

УДК 524.77-323.3

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПЛОСКОСТЬ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК: РАССТОЯНИЯ И ПЕКУЛЯРНЫЕ СКОРОСТИ СВЕРХСКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК НА МАЛЫХ МАСШТАБАХ

© 2024 Ф. Г. Копылова^{1*}, А. И. Копылов¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 года; после доработки 28 сентября 2023 года; принята к публикации 10 октября 2023 года

Настоящая работа является продолжением опубликованной в 2016 году работы Копыловой и Копылова по построению фундаментальной плоскости (ФП) групп и скоплений галактик. В данной работе выборка систем галактик увеличена с 94 до 172 объектов. Нами исследованы соотношения между основными характеристиками групп и скоплений галактик по архивным данным каталогов SDSS, 2MASX и NED. Измеренные параметры ($\lg L_K$, $\lg R_e$ и $\lg \sigma$) скоплений галактик определяют фундаментальную плоскость в ближней инфракрасной области: $L_K \propto R_e^{0.77 \pm 0.09} \sigma^{1.44 \pm 0.12}$. Форма ФП групп и скоплений согласуется с ФП галактик ранних типов (SDSS, r -фильтр), определенной таким же способом. Регрессия относительно $\lg R_e$ в килопарсеках дает проекцию фундаментальной плоскости — $\lg R_e = 0.98(\pm 0.06) \lg \sigma - 0.56(\pm 0.04) \langle \lg I_e \rangle + 3.57(\pm 0.07)$, которую можно использовать для определения расстояний систем галактик. Среднеквадратичное отклонение нуля-пункта равно 0.07, что эквивалентно 16-процентной ошибке определения расстояния группы или скопления галактик. Впервые нами определены с помощью ФП средние относительные расстояния и пекулярные скорости пяти больших сверхскоплений галактик. По нашим оценкам средняя пекулярная скорость сверхскоплений галактик относительно СМВ составляет $+75 \pm 360 \text{ км с}^{-1}$.

Ключевые слова: галактики: группы — галактики: скопления — галактики: фундаментальные параметры, галактики — расстояния и красные смещения — скопления: отдельные: Hercules, Leo, Ursa Major, Bootes, Corona Borealis Superclusters — космология: крупномасштабная структура Вселенной

1. ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабная структура Вселенной зависит от космологических параметров — космологической плотности вещества, темпа роста структур, темпа расширения Хаббла. Неоднородности в крупномасштабном распределении вещества во Вселенной вызывают пекулярные движения галактик и скоплений галактик. Таким образом, поле пекулярных скоростей галактик и скоплений галактик является мощным инструментом в космологическом исследовании.

Гравитационно связанные системы — шаровые скопления звезд, галактики, скопления галактик — подчиняются теореме вириала в форме $M \propto R\sigma^2$ и имеют схожие соотношения между параметрами, например фундаментальную плоскость. Фундаментальная плоскость является эмпирическим соотношением между тремя наблюдаемыми характеристиками галактик ранних типов: физическим раз-

мером (R), дисперсией лучевых скоростей вдоль луча зрения (σ) и поверхностной яркостью. ФП выражается через эти величины как

$$\lg R_e = a \lg \sigma + b \langle \lg I_e \rangle + c,$$

где I_e — средняя поверхностная яркость в пределах эффективного радиуса R_e , σ — центральная дисперсия лучевой скорости в проекции, c — нуль-пункт (Djorgovski and Davis, 1987; Dressler et al., 1987; Jorgensen et al., 1996; Pahre et al., 1998; Bernardi et al., 2003; Saulder et al., 2013). Поскольку $\lg R_e$ и $\langle \lg I_e \rangle$ определяются светимостью (или массой) галактик — основным параметром, описывающим галактику $\langle I_e \rangle = L/(2\pi R_e^2)$, то $\lg L$, $\lg \sigma$ и $\lg R_e$ также образуют ФП —

$$\lg L = a \lg \sigma + b \lg R_e + c.$$

Фундаментальная плоскость галактик ранних типов часто используется для определения пекулярных скоростей систем галактик (например, Jorgensen et al., 1996; Mohr and Wegner, 1997;

*E-mail: flera@sao.ru

Colless et al., 2001; Blakeslee et al., 2002; Hudson et al., 2004; Batista and Batuski, 2013; O'Mill et al., 2015; Kopylova and Kopylov, 2017, 2021; Mutabazi, 2021).

Впервые ФП самих скоплений галактик была построена, с использованием фотометрических наблюдательных характеристик, для выборки 16 богатых скоплений галактик ($z < 0.2$) (Schaeffer et al., 1993). В этой работе использованы светимости L в фильтре V и эффективные радиусы R_e систем галактик, содержащие половину светимости, определенные по профилю Вокулера. В результате вычисления регрессионной зависимости L от других параметров получен следующий вид ФП: $L \propto R_e^{0.89 \pm 0.15} \sigma^{1.28 \pm 0.11}$. В работе Adami et al. (1998) изучаемые параметры двадцати (выборка ENACS) скоплений галактик определены для разных профилей: Кинга, Хаббла, NFW и Вокулера. Для наилучшим образом подошедшего к наблюдаемым данным профилю Кинга они получили ФП $L \propto R_e^{1.19 \pm 0.14} \sigma^{0.91 \pm 0.16}$, для профиля Вокулера (лучше описывающего результаты Schaeffer et al. (1993)) — $L \propto R_e^{0.61 \pm 0.28} \sigma^{0.95 \pm 0.32}$.

Для выборки скоплений галактик WINGS (D'Onofrio et al., 2013) построены профили поверхностной яркости в фильтре V , в которые в центральной области вписан профиль Вокулера, а во внешние области — экспоненциальный диск. Полученная ФП имеет следующий вид (приведена в подписи оси y рис. 5 в D'Onofrio et al. (2013)):

$$\lg R_e = 1.08(\pm 0.16) \lg \sigma - 0.96(\pm 0.13) \lg \langle I_e \rangle + 2.60(\pm 0.47). \quad (1)$$

Детальное изучение сходства свойств (parallelism) галактик ранних типов и скоплений галактик проведено в работах Chiosi et al. (2020) и D'Onofrio et al. (2019, 2020).

Целью данной работы является построение фундаментальной плоскости между параметрами 172 групп и скоплений галактик, которые имеют красные смещения в диапазоне $0.012 < z < 0.10$ и дисперсии лучевых скоростей $200 \text{ км с}^{-1} < \sigma < 1100 \text{ км с}^{-1}$. Данная работа, с увеличением количества объектов, является продолжением работы Kopylova and Kopylov (2016). Определяемые нами характеристики L_K , σ , R_e (найденный по $N_{\text{tot}}/2$) и соотношения между ними (фундаментальная плоскость) дают нам возможность измерить относительные расстояния скоплений галактик в сверхскоплениях, самих сверхскоплений галактик, прояснить структурные свойства скоплений галактик, степень их отклонения от релаксированного состояния (эволюционный статус). Выборка включает 71 группу галактик с дисперсией лучевых скоростей $\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$ и

101 скопление галактик с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$. Часто группы галактик определяют как системы галактик с массой $M < 10^{14} M_\odot$ и, соответственно, меньшей дисперсией лучевых скоростей $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$ (например, Poggianti et al., 2008).

Ранее в работе Kopylova and Kopylov (2016) нами было показано, что при построении общей ФП групп и скоплений возникает необходимость поиска эффективного радиуса, содержащего половину галактик от всех галактик в пределах радиуса гало (R_{sp}), поскольку часто эффективные радиусы, содержащие половину светимости групп галактик, оказывались внутри центральной самой яркой галактики. Классически, в системе стандартных фотометрических параметров Вокулера (de Vaucouleurs and Page, 1962), эффективный радиус галактики r_e — это радиус круга, внутри которого излучается половина полной светимости галактики. Эффективная поверхностная яркость — это поверхностная яркость на расстоянии r_e от центра галактики. В работе Kopylova and Kopylov (2016) также показано, что между полной L_K — светимостью и N — количеством галактик (в пределах радиуса R_{200}), определенными до предела $M_K < -21^m$ для всех систем по функции светимости, существует линейная зависимость.

Группы и скопления галактик расположены в областях сверхскоплений галактик Leo, Hercules, Ursa Major, Corona Borealis, Bootes, A 1656/A1367. Также мы включили в выборку богатые рентгеновские скопления из других, более мелких сверхскоплений галактик и поля. Размеры темного гало систем галактик, количество галактик, светимость и радиус, в пределах которого наблюдается половина галактик, определены по интегральному распределению числа галактик (по профилю систем галактик) в зависимости квадрата радиуса от центра. Работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS¹⁾ (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7, 8 (Aihara et al., 2011)), данных каталога 2MASS XSC (Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog (Jarrett et al., 2000)) и NED²⁾ (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом. Во втором разделе описана выборка систем галактик. В третьем разделе определены параметры систем галактик, необходимые для построения ФП: найдена граница гало R_{sp} , количество галактик в пределах этого радиуса, измерен эффективный радиус R_e , в пределах которого наблюдается половина галактик, измерена полная светимость L_K .

¹⁾<http://www.sdss.org>

²⁾<http://nedwww.ipac.caltech.edu>

В четвертом разделе получены общая ФП и фундаментальные плоскости членов сверхскоплений галактик и приведены фундаментальные плоскости относительно длинной оси $\lg R_e$, использующиеся для определения расстояний систем галактик. В пятом разделе описано определение расстояний и пекулярных скоростей сверхскоплений галактик. 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. ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ

Наша выборка состоит из 172 групп и скоплений галактик из областей сверхскоплений галактик Leo ($N = 12$), Hercules (Her, $N = 27$), Ursa Major (UMa, $N = 19$), Corona Borealis (CrB, $N = 8$), Bootes (Boo, $N = 13$), а также других более мелких сверхскоплений и поля ($N = 25$ и $N = 20$ соответственно), групп галактик из области сверхскопления A 1656/A1367 ($N = 48$). Выборка скоплений галактик в сверхскоплениях была составлена для измерения пекулярных скоростей скоплений галактик в них по фундаментальной плоскости галактик ранних типов (Korylova and Korylov, 2007; 2014; 2017; 2021). Кроме того, мы исследовали зависимость между динамической массой в пределах вириализованного радиуса R_{200} и инфракрасной (ИК) светимостью в фильтре K_s (далее K) (Korylova and Korylov, 2009; 2011; 2013; 2015; 2022). Все скопления галактик имеют зарегистрированное рентгеновское излучение, кроме 21 группы галактик. Выборка систем галактик охватывает максимальный диапазон дисперсий лучевых скоростей систем — от 200 км с^{-1} до 1100 км с^{-1} — в локальной Вселенной ($0.01 < z < 0.09$).

Обработка для всех объектов выборки проводилась одинаковым образом. Соответствующий эмпирический радиус скопления R_{200} предсказывается дисперсией лучевых скоростей галактик и его можно оценить по формуле $R_{200} = \sqrt{3}\sigma/(10H(z)) \text{ Мпк}$ (Carlberg et al., 1997). Тогда, предполагая, что в пределах этого радиуса скопление вириализовано, можно найти массу $M_{200} = 3G^{-1}R_{200}\sigma^2$, где σ — одномерная дисперсия лучевых скоростей галактик, расположенных в пределах радиуса R_{200} , G — гравитационная постоянная. Для систем галактик нами измерены гелиоцентрические красные смещения, дисперсии лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$, радиусы R_{200} , K -светимости $L_{K,200}$ ($M_K < -21^m$), динамические массы M_{200} и другие параметры систем галактик в пределах радиуса R_{200} , которые приведены в указанных работах.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

3.1. Радиус гало — splashback-радиус R_{sp} , эффективный радиус R_e

Аналогично фундаментальной плоскости галактики ранних типов фундаментальная плоскость групп и скоплений галактик является эмпирическим соотношением между дисперсией лучевых скоростей галактик в пределах выбранного радиуса, физическим эффективным радиусом и средней поверхностной яркостью в пределах эффективного радиуса. В работе Korylova and Korylov (2016) мы показали, что в скоплениях галактик можно найти эффективный радиус, содержащий половину галактик гало, чтобы построить общую фундаментальную плоскость как бедных групп, так и богатых скоплений галактик.

С этой целью для групп/скоплений галактик мы определяем splashback-радиус R_{sp} , согласно методологии, изложенной в работе Korylova and Korylov (2016), и находим количество галактик в его пределах, исправленное за фон (определяемый по наклону прямой). Затем определяем радиус, содержащий половину галактик, и вычисляем светимость этих галактик. Удвоив ее, получаем полную светимость группы или скопления. Для большинства богатых скоплений галактик (но не групп) с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$ можно определять эффективный радиус обычным способом — как радиус, в пределах которого содержится половина светимости системы. Нами показано, что эффективные радиусы, измеренные по количеству галактик, в среднем на 17% больше, чем радиусы, измеренные по светимости (Korylova and Korylov, 2016).

Чтобы найти радиус гало R_{sp} , нам важно выделить ближайшие окрестности скоплений галактик. Для этого мы используем комплект рисунков, которые детально характеризуют структуру и кинематику скоплений галактик. В качестве примера здесь дан таковой для A 1668 (см. рис. 1). Сведения об основных физических параметрах скопления можно найти в работе Korylova and Korylov (2022). На панелях рис. 1 представлены:

- отклонение лучевых скоростей галактик — членов скопления и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости скопления или группы в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления);
- расположение галактик в плоскости неба в экваториальных координатах;
- интегральное распределение числа всех галактик в зависимости от квадрата радиуса;

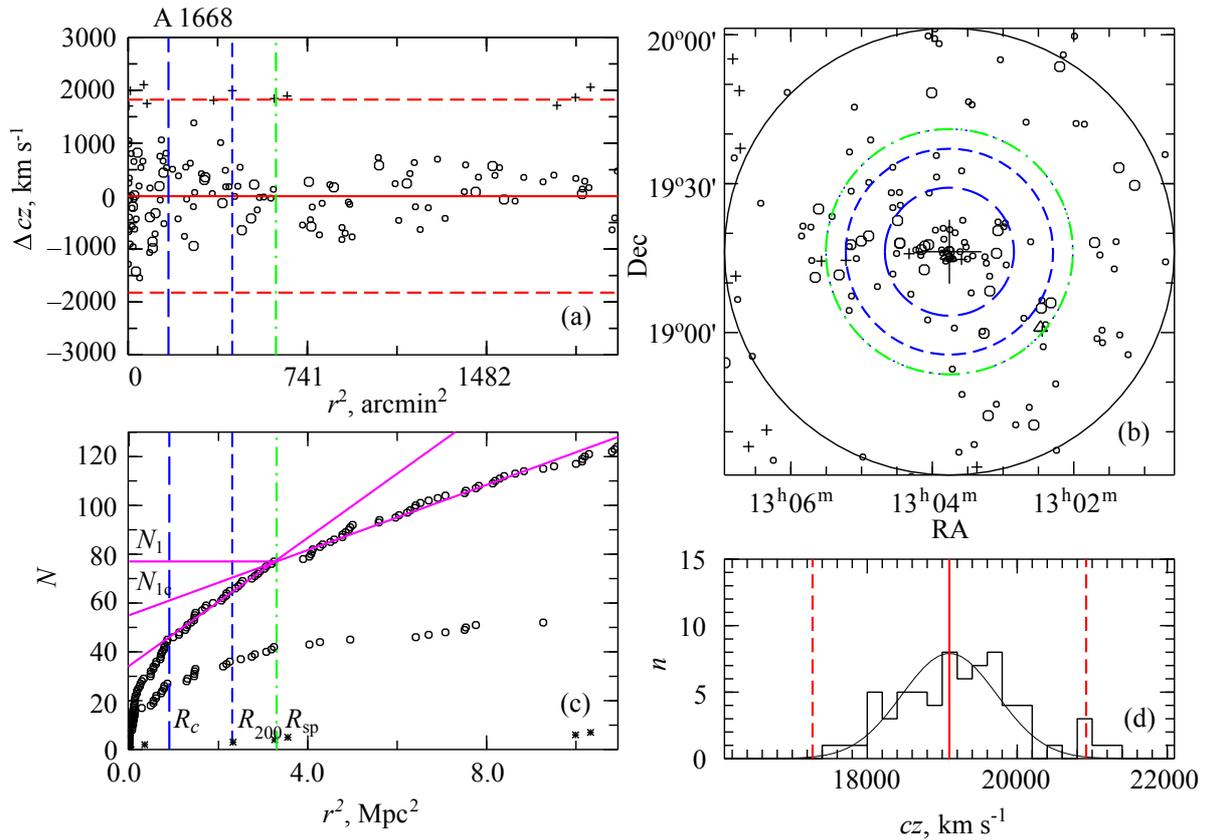


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении A 1668. На панели (a) показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальными линиями показаны: радиусы R_{200} и R_c — короткими и длинными штрихами соответственно, штрихпунктиром — радиус R_{sp} . Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -24^m$, прямыми крестиками — галактики заднего фона, косыми — галактики переднего фона. По оси абсцисс приведено расстояние от центра скопления в угловых минутах в квадрате. На панели (b) показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на панели (a) (обозначения те же). Кругами выделены области с радиусами R_{200} (короткие штрихи), R_c (длинные штрихи), R_{sp} (штрихпунктир). Область исследования ограничена кругом радиусом $3.5R_{200}$ (сплошная линия). Большим крестом отмечен центр скопления. На панели (c) дано интегральное распределение полного числа галактик (верхняя кривая) в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления в мегапарсеках. Нижняя кривая — распределение галактик ранних типов ярче $M_K = -21^m$. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на панели (a), звездочки — галактикам фона. Сплошные линии характеризуют ход распределения галактик за и перед радиусом R_{sp} . Обозначения N_1 и N_{1c} — количество галактик в пределах R_{sp} без учета и с учетом фона. На панели (d) представлено распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая σ скопления). Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

(d) гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200} .

Особый интерес представляет рис. 1c, где приведено интегральное распределение числа галактик от квадрата расстояния от центра скопления A 1668, совпадающего с ярчайшей галактикой. Индексами c , 200 и sp на рис. 1 обозначены радиусы в мегапарсеках выделенных нами областей скопления (ядро, вириализованная область и гало темной материи). Как показывает моделирование, найденный нами радиус R_{sp} является фактической границей гало темной материи (Adhikari et al., 2014; Diemer and Kravtsov, 2014).

Таким образом, анализ рис. 1 позволяет сделать вывод, что основная часть галактик скопления расположена в области, ограниченной радиусом R_{sp} . Наша задача — выделить эту область, найти количество галактик в ней с учетом фона, подсчитать их ИК-светимость также с учетом фона и оценить радиус скопления как радиус, содержащий половину галактик до выбранного нами предела $M_K = -21^m$. Как показано на рис. 1c, в пределах радиуса R_{sp} заключено N_1 галактик без учета фона, а с учетом фона — N_{1c} галактик, которые мы нашли графически по наклону в распределении галактик за пределами гало скопления. N_1 и N_{1c} связаны

уравнением $N_{1c} = N_1 - \pi R_{sp}^2 \Sigma$, откуда плотность галактик (в области R_{sp}) $\Sigma = (N_1 - N_{1c})/(\pi R_{sp}^2)$. По полученным галактикам мы нашли радиус, на котором наблюдается $N_{1c}/2$ галактик. На рис. 2 на примере близкого скопления A 1656 ($z = 0.024$) показана зависимость радиуса R_{sp} от абсолютной величины галактик в фильтре K . Можно заметить, что в скоплении радиус R_{sp} не зависит от предельной величины выборки, кроме, возможно, подвыборки самых ярких галактик с $M_K < -23^m35$. Предел нашей выборки практически соответствует самым далеким системам галактик A 2142 ($M_K < -23^m35$) и A 2244 ($M_K < -23^m5$).

Следующим шагом в построении ФП является определение полной светимости систем галактик до одинакового предела $M_K = -21^m$. В группах и скоплениях галактик самыми массивными и яркими галактиками являются галактики ранних типов, то есть в полной светимости скоплений доминируют яркие галактики, но в полное число галактик основной вклад дают слабые галактики.

3.2. Полная K -светимость

На инфракрасное излучение от звезд не оказывают существенного влияния ни вспышка звездообразования в галактике, ни пыль, так как в центральных областях скоплений галактик расположены в основном галактики ранних типов со старым звездным населением. Поэтому ИК-излучение точнее отслеживает массу звездного населения скоплений галактик и часто для этого используется (например, Lin et al., 2004; Ramella et al., 2004). Для определения полной светимости скоплений галактик в ИК-области мы применили результаты фотометрии, представленные в окончательной версии каталога 2MASS³⁾ для протяженных объектов (XSC, Jarrett et al., 2000). Поскольку примерно треть галактик групп и скоплений нашей выборки, обнаруженных спектрально в каталоге SDSS, не имела измерений в XSC, для определения K -величин мы применили метод, описанный Obríć et al. (2006). Для 99 000 галактик SDSS (DR1) величина K_{SDSS} определялась по показателю цвета ($u - r$). Использовалась следующая схема: $K_{SDSS} = r_{pet} - (r - K)$, где r_{pet} — петросьяновская звездная величина галактики в фильтре r , а $r - K$ определяется по формуле

$$r - K = 1.115 + 0.94(u - r) - 0.165(u - r)^2 + 0.00851(u - r)^3 + 4.92z - 9.1z^2, \quad (2)$$

где z — красное смещение галактики. Кроме того, в цвет ($r - K$) вводились поправки, которые равны $0.496 - 0.154R_{50}^z$ для галактик ранних типов ($u - r > 2.22$) и $0.107 - 0.045R_{50}^z$ для галактик поздних типов ($u - r \leq 2.22$), где R_{50}^z — радиус, ограничивающий область, которая излучает 50% петросьяновского потока в фильтре z . Согласно методу, принятому в работе Graham et al. (2005), мы скорректировали звездные величины Петросьяна до полной величины галактики по формуле:

$$r_{tot} = r_{pet} - 5.1 \times 10^{-4} \exp((R_{90}^r/R_{50}^r)^{1.451}), \quad (3)$$

где R_{90}^r и R_{50}^r — радиусы областей, содержащих 90% и 50% потока Петросьяна в фильтре r . Согласно нашей работе Korylova and Korylov (2009), разница вычисленных звездных величин K_{SDSS} и полных K_{XSC} , полученных из изофотных величин, соответствующих поверхностной яркости $\mu_K = 20 \text{ mag arcsec}^{-2}$, составила $0^m12 \pm 0^m02$. При вычислениях K_{SDSS} мы учли эту поправку. Кроме того, средняя ошибка изофотной величины галактики из каталога протяженных объектов для исследуемых скоплений равна 0^m1 .

Полнота нашей выборки определяется полнотой спектральных данных каталога SDSS. При соблюдении условий $r_{pet} < 17^m77$ и $\mu_r < 24.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ (петросьяновская звездная величина галактики в фильтре r , исправленная за поглощение в Галактике, и петросьяновская средняя поверхностная яркость, соответствующая эффективному радиусу) полнота SDSS-данных оценивается как 99% (Strauss et al., 2002), а для ярких галактик — 95%. Мы добавили из NED отсутствующие в SDSS-измерения лучевых скоростей ярких галактик (от 1 до 5 для разных скоплений).

Светимость системы галактик $L_{200,K}$ равна сумме светимостей галактик в фильтре K до фиксированной абсолютной величины. В качестве этого предела мы приняли величину -21^m . Сначала мы перевели наблюдаемые звездные величины галактик в абсолютные по формуле:

$$M_K = K - 25 - 5 \lg(D_l/1 \text{ Мпк}) - A_K - K(z), \quad (4)$$

где D_l — расстояние до галактики для вычисления светимости, A_K — поглощение в Галактике, $K(z) = -6 \lg(1 + z)$ (K -поправка, согласно Kochanek et al. (2001)). Поправку за эволюцию светимости мы не учитывали, поскольку диапазон изменения красных смещений в нашей выборке небольшой. Поглощение в Галактике, полученное нами из NED, для изучаемых скоплений галактик меньше 0^m01 . Каталог 2MASS (XSC) не является глубоким обзором (фотометрический предел с полнотой выше 90% равен 13^m5 в фильтре K (Jarrett

³⁾<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>

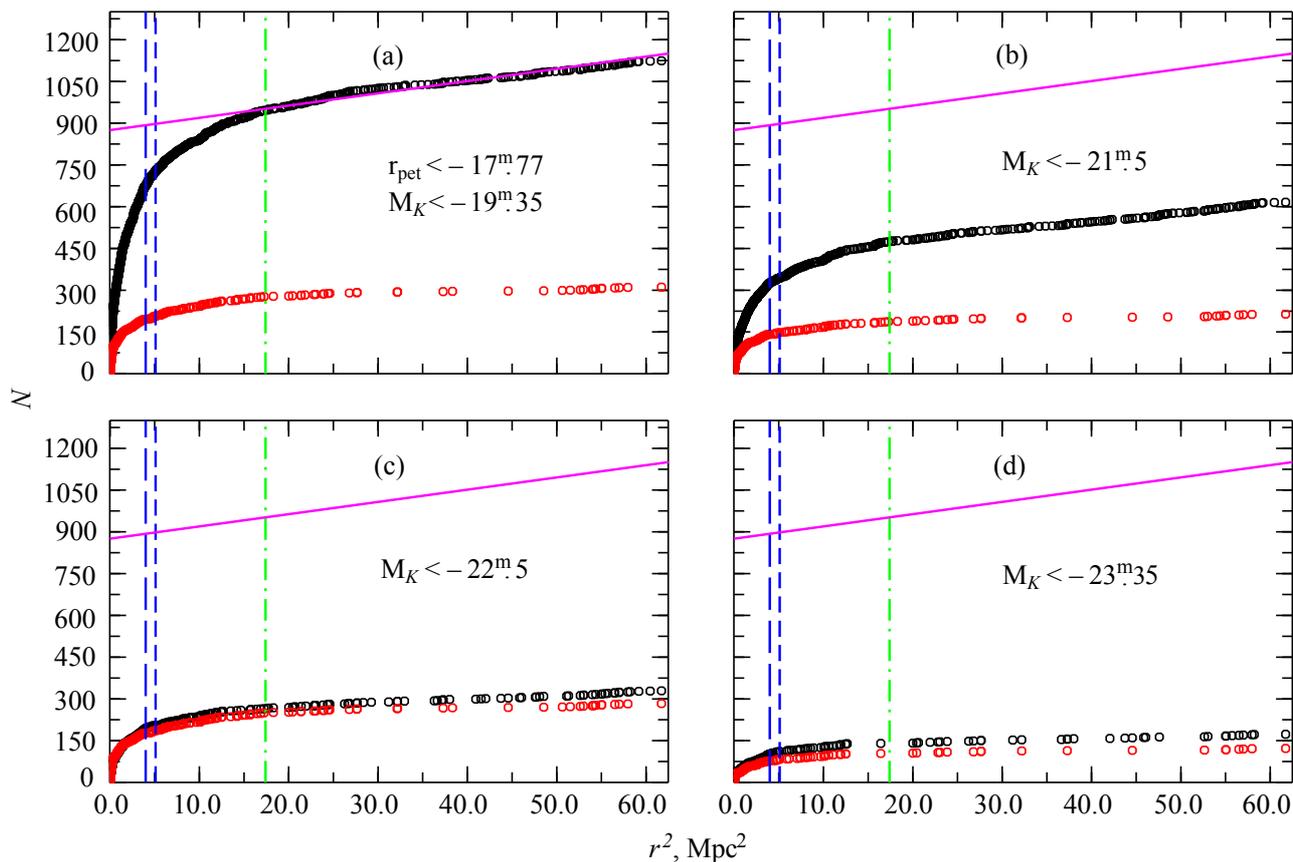


Рис. 2. Интегральное распределение количества галактик в скоплении A 1656 в зависимости от квадрата расстояния от центра ($R < 3.5R_{200}$) в мегапарсеках (верхняя кривая). Нижняя кривая соответствует галактикам ранних типов. Вертикальными линиями показаны: короткими и синими штрихами — соответственно радиусы R_{200} и R_c , зеленой штрихпунктирной линией — радиус R_{sp} . На панели (a) приведены все галактики, извлекаемые из каталога SDSS ($r_{\text{pet}} < -17^{\text{m}}.77$, $M_K < -19^{\text{m}}.35$). На панелях (b)–(d) показаны галактики, соответствующие светимостям: $M_K < -21^{\text{m}}.5$, $M_K < -22^{\text{m}}.5$ и $M_K < -23^{\text{m}}.35$ соответственно.

et al., 2000). Мы дополнили этот каталог галактиками SDSS-каталога при выполнении условия $r_{\text{pet}} < 17^{\text{m}}.77$. Учитывая, что цвет ($r - K$) галактик ранних типов, составляющих в пределах R_{200} большинство, равен в среднем $2^{\text{m}}.8$, предел нашей выборки галактик с индивидуальными оценками величин находится в полосе $K \sim 15^{\text{m}}$.

Определение полной светимости скопления галактик с помощью функции светимости (ФС) в пределах выбранного радиуса состоит из двух этапов, подробно описанных в Korylova and Korylov (2009): сначала ФС нормируется на наблюдаемое число галактик, затем экстраполируется в область слабых звездных величин до выбранного предела. При этом обычно используются параметры функции Шехтера (M_K^* — характеристическая величина и α — наклон) или поля, или они определяются для составной ФС исследуемой выборки.

Мы применили второй метод и нашли параметры функции Шехтера составной ФС для

части нашей выборки — сверхскоплений галактик Leo и Hercules (Korylova and Korylov, 2013). С этой целью для каждого скопления были сделаны подсчеты галактик в интервалах, равных $0^{\text{m}}.5$. Затем построены составные функции светимости для вириализованных областей скоплений галактик сверхскоплений Hercules и Leo по методу, описанному в работе Colless (1989). Полученные составные ФС были аппроксимированы нелинейным методом наименьших квадратов функцией Шехтера в интервале $[-26^{\text{m}}.0, -21^{\text{m}}.5]$ (Schechter, 1976) с параметрами $M_K^* = -24^{\text{m}}.99 \pm 0^{\text{m}}.27$, $\alpha = -1.23 \pm 0.08$ для Her и $M_K^* = -24^{\text{m}}.90 \pm 0^{\text{m}}.30$, $\alpha = -1.14 \pm 0.11$ для Leo (Korylova and Korylov, 2013). В среднем для обоих сверхскоплений мы получили $M_K^* = -24^{\text{m}}.97 \pm 0^{\text{m}}.30$, $\alpha = -1.19 \pm 0.10$, и эти параметры мы использовали для нахождения полной светимости скоплений галактик. Поскольку в нашей выборке есть далекие скопления галактик, полную светимость для скоплений с $z > 0.035$

мы нашли как сумму светимостей всех наблюдаемых галактик и к ней прибавили добавку (до $M_K = -21^m$), полученную по составной функции светимости скоплений галактик методом, описанным в Korylova and Korylov (2013).

Таким образом, для галактик, содержащихся в пределах найденного эффективного радиуса систем (радиуса, в пределах которого содержится половина галактик, обнаруженных в пределах R_{sp}) мы измерили полную K -светимость с поправкой по stacked ФС до предела $M_K = -21^m$ и умножили ее на 2, чтобы найти полную светимость скоплений галактик, $\lg L_K$.

4. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПЛОСКОСТЬ ГРУПП, СКОПЛЕНИЙ И СВЕРХСКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Для того чтобы можно было сравнить полученные результаты по построению ФП скоплений с результатами других авторов (например, Schaeffer et al., 1993), мы взяли $\lg L_K$, $\lg R_e$, $\lg \sigma$ и нашли регрессионное соотношение относительно $\lg L_K$. В нашем исследовании $\lg L_K$ — полная светимость групп и скоплений галактик в фильтре K ($M_K = -21^m$) в светимостях Солнца L_\odot , $\lg R_e$ — эффективный радиус систем в кпк, в пределах которого содержится половина галактик от общего числа ($N/2$), найденного по описанному ранее профилю. Известно, что поверхностную яркость в таком случае измеряют в светимостях L_\odot с площади в 1 пк^2 или кпк^2 .

В светимости групп/скоплений галактик введена поправка за эволюцию светимости в фильтре K , равная $0.8z$ (Bell et al., 2003). В отличие от ФП галактик ранних типов, где рассматривается центральная дисперсия лучевых скоростей звезд, для скоплений и групп галактик лучше брать дисперсию лучевых скоростей галактик в пределах вириализованной области (в нашем случае мы взяли σ_{200} в пределах R_{200}) как наиболее точную, поскольку точность зависит от числа используемых галактик.

На рис. 3 показана ФП всей нашей выборки из 172 групп и скоплений галактик и отдельно члены каждого сверхскопления галактик выделены большими кругами. Красные кружки соответствуют группам галактик, синие — скоплениям галактик. Линией показано регрессионное соотношение, полученное по скоплениям галактик с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$. Оно имеет вид:

$$\begin{aligned} \lg L_K = & 0.77(\pm 0.09) \lg R_e + 1.41(\pm 0.12) \lg \sigma \\ & + 6.69(\pm 0.11). \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая, что средняя поверхностная яркость в пределах эффективного радиуса, измеренного в килопарсеках, $\langle I_e \rangle = L_K / (2\pi R_e^2)$, получаем

$$\begin{aligned} \lg R_e = & 1.14(\pm 0.10) \lg \sigma - 0.81(\pm 0.02) \lg \langle I_e \rangle \\ & + 4.78(\pm 0.09). \end{aligned} \quad (6)$$

В расширяющейся Вселенной $I \propto (1+z)^{-4}$, где z — красное смещение объекта. Если мы внесем эту поправку в поверхностную яркость и сделаем регрессию относительно $\lg R_e$, получим следующее регрессионное соотношение:

$$\begin{aligned} \lg R_e = & 0.98(\pm 0.06) \lg \sigma - 0.56(\pm 0.04) \lg \langle I_e \rangle \\ & + 3.57(\pm 0.07). \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 4 это соотношение относительно большой оси $\lg R_e$ приведено для всей выборки, на фоне которой каждое сверхскопление галактик показано большими кругами. Соотношение (7) имеет меньший разброс и подходит для измерения относительных расстояний систем галактик, если $\lg R_e$ измеряется в угловых секундах.

Построенная нами ФП (рис. 3) в пределах ошибок согласуется с результатами работ Schaeffer (1993) и D'Onofrio et al. (2013), в которых применены другие методы определения эффективного радиуса систем галактик R_e : либо вписыванием профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости (светимости), либо с использованием других профилей (например, Наббла, Кинга). Надо отметить, что сверхскопления галактик как целое не являются вириализованными структурами, но состоят из вириализованных групп и скоплений галактик, поэтому можно говорить о ФП членов сверхскоплений галактик. Общие соотношения для всей выборки и отдельно для каждого сверхскопления галактик приведены в таблице 1, где римскими цифрами показаны: I — ФП из уравнения (5); II — ФП из уравнения (6); III — ФП из уравнения (7). В таблице 1 также приведены коэффициенты зависимости для полной выборки ($N = 172$).

Если рассматривать ФП каждого сверхскопления более детально (рис. 3), можно отметить, что некоторые системы отклоняются от общей зависимости для сверхскопления. Например, скопление A 1831B (рис. 3d) отклоняется от общей зависимости для сверхскопления Bootes. Как было нами показано в работе Korylov and Korylova (2010), скопление A 1831B имеет динамическую массу (дисперсию скорости), видимо, соответствующую такой стадии эволюции, когда произошло слияние более мелких субкомпонент почти строго по лучу зрения, но полной релаксации еще не наступило.

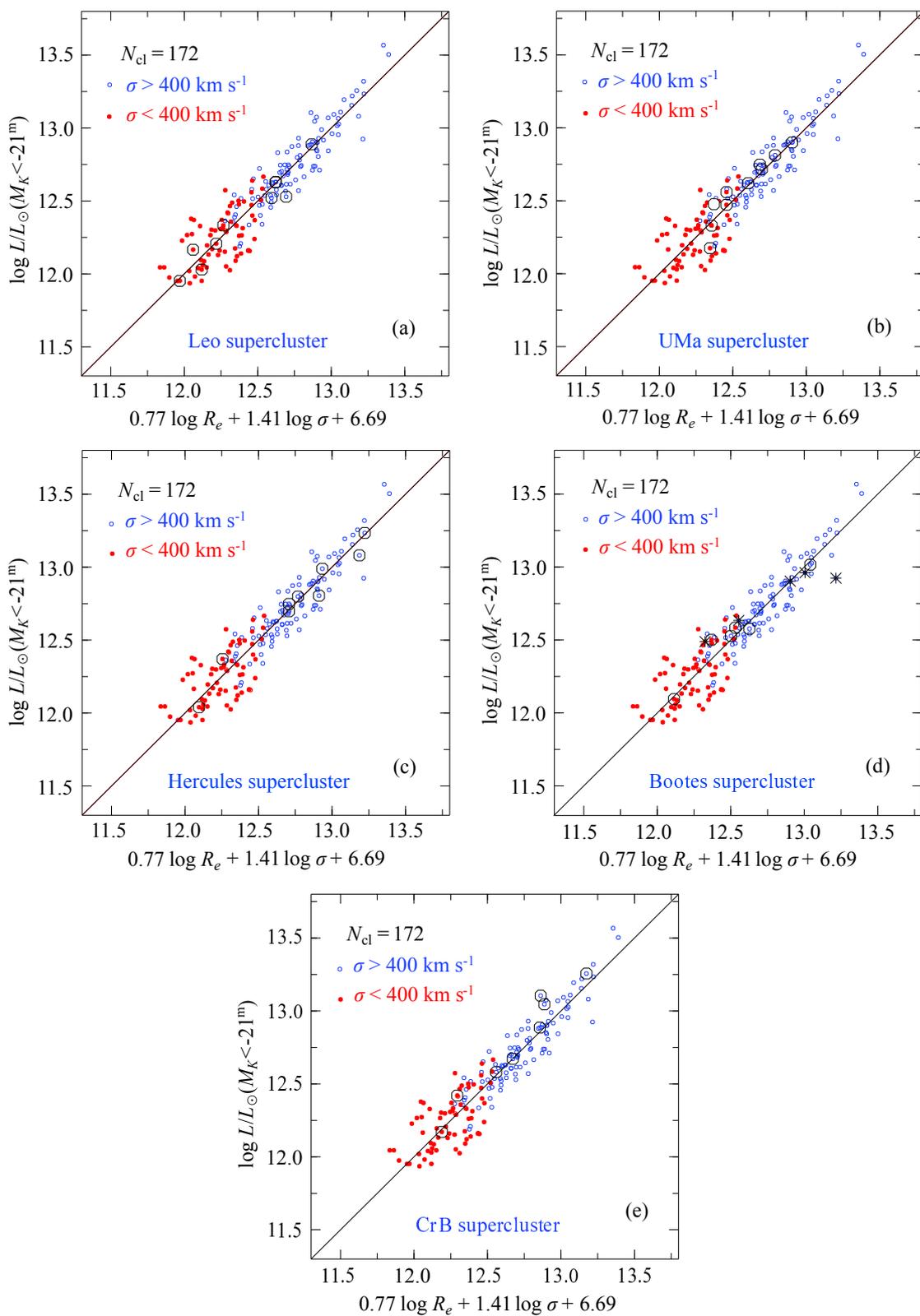


Рис. 3. Фундаментальная плоскость 172 групп и скопления галактик в ИК-области. Члены сверхскопления галактик Leo, Ursa Major, Hercules, Bootes, Сигна Вегалис обведены большими кружками и показаны на панелях (a)–(e) соответственно. В системе Bootes перечеркнутыми крестами показаны скопления галактик с $z = 0.076$, а пустыми кружками — с $z = 0.064$. Линия соответствует регрессионному соотношению $L_K \propto R_e^{0.77 \pm 0.09} \sigma^{1.41 \pm 0.12}$.

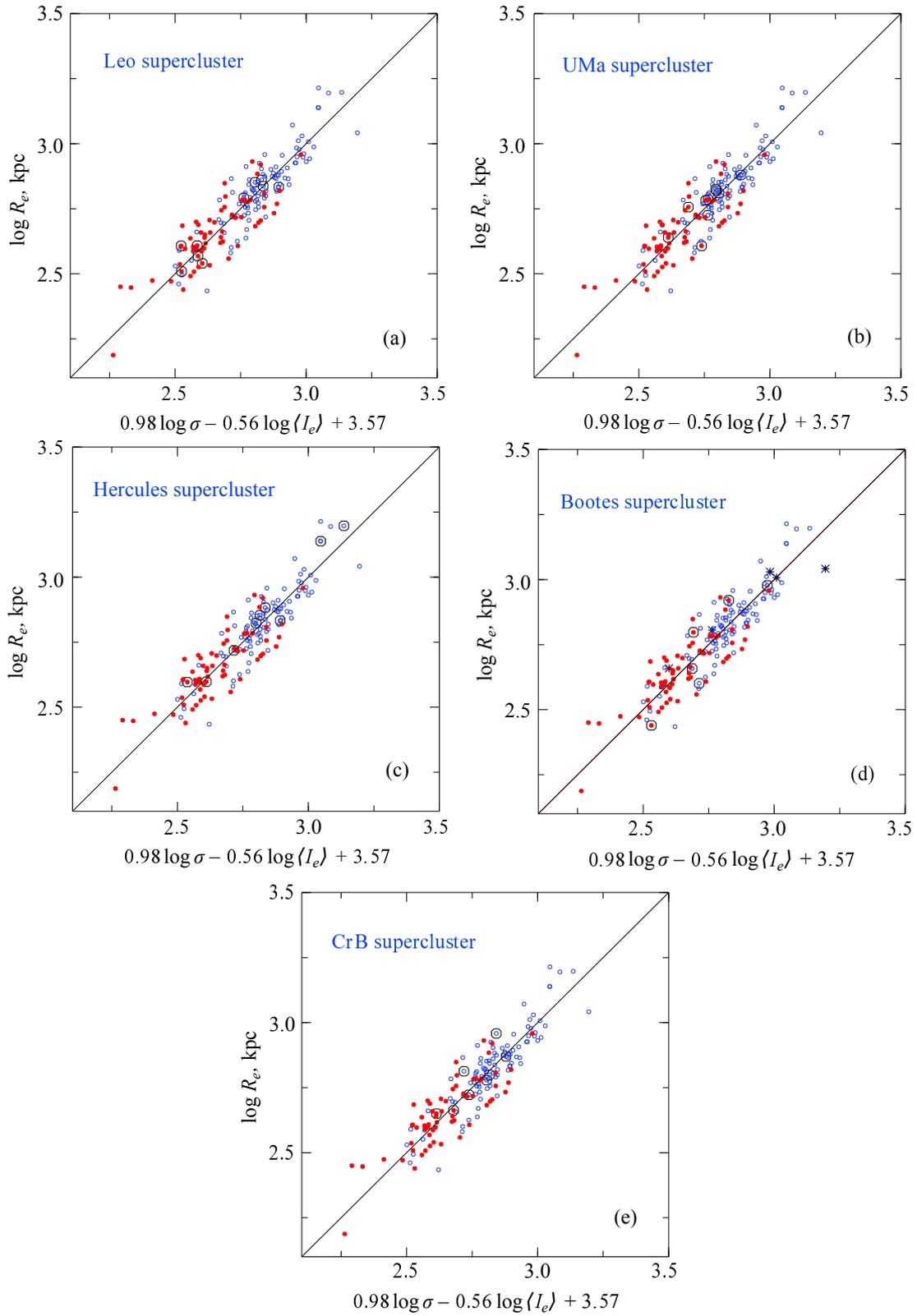


Рис. 4. Фундаментальная плоскость 172 групп и скоплений галактик в ИК-области вдоль длинной оси, $\lg R_e$. Члены сверхскоплений галактик Leo, Ursa Major, Hercules, Bootes, Corona Borealis обведены большими кружками и показаны на панелях (a)–(e) соответственно. Линия соответствует регрессионному соотношению $R_e \propto \sigma^{0.98 \pm 0.06} \langle I_e \rangle^{-0.56 \pm 0.04}$.

Таблица 1. Параметры соотношений

Relation	a	b	Normalization	Scatter
$N = 101, \sigma > 400 \text{ km s}^{-1}$				
I $L_K/L_\odot = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	0.77 ± 0.09	1.41 ± 0.12	6.69	0.11
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.14 ± 0.10	-0.81 ± 0.02	4.78	0.09
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.98 ± 0.06	-0.56 ± 0.04	3.57	0.07
$N = 172$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	0.64 ± 0.08	1.45 ± 0.08	6.95	0.13
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.06 ± 0.06	-0.73 ± 0.01	4.42	0.09
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.90 ± 0.04	-0.48 ± 0.03	3.32	0.07
Leo Supercluster, $\langle z_h \rangle = 0.034, N = 10$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	0.83 ± 0.45	1.20 ± 0.44	7.04	0.08
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.03 ± 0.38	-0.86 ± 0.07	5.35	0.07
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.96 ± 0.12	-0.42 ± 0.16	2.80	0.05
Hercules Supercluster, $\langle z_h \rangle = 0.031, N = 9$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	0.55 ± 0.22	1.53 ± 0.27	6.98	0.08
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.05 ± 0.18	-0.69 ± 0.04	4.26	0.07
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.04 ± 0.10	-0.62 ± 0.09	3.80	0.05
Ursa Major Supercluster, $\langle z_h \rangle = 0.055, N = 11$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	1.06 ± 0.38	1.37 ± 0.28	5.99	0.08
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.46 ± 0.30	-1.07 ± 0.12	5.54	0.09
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.71 ± 0.28	-0.30 ± 0.17	2.71	0.07
Bootes Supercluster, $\langle z_h \rangle = 0.071, N = 11$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	0.88 ± 0.15	0.73 ± 0.19	8.22	0.08
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.65 ± 0.17	-0.89 ± 0.04	6.61	0.07
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.65 ± 0.12	-0.77 ± 0.10	5.74	0.06
Corona Borealis Supercluster, $\langle z_h \rangle = 0.072, N = 8$				
I $L_K = a \lg R_e + b \lg \sigma + c$	1.09 ± 0.54	1.43 ± 0.30	5.79	0.10
II $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	1.55 ± 0.32	-1.10 ± 0.09	6.49	0.11
III $\lg R_e(\text{kpc}) = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c$	0.88 ± 0.30	-0.43 ± 0.25	3.09	0.06

I — ФП из уравнения (5); II — ФП из уравнения (6); III — ФП из уравнения (7).

На рис. 5 приведена ФП групп и скоплений галактик вместе с ФП галактик ранних типов. Для этого мы L_K -светимости систем галактик с учетом цвета ($r - K$) ~ 3 перевели в светимости в r -фильтре (SDSS) — L_r . Мы взяли округленное значение цвета ($(r_{\text{pet}} - \text{extinc}) - K$), вычисленное для нашей выборки: средний цвет систем изменяется в интервале [2.5–3.0]. Галактики ранних типов извлечены из каталога SDSS (DR8) при определении пекулярных скоростей в сверхскоплениях.

Описание способа извлечения и результаты, полученные для сверхскоплений галактик, опубликованы в работах Корулова and Корулов (2014; 2017). ФП 2111 галактик ранних типов определена, как и для скоплений галактик, регрессией относительно L_r . Можно отметить, что формы ФП и галактик, и систем галактик хорошо согласуются друг с другом, как и было получено нами ранее для 94 систем галактик в работе Корулова and Корулов (2016). Нуль-пункт ФП групп и скоплений галак-

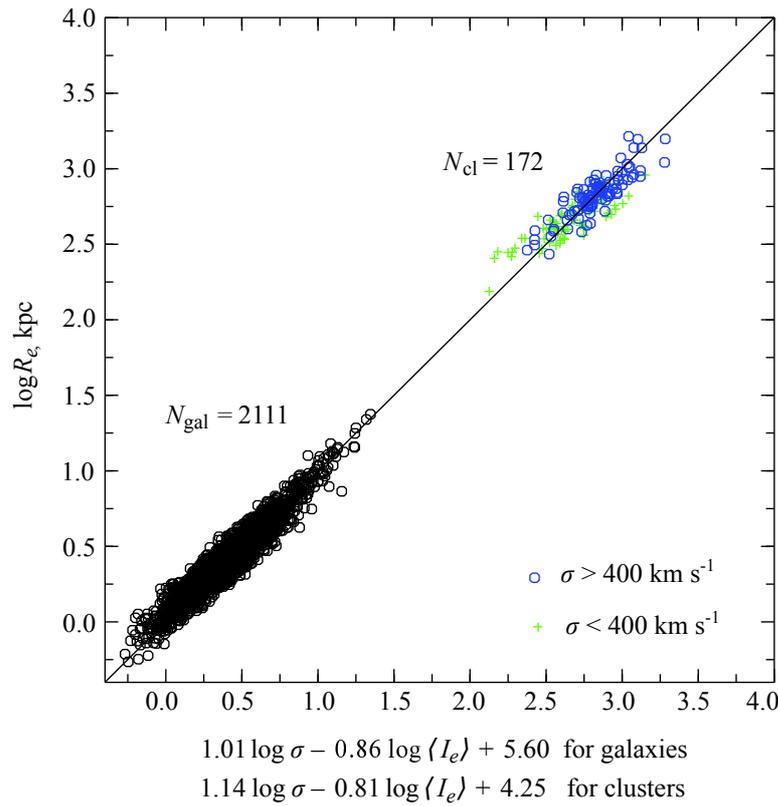


Рис. 5. Фундаментальная плоскость галактик и систем галактик вдоль длинной оси, $\lg R_e$. Синими пустыми кружками показаны системы галактик с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$, зелеными крестами — с $\sigma \leq 400 \text{ км с}^{-1}$.

тик возрастает, если учесть отношение массы к светимости в качестве четвертого параметра, как это показано в работе Korylova and Korylov (2016).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ И ПЕКУЛЯРНЫХ СКОРОСТЕЙ СИСТЕМ ГАЛАКТИК С ПОМОЩЬЮ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Если радиус $\lg R_e$, наблюдаемая величина, измерен в угловых секундах, то нуль-пункт ФП

$$\gamma = \lg R_e - 0.98(\pm 0.06) \lg \sigma + 0.56(\pm 0.04) \lg \langle I_e \rangle \quad (8)$$

изменяется с расстоянием систем галактик. На рис. 6 приведены полученные индивидуальные наблюдаемые расстояния (нуль-пункты) групп и скоплений галактик. Зелеными крестами помечены скопления галактик с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$ из сверхскоплений галактик СгВ и Воо, синими крестами — из сверхскоплений галактик Лео и Нег. Жирной линией показана ожидаемая хаббловская зависимость между лучевой скоростью и расстоянием, рассчитанная нами при построении ФП галактик ранних типов (Korylova

and Korylov, 2017) и смещенная на разницу нуль-пунктов. При этом сопутствующее расстояние

$$D \approx \frac{cz}{H_0} \left(1 - \frac{z(1-q_0)}{2} \right) \approx \frac{cz}{H_0} (1 - 0.225z)$$

(аппроксимация Пибблса (Peebles, 1993)), угловое расстояние в этом случае

$$D \approx \frac{cz}{H_0} \left(\frac{1 - 0.225z}{1+z} \right)$$

Поскольку поверхностная яркость скоплений галактик определена нами с площади, измеренной в квадратных килопарсеках, а не в квадратных угловых секундах, как в галактиках, ожидаемая хаббловская зависимость смещена на величину разницы нуль-пунктов. Также нами учтена поправка за космологическое ослабление поверхностной яркости $\lg \langle I_e \rangle$ скоплений галактик $-4 \lg(1+z)$. Логарифмическое rms рассеяние γ равно 0.07 ($N = 172$, таблица 1), что соответствует 16-процентной ошибке определения расстояния одного скопления. Отклонения от Хаббловской зависимости (рис. 6) имеют разброс также 0.07 для скоплений галактик с $\sigma > 400 \text{ км с}^{-1}$, для групп галактик — 0.117. По скоплениям галактик можно

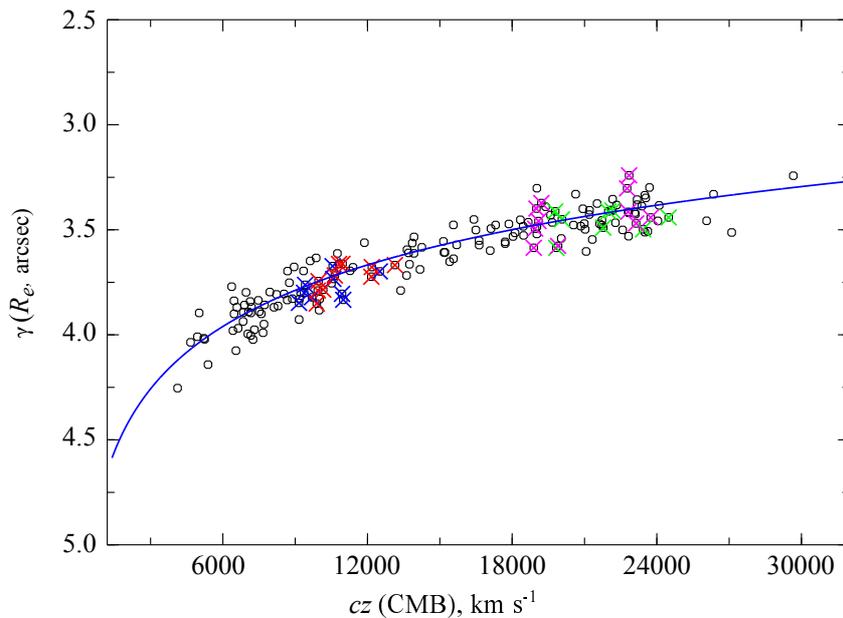


Рис. 6. Зависимость индивидуальных расстояний в угловых секундах, нуль-пунктов фундаментальной плоскости γ от лучевой скорости систем галактик cz (СМВ). Пустые кружки соответствуют 172 системам галактик. Зелеными крестами помечены члены сверхскопления CrV, пурпурными — члены сверхскопления Bootes, синими крестами показаны члены сверхскопления Hercules, красными — члены сверхскопления Leo. Жирная синяя кривая линия соответствует Хаббловской зависимости между лучевой скоростью и расстоянием для модели с космологическими параметрами: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70$ км с $^{-1}$ Мпк $^{-1}$.

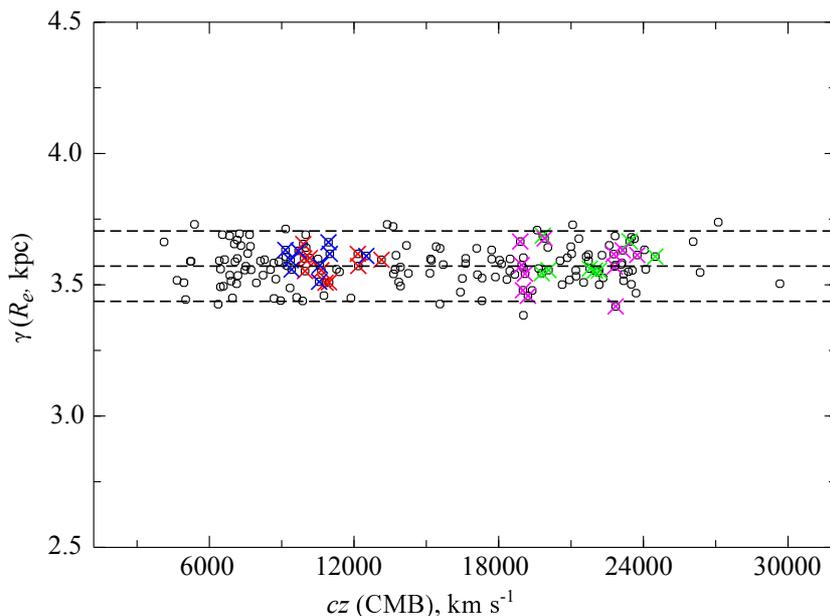


Рис. 7. Зависимость индивидуальных расстояний систем галактик (в кпк) в сопутствующей системе, для принятой нами модели, от лучевой скорости систем галактик cz (СМВ). Пустые кружки соответствуют 172 системам галактик. Зелеными и пурпурными крестами отмечены члены сверхскопления CrV и Bootes, синими и красными крестами — члены сверхскопления Hercules и Leo.

определить отклонение принятой нами постоянной Хаббла в 16% (примерно ± 11 км с $^{-1}$ Мпк $^{-1}$).

На рис. 7 показаны те же системы галактик в сопутствующей системе координат, где относительные расстояния $\lg R_e$ пересчитаны в килопарсеки, согласно принятой нами модели. На практике

различие между нуль-пунктом γ_{cl} скопления и общим средним нуль-пунктом $\langle \gamma \rangle$ используется для вычисления фотометрических красных смещений:

$$z_{FP} = z_{CMB} \times 10^{(\langle \gamma \rangle - \gamma_{cl})}. \quad (9)$$

Тогда пекулярные скорости скоплений галактик

в сопутствующей системе равны разнице между спектроскопическим и фотометрическим красными смещениями:

$$V_{\text{pec}} = c(z_{\text{СМВ}} - z_{\text{ФР}})/(1 + z_{\text{ФР}}). \quad (10)$$

Нами получены следующие пекулярные скорости сверхскоплений галактик: CrB ($N = 8$), Bootes ($N = 11$), UMa ($N = 11$), Her ($N = 9$) и Leo ($N = 10$): $V_{\text{pec}} = +740 \pm 890$ км с⁻¹, $V_{\text{pec}} = -340 \pm 1200$ км с⁻¹, $V_{\text{pec}} = -600 \pm 830$ км с⁻¹, $V_{\text{pec}} = +530 \pm 350$ км с⁻¹, $V_{\text{pec}} = +44 \pm 360$ км с⁻¹ соответственно. Средняя пекулярная скорость сверхскоплений галактик относительно СМВ — $V_{\text{pec}} = +75 \pm 360$ км с⁻¹. Из чего можно сделать вывод о том, что пекулярные движения таких гигантских структур незначительны, практически не превышают ошибок измерений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наша выборка, состоящая из 172 систем галактик, имеет красные смещения $0.012 < z < 0.090$, из них 71 группа галактик имеют дисперсии лучевых скоростей $\sigma \leq 400$ км с⁻¹, остальные, 101 система, являются скоплениями галактик с $\sigma > 400$ км с⁻¹. В данной работе мы наблюдательно определили splashback-радиус (границу темного гало) скоплений и групп галактик (радиус R_{sp}) и измерили эффективный радиус R_e , в пределах которого наблюдается $N/2$ галактик, по наблюдаемому интегральному распределению числа галактик от квадрата расстояния от центра (рис. 1с). В работе также показано, что полученные таким образом соотношения между характеристиками систем галактик (фундаментальные плоскости) согласуются с результатами других авторов, использующих иные методы (Schaeffer et al., 1993; Adami et al., 1998; D’Onofrio et al., 2013).

Основные результаты нашего исследования:

1. Общая фундаментальная плоскость групп и скоплений галактик в фильтре K имеет вид: $L_K = R_e^{0.64 \pm 0.08} \sigma^{1.45 \pm 0.06}$ с $rms = 0.13$. Если взять только системы галактик с $\sigma > 400$ км с⁻¹, то получим $L_K = R_e^{0.77 \pm 0.09} \sigma^{1.41 \pm 0.12}$ с меньшим разбросом $rms = 0.11$.

2. Впервые построены фундаментальные плоскости членов 5 сверхскоплений галактик: Leo, Hercules, Ursa Major, Bootes, Corona Borealis, формы которых в пределах ошибок согласуются друг с другом и с общей ФП 172 систем галактик. Нуль-пункты ФП систем скоплений отличаются, но на определяемые пекулярные скорости этот факт не влияет из-за их больших ошибок.

3. Впервые определены относительные расстояния групп/скоплений галактик по их фундаментальной плоскости. Для сверхскоплений

галактик Corona Borealis, Bootes, Ursa Major, Hercules и Leo мы получили следующие оценки пекулярных скоростей $V_{\text{pec}} : +740 \pm 890$ км с⁻¹, -340 ± 950 км с⁻¹, -600 ± 830 км с⁻¹, $+530 \pm 350$ км с⁻¹, $+44 \pm 360$ км с⁻¹. Средняя пекулярная скорость сверхскоплений галактик относительно СМВ равна $+75 \pm 360$ км с⁻¹. Можно заключить, что пекулярные движения рассмотренных сверхскоплений незначительны, практически не превышают ошибок измерений.

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/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Adami, A. Mazure, A. Biviano, et al., *Astron. and Astrophys.* **331**, 493 (1998).
2. S. Adhikari, N. Dalal, and R. T. Chamberlain, *Journal Cosmology and Astroparticle Physics* **2014** (11), 019 (2014). DOI:10.1088/1475-7516/2014/11/019
3. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193** (2), article id. 29 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/193/2/29
4. M. Batista and D. J. Batuski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436** (4), 3331 (2013). DOI:1310.0429
5. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149** (2), 289 (2003). DOI:10.1086/378847
6. M. Bernardi, R. K. Sheth, J. Annis, et al., *Astron. J.* **125** (4), 1866 (2003). DOI:10.1086/367794
7. J. P. Blakeslee, J. R. Lucey, J. L. Tonry, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **330** (2), 443 (2002). DOI:10.1046/j.1365-8711.2002.05080.x
8. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J.* **485** (1), L13 (1997). DOI:10.1086/310801
9. C. Chiosi, M. D’Onofrio, E. Merlin, et al., *Astron. and Astrophys.* **643**, id. A136 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038773

10. M. Colless, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **237**, 799 (1989). DOI:10.1093/mnras/237.3.799
11. M. Colless, R. P. Saglia, D. Burstein, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **321** (2), 277 (2001). DOI:10.1046/j.1365-8711.2001.04044.x
12. G. de Vaucouleurs and J. Page, *Astrophys. J.* **136**, 107 (1962). DOI:10.1086/147355
13. B. Diemer and A. V. Kravtsov, *Astrophys. J.* **789** (1), article id. 1 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/789/1/1
14. S. Djorgovski and M. Davis, *Astrophys. J.* **313**, 59 (1987). DOI:10.1086/164948
15. M. D'Onofrio, D. Bettoni, D. Bindoni, et al., *Astronomische Nachrichten* **334** (4–5), 373 (2013). DOI:10.1002/asna.201211860
16. M. D'Onofrio, C. Chiosi, M. Sciaratta, and P. Marziani, *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A94 (2020). DOI:1907.09367
17. M. D'Onofrio, M. Sciaratta, S. Cariddi, et al., *Astrophys. J.* **875** (2), article id. 103 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab1134
18. A. Dressler, D. Lynden-Bell, D. Burstein, et al., *Astrophys. J.* **313**, 42 (1987). DOI:10.1086/164947
19. A. W. Graham, S. P. Driver, V. Petrosian, et al., *Astron. J.* **130**(4), 1535 (2005). DOI:10.1086/444475
20. M. J. Hudson, R. J. Smith, J. R. Lucey, and E. Branchini, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **352** (1), 61 (2004). DOI:10.1046/j.1365-8711.2002.05080.x
21. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119** (5), 2498 (2000). DOI:10.1086/301330
22. I. Jorgensen, M. Franx, and P. Kjaergaard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280** (1), 167 (1996). DOI:10.1093/mnras/280.1.167
23. C. S. Kochanek, M. A. Pahre, E. E. Falco, et al., *Astrophys. J.* **560** (2), 566 (2001). DOI:10.1086/322488
24. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **65** (3), 205 (2010). DOI:10.1134/S1990341310030016
25. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **33** (4), 211 (2007). DOI:10.1134/S1063773707040019
26. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64** (1), 1 (2009). DOI:10.1134/S1990341309010015
27. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **37** (4), 219 (2011). DOI:10.1134/S1063773711030029
28. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39** (1), 1 (2013). DOI:10.1134/S1063773712120043
29. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **40**, 595 (2014). DOI:10.1134/S106377371410003X
30. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 123 (2015). DOI:10.1134/S1990341315020017
31. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 257 (2016). DOI:10.1134/S1990341316030019
32. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 363 (2017). DOI:10.1134/S1990341317040010
33. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **32** (2), 105 (2021).
34. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 347 (2022). DOI:10.1134/S199034132204006X
35. Y.-T. Lin, J. J. Mohr, and S. A. Stanford, *Astrophys. J.* **610** (2), 745 (2004). DOI:10.1086/421714
36. J. J. Mohr and G. Wegner, *Astron. J.* **114**, 25 (1997). DOI:10.1086/118448
37. T. Mutabazi, *Astrophys. J.* **911** (1), id. 16 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/abe7f1
38. M. Obrić, Ž. Ivezić, P. N. Best, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **370** (4), 1677 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10675.x
39. A. L. O'Mill, D. Proust, H. V. Capelato, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (1), 868 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1650
40. M. A. Pahre, S. G. Djorgovski, and R. R. de Carvalho, *Astron. J.* **116** (4), 1591 (1998). DOI:10.1086/300544
41. P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton, Princeton University Press, 1993). DOI:10.1515/9780691206721
42. B. M. Poggianti, V. Desai, R. Finn, et al., *Astrophys. J.* **684** (2), 888 (2008). DOI:10.1086/589936
43. M. Ramella, W. Boschin, M. J. Geller, et al., *Astron. J.* **128** (5), 2022 (2004). DOI:10.1086/424862
44. C. Saulder, S. Mieske, W. W. Zeilinger, and I. Chilingarian, *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A21 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201321466
45. R. Schaeffer, S. Maurogordato, A. Cappi, and F. Bernardeau, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **263**, L21 (1993). DOI:10.1093/mnras/263.1.L21
46. P. Schechter, *Astrophys. J.* **203**, 297 (1976). DOI:10.1086/154079
47. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124** (3), 1810 (2002). DOI:10.1086/342343

Fundamental Plane of Groups and Clusters of Galaxies: Distances and Peculiar Velocities of Superclusters of Galaxies on Small Scales

F. G. Kopylova¹ and A. I. Kopylov¹

¹Special Astrophysical Observatory, RAS, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

This work is a continuation of the work of Kopylova and Kopylov (2016) on constructing the fundamental plane (FP) of groups and clusters of galaxies. In this article, the sample of galaxy systems is increased from 94 to 172 objects. We have studied the relationships between the main characteristics of groups and clusters of galaxies using archival data from the SDSS, 2MASX and NED catalogs. The measured parameters ($\log L_K$, $\log R_e$ and $\log \sigma$) of galaxy clusters define the fundamental plane in the near-infrared region: $L_K \propto R_e^{0.77 \pm 0.09} \sigma^{1.44 \pm 0.12}$. The shape of the FP of groups and clusters is consistent with the FP of early-type galaxies (SDSS, r -filter), determined in the same way. Regression against $\log R_e$ in kpc gives the projection of the FP— $\log R_e = 0.98(\pm 0.06) \log \sigma - 0.56(\pm 0.04) \langle \log I_e \rangle + 3.57(\pm 0.07)$, which can be used to determine the distances of galaxy systems. The *rms* scatter of the zero point is 0.07, which is equivalent to a 16% error in determining the distance to a group or cluster of galaxies. For the first time, we have determined using FP the average relative distances and peculiar velocities of five large superclusters of galaxies. According to our estimates, the average peculiar velocity of superclusters of galaxies relative to the CMB is $+75 \pm 360 \text{ km s}^{-1}$.

Keywords: *galaxies: groups and clusters: galaxies: fundamental parameters: galaxies: distances and redshifts: clusters: individual (Hercules, Leo, Ursa Major, Bootes, Corona Borealis Superclusters)—cosmology: large-scale structure of the Universe*