47.16+28 15 22.3 | 0.073418 | 22010 | 182 | 16.297 | 4.453 | 1.000 | 3.247 | -0.212 | 25.65 |
| | 14 00 10.25+27 35 11.9 | 0.068409 | 20509 | 201 | 15.537 | 4.729 | 1.000 | 3.130 | -0.188 | 26.37 |

Поскольку статистическая точность оценки расстояния зависит от числа используемых галактик, наиболее надежный результат может быть получен с помощью ФУП, построенной по данным SDSS. Для построения ФУП средняя эффективная поверхностная яркость вычислялась по формуле:

$$\langle \mu_e \rangle = m_r + 2.5 \log(2\pi R_e^2) - 10 \log(1+z).$$

Центральная дисперсия скоростей σ и эффективный радиус приведены к круглой апертуре согласно [21]: $\sigma_{corr} = \sigma_{est}(r_{fiber}/r_o/8)^{0.04}$, где σ_{est} — измеренное значение дисперсии, r_{fiber} равен для данных SDSS 1.''5 и $r_o = r_e \sqrt{(b/a)}$, где r_o — эквивалентный эффективный радиус круга, а r_e — эффективный радиус вдоль большой оси галактики. На Рис. 6 приведена ФУП для 10 и 37 галактик скоплений A1831A и A1831B, отобранных в пределах соответствующих радиусов R_{200} . Для демонстрации типичной внутренней точности метода по галактикам более близкого скопления, на измерения которых в меньшей степени влияет качество изображений, на Рис. 6 дополнительно показаны галактики скопления A1314 ($z = 0.033$). Их параметры определены также по данным SDSS DR6. Линии на Рис. 6 соответствуют усредненным нуль-пунктам прямой регрессии относительно $\log R_e$ из работы Бернарди и

др. [22], полученной по 9000 галактик из каталога SDSS: $\log R_e = 1.17 \log \sigma + 0.30 \langle \mu_e \rangle + \gamma$. На Рис. 7 приведены индивидуальные расстояния (нуль-пункты γ) галактик в зависимости от лучевой скорости. Жирной кривой показана ожидаемая хаббловская зависимость между лучевой скоростью и расстоянием. Разность средних нуль-пунктов скоплений A1831A и A1831B (их значения даны в Таблице 4) равна $\Delta\gamma_{FP(r)} = 0.092 \pm 0.031$.

Это позволяет с уровнем достоверности 99% отвергнуть предположение, что скопления находятся близко друг к другу и наблюдаемая относительная скорость обусловлена их гравитационным взаимодействием.

Наше измерение разности расстояний скоплений с помощью ФУП по данным SDSS находится в хорошем согласии с ожидаемой хаббловской зависимостью между скоростью и расстоянием ($\Delta\gamma_H = 0.078$). Это позволяет с большой уверенностью сделать вывод, что подсистемы в скоплении A1831 находятся примерно на своих хаббловских расстояниях и являются гравитационно несвязанными, независимыми скоплениями, расположенными практически точно друг за другом по лучу зрения. Скопление A1831A является фоновым для более богатого рентгеновского скопления A1831B.

Таблица 4. Относительные расстояния субскоплений

| Нуль-пункт | A1831A | | | A1831B | | | A–B |
|------------------|--------------------|------------|----|--------------------|------------|----|--------------------|
| | <i>mean</i> | <i>rms</i> | N | <i>mean</i> | <i>rms</i> | N | |
| γ_{KR} | -7.327 ± 0.065 | 0.172 | 7 | -7.358 ± 0.034 | 0.083 | 6 | 0.031 ± 0.073 |
| γ_{KRm} | -7.270 ± 0.036 | 0.095 | 7 | -7.359 ± 0.038 | 0.093 | 6 | 0.089 ± 0.052 |
| $\gamma_{FP(R)}$ | -9.085 ± 0.035 | 0.085 | 6 | -9.234 ± 0.031 | 0.069 | 5 | 0.149 ± 0.047 |
| γ_{PP} | -5.645 ± 0.050 | 0.133 | 7 | -5.618 ± 0.038 | 0.092 | 6 | -0.027 ± 0.063 |
| $\gamma_{FP(r)}$ | -8.133 ± 0.028 | 0.090 | 10 | -8.225 ± 0.013 | 0.079 | 37 | 0.092 ± 0.031 |

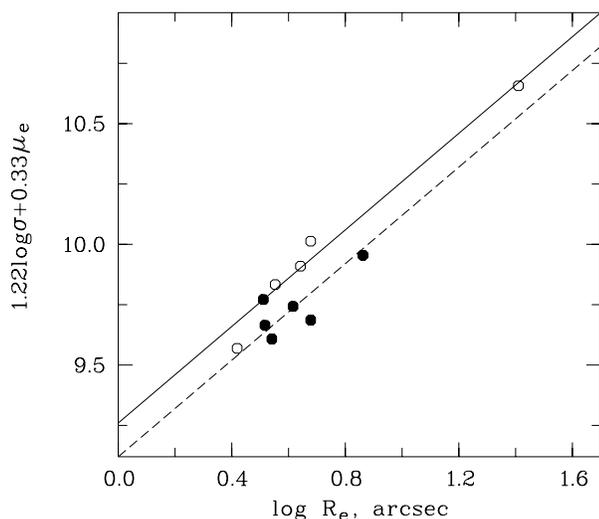


Рис. 5. Фундаментальная плоскость галактик ранних типов в A1831A и A1831B (фильтр R_c). Обозначения те же, что и на Рис. 4.

5. ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА СКОПЛЕНИЙ A1831A И A1831B

Анализ Рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод в пользу того, что в обоих скоплениях еще не наступила полная релаксация. На Рис. 2 можно видеть, что в центре скопления A1831A внутри области радиусом $10'$ преобладают галактики с лучевыми скоростями меньше, чем средняя лучевая скорость в пределах R_{200} . Галактики основного пика в распределении скоростей отсутствуют в центре, образуя две довольно компактные группы к северу и югу от центра. Это является признаком того, что скопление находится в процессе формирования и еще не достигло вириального равновесия, поэтому, вероятно, что для него дисперсия скоростей и оценка массы могут быть несколько завышены. Не исключено также, что пространственно и кинематически обособленные группы, из которых состоит

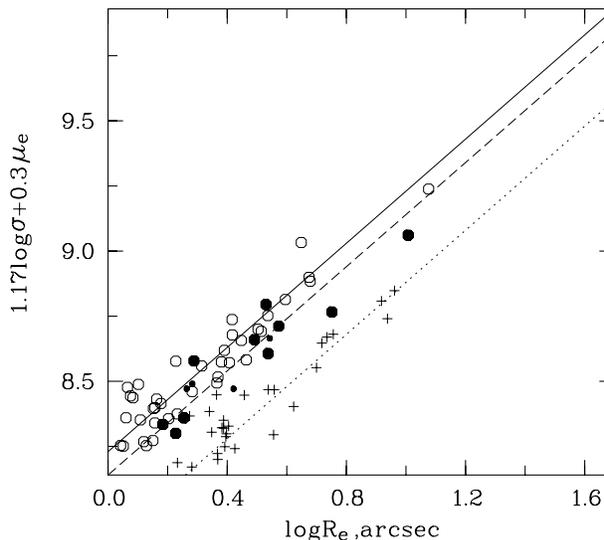


Рис. 6. Фундаментальная плоскость галактик ранних типов, расположенных в пределах радиуса R_{200} , в A1831A и A1831B (данные SDSS DR6). Значками меньшего размера показаны галактики в A1831A, находящиеся между радиусом R_{200} и радиусом Эйбелла (2.143 Мпк). Остальные обозначения те же, что и на Рис. 4. Плюсами показаны галактики более близкого скопления A1314 ($z = 0.033$).

скопление A1831A, могут быть достаточно далеко разнесены вдоль луча зрения, то есть скопление ложное — результат случайной проекции.

В скоплении A1831B (Рис. 3) на расстоянии от $10'$ до $22'$ от центра (1–2 Мпк) практически отсутствуют галактики со скоростями близкими к средней скорости скопления ($\Delta cz < 500$ км/с), но много галактик с большим отклонением в обе стороны от средней скорости скопления ($\Delta cz \approx 1000 - 1500$ км/с). Такая кинематическая структура может указывать на то, что только в пределах $10'$ от центра скопление вириализовано (в пользу этого предположения также то, что именно в этой области сосредоточено

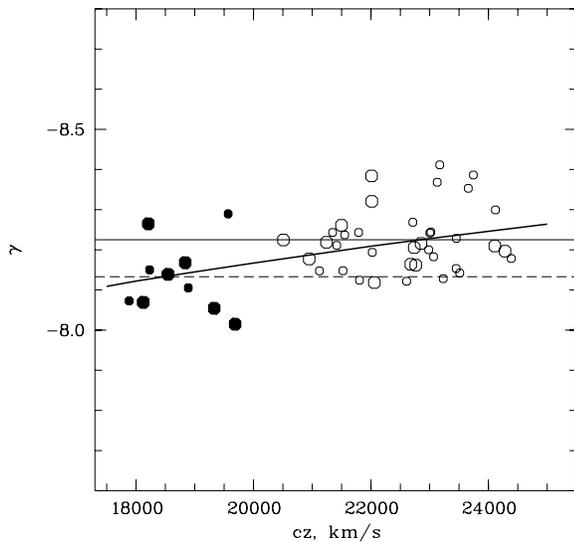


Рис. 7. Зависимость индивидуальных расстояний, нуль-пунктов фундаментальной плоскости γ , от лучевой скорости для галактик ранних типов, расположенных в пределах R_{200} , в A1831A и A1831B (данные SDSS). Обозначения те же, что и на Рис. 4. Кружками большего размера обозначены галактики с $\log R_e \geq 0.4$. Жирная кривая линия соответствует хаббловской зависимости между лучевой скоростью и расстоянием. Горизонтальной пунктирной линией показано среднее расстояние A1831A, сплошной — A1831B.

рентгеновское излучение, достаточно симметрично распределенное вокруг центральной ярчайшей галактики скопления), а во внешних областях преобладают движения направленные к центру скопления, причем преимущественно под малыми углами к лучу зрения. В этом случае динамика скопления далека от равновесной и оценка массы скопления по дисперсии скоростей может быть сильно завышена. Это подтверждается независимыми оценками массы скопления с использованием корреляционных соотношений между массой и некоторыми другими характеристиками скоплений.

В [11] нами было определено соотношение между массой и светимостью для скоплений галактик из сверхскопления Большая Медведица. Оно имеет вид: $\log L_K = 0.75 \log M + 1.8$. Для A1831B вычисленная по светимости масса в 3 раза меньше массы, определенной по дисперсии скоростей. Оценки массы по соотношениям между рентгеновской светимостью и массой [23] и температурой газа и массой [24] также получаются в 2–3 раза ниже. Таким образом, имеется достаточно оснований для вывода о том, что скопление A1831B в целом еще не сформировалось и продолжает в настоящий момент времени наращивать массу за счет аккреции галактик извне.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы исследовали скопление A1831, чтобы прояснить вопрос о гравитационной связанности его подсистем, оценив расстояние между ними. Мы получили фотометрические параметры (m_R , μ_e , $\log(R_e)$, n) 13 галактик ранних типов в полосе R_c для подсистем A1831A и A1831B на 1-м телескопе CAO РАН. По этим данным построены соотношение Корменди и фотометрическая плоскость для галактик ранних типов, а также фундаментальная плоскость с привлечением данных по дисперсии скоростей из литературы. По данным каталога SDSS DR6 определены основные параметры подсистем и построена фундаментальная плоскость для галактик ранних типов в фильтре r . Расстояния до подсистем, измеренные тремя способами (наиболее надежно с помощью фундаментальной плоскости) позволили нам определить пространственную структуру скопления A1831. С уровнем значимости 1% отвергнута гипотеза, что подсистемы расположены на одном и том же расстоянии и гравитационно связаны. Скопление A1831 состоит из двух независимых скоплений, A1831A и A1831B, которые находятся на соответствующих их лучевым скоростям хаббловских расстояниях.

В обоих скоплениях нами выявлена сложная внутренняя структура. Поэтому оценки массы, полученные в предположении о вириальном равновесии, должны рассматриваться только как ограничения сверху. В A1831A достаточно уверенно выделяется несколько кинематически обособленных групп галактик. Они могут либо находиться в процессе слияния в единое скопление, либо представлять случайную проекцию. В случае A1831B есть основания считать, что это скопление находится в динамически активной фазе эволюции. Особенности кинематической структуры скопления можно объяснить тем, что происходит анизотропная аккреция галактик из окрестностей скопления на его вириализованное ядро, преимущественно вдоль луча зрения.

Исходя из втрое большей населенности скопления A1831B и того, что с ним связано рентгеновское излучение, именно A1831B должно рассматриваться как основное скопление — собственно A1831, а A1831A как бедное фоновое скопление или даже как случайная проекция нескольких групп галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за частичную поддержку этой работы (грант 07-02-01417а). Работа выполнена с использованием баз 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. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **62**, 311 (2007), astro-ph/09122501.
2. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 207 (2009), astro-ph/09122506.
3. M. Einasto, E. Tago, J. Jaaniste, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 119 (1997).
4. J. K. Adelman-McCarthy et al., *Astrophys. J. Suppl.* **175**, 297 (2008).
5. G. O. Abell, H. G. Jr. Corwin, and R. P. Olowin, *Astrophys. J. Suppl.* **70**, 1 (1989).
6. J. G. Hoessel, J. E. Gunn, and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **241**, 486 (1980).
7. I. D. Karachentsev and A. I. Kopylov, *Pis'ma Astronom. Zh.* **7**, 515 (1981).
8. I. D. Karachentsev and A. I. Kopylov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **243**, 390 (1990).
9. S. Maurogordato, D. Proust, A. Cappi, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 411 (1997).
10. M. F. Struble and H. J. Rood, *Astrophys. J. Suppl.* **125**, 35 (1999).
11. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 1 (2009), astro-ph/09122503.
12. H. Ebeling, W. Voges, H. Böhringer, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **281**, 799 (1996).
13. C. Shang and C. Scharf, *Astrophys. J.* **690**, 879 (2009).
14. A. U. Landolt, *Astronom. J.* **104**, 340 (1994).
15. J. L. Sérsic, *Bol. Asoc. Argent. Astron.* **6**, 41 (1963).
16. R. P. Saglia, E. Bertschinger, G. Baggley, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **264**, 961 (1993).
17. R. J. Smith, M. J. Hudson, J. E. Nelan, et al., *Astronom. J.* **128**, 1558 (2004).
18. J. Kormendy, *Astrophys. J.* **218**, 333 (1977).
19. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astron. Lett.* **27**, 345 (2001).
20. J. P. Blakeslee, J. R. Lucey, J. L. Tonry, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **330**, 443 (2002).
21. M. Bernardi, R. K. Sheth, J. Annis, et al., *Astronom. J.* **125**, 1817 (2003a).
22. M. Bernardi, R. K. Sheth, J. Annis, et al., *Astronom. J.* **125**, 1866 (2003b).
23. E. S. Rykoff, A. E. Evrard, T. A. McKay, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **387**, L28 (2008).
24. P. Popesso, A. Biviano, H. Böhringer, et al., *Astronom. and Astrophys.* **433**, 431 (2005).

STRUCTURE OF CLUSTERS WITH BIMODAL DISTRIBUTION OF GALAXY LINE-OF-SIGHT VELOCITIES III: A1831

A.I. Kopylov, F.G. Kopylova

We study the A1831 cluster within the framework of our program of the investigation of galaxy clusters with bimodal velocity distributions (i.e., clusters where the velocities of subsystems differ by more than $\Delta cz \sim 3000$ km/s). We identify two subsystems in this cluster: A1831A ($cz = 18970$ km/s) and A1831B ($cz = 22629$ km/s) and directly estimate the distances to these subsystems using three methods applied to early-type galaxies: the Kormendy relation, the photometric plane, and the fundamental plane. To this end, we use the results of our observations made with the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences and the data adopted from the SDSS DR6 catalog. We confirmed at a 99% confidence level that (1) the two subsystems are located at different distances, which are close to their Hubble distances, and (2) the two subsystems are located behind one another along the line of sight and are not gravitationally bound to each other. Both clusters have a complex internal structure, which makes it difficult to determine their dynamical parameters. Our estimates for the velocity dispersions and masses of the two clusters: 480 km/s and $1.9 \times 10^{14} M_{\odot}$ for A1831A, 952 km/s and $1.4 \times 10^{15} M_{\odot}$ for A1831B should be viewed as upper limits. At least three spatially and kinematically distinct groups of galaxies can be identified in the foreground cluster A1831A, and this fact is indicative of its incomplete dynamical relaxation. Neither can we rule out the possibility of a random projection. The estimate of the mass of the main cluster A1831B based on the dispersion of the line-of-sight velocities of galaxies is two-to-three times greater than the independent mass estimates based on the total K-band luminosity, temperature, and luminosity of the X-ray gas of the cluster. This fact, combined with the peculiarities of its kinematical structure, leads us to conclude that the cluster is in a dynamically active state: galaxies and groups of galaxies with large line-of-sight velocities relative to the center of the cluster accrete onto the virialized nucleus of the cluster (possibly, along the filament directed close to the line of sight).

Key words: *Galaxies: groups: general*