

УДК 524.77-14

РАССТОЯНИЯ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК, ИЗМЕРЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

© 2025 Ф. Г. Қопылова^{1*}, А. И. Қопылов¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 30 мая 2025 года; после доработки 22 августа 2025 года; принята к публикации 3 сентября 2025 года

В настоящей работе нами продолжены исследования по построению оптимальной фундаментальной плоскости (ФП) групп и скоплений галактик с целью измерения их расстояний. Работа выполнена с использованием архивных данных каталогов SDSS и 2MASX. Мы представляем фундаментальные плоскости (масштабные соотношения динамических и фотометрических параметров) 205 групп и скоплений галактик ($z < 0.15$). Нами установлено, что в ближней инфракрасной области (K -фильтр) распределение скоплений галактик хорошо аппроксимируется трехпараметрическими плоскостями вида $R_e \propto \sigma^{1.01 \pm 0.05} \langle I_e \rangle^{-0.32 \pm 0.03}$ и $R_e \propto N^{0.43 \pm 0.01} \langle I_e \rangle^{-0.40 \pm 0.02}$ и четырехпараметрической плоскостью вида $R_e \propto \sigma^{0.15 \pm 0.06} \langle I_e \rangle^{-0.39 \pm 0.02} N^{0.38 \pm 0.02}$. Фундаментальные плоскости имеют логарифмические стандартные отклонения 0.060, 0.036 и 0.035. Если использовать ФП для измерения расстояний систем галактик, эти отклонения соответствуют 14% и 8% ошибкам расстояния одного скопления. При использовании четырехпараметрической ФП нами получен разброс постоянной Хаббла $H_0 = 70 \pm 5.6 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. С помощью трех фундаментальных плоскостей скоплений галактик найдено, что скорость среднего сносового движения в системе трехградусного космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background, CMB) пяти сверхскоплений галактик из области SDSS составляет $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +241 \pm 180 \text{ км с}^{-1}$.

Ключевые слова: галактики: группы — галактики: скопления — галактики: фундаментальные параметры — галактики: расстояния и красные смещения — космология: крупномасштабная структура Вселенной

1. ВВЕДЕНИЕ

Расстояния, определенные вне зависимости от красного смещения, лежат в основе большей части космологических исследований, и существует множество методов их оценки. Эти методы состоят в получении соотношения между красными смещениями z и расстояниями объектов D , а также в построении диаграммы Хаббла и сравнении с предсказаниями стандартной космологической модели (Λ CDM).

Для далеких объектов, таких как группы и скопления галактик, можно найти относительные расстояния, определив их с помощью угловых диаметров (angular diameter distances, D_A) и светимости (luminosity distances, D_L). Линейный размер в этом случае определяется как $d = \theta D_A$, где θ — угловой размер в радианах. Галактики и скопления галактик находятся в динамическом равновесии и состоят из барионной материи, заключенной в протяженные гало темной материи. Виримальную теорему гравитационно-связанных систем можно выразить

следующим образом (Kormendy and Djorgovski, 1989): $L = SR_d L/MR \sigma^2$, где S — параметр, характеризующий внутреннюю структуру системы, а R_d — параметр, измеряющий степень отклонения системы от вирIALIZEDованного состояния. Фундаментальная плоскость систем галактик, связывающая три оставшихся параметра, для систем в виримальном равновесии имеет вид:

$$L \propto R^\alpha \sigma^\beta, \quad (1)$$

где $\alpha = 1$, $\beta = 2$. Наблюдаемое отклонение этих коэффициентов интерпретируется как изменение параметров $S, R_d, M/L$ от системы к системе (Djorgovski and Davis, 1987; Dressler et al., 1987).

Сначала была построена фундаментальная плоскость галактик ранних типов в скоплениях, которая позволяла измерять их расстояния. Фундаментальную плоскость галактик ранних типов составляют центральная дисперсия лучевых скоростей звезд σ в проекции, эффективный радиус R_e и средняя эффективная поверхность яркость $\langle I_e \rangle$ на радиусе R_e (Djorgovski and Davis, 1987;

*E-mail: flera@sao.ru

Dressler et al., 1987). ФП имеет вид:

$$\lg R_e = a \lg \sigma + b \lg \langle I_e \rangle + \gamma. \quad (2)$$

Коэффициенты a и b характеризуют форму ФП, а γ — нуль-пункт. Поскольку $\lg R_e$ и $\lg \langle I_e \rangle$ определяются светимостью галактик, $\langle I_e \rangle = L/(2\pi R_e^2)$, то $\lg L$, $\lg \sigma$ и $\lg R_e$ также образуют ФП: $L \propto R_e^\alpha \sigma^\beta$. Вириальная теорема применяется ко всей системе в целом, и радиус в уравнении (2) должен охватывать весь объект (Zaritsky, 2012). Однако на практике края галактик трудно измерить, поэтому используется радиус, содержащий половину светимости объекта.

Фундаментальная плоскость скоплений галактик подходит для измерения относительных расстояний систем, поскольку угловой размер (в данном случае радиус R_e) изменяется с расстоянием до объектов. Впервые ФП скоплений галактик была построена Schaeffer et al. (1993) с использованием фотометрических наблюдательных характеристик для выборки из 16 богатых скоплений галактик ($z < 0.2$). Также ФП скоплений были построены по наблюдательным данным, полученным в оптической области (Adami et al., 1998; D'Onofrio et al., 2013), и по излучению газа в рентгеновской области (Fritsch and Buchert, 1999; Fujita and Takahara, 1999; Lanzoni et al., 2004).

В нашей работе Kopylova and Kopylov (2016) мы показали, что при построении совместной ФП групп и скоплений галактик выбор радиуса объекта принципиален. Группами мы считали системы галактик с дисперсией лучевых скоростей в проекции $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$. Было получено, что ярчайшая галактика систем (особенно групп галактик) оказывается слишком яркой, и радиус группы, определенной по половине полной светимости, попадает в ее пределы. Поэтому мы определяли радиус системы, содержащей половину полного числа галактик до выбранного предела, по абсолютной звездной величине. При этом полное число галактик в границах, например, радиуса R_{200} мы измеряли по методике, описанной в Ramella et al. (2004). При построении ФП богатых скоплений галактик можно находить R_e как радиус, содержащий половину полной светимости.

Настоящая работа является продолжением исследований по построению ФП групп и скоплений галактик, выполненных в Kopylova and Kopylov (2016; 2024b). В этих работах в качестве размера скоплений был взят размер темного гало радиусом R_{sp} (splashback) в проекции. В выборке из 172 систем галактик была 71 группа с дисперсией лучевых скоростей $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$ и 101 скопление с $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$. Мы построили ФП с rms-разбросом 0.07, что соответствует 16%-ой ошибке определения расстояния группы или скопле-

ния. В данной работе мы увеличили выборку до 205 систем галактик, из которых 135 являются скоплениями с $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$, 187 имеют зарегистрированное излучение в рентгеновской области. Практически в выборку включены все группы и скопления галактик из области SDSS ($z < 0.1$) с зарегистрированным рентгеновским излучением.

Цель данной работы заключается в построении фундаментальных плоскостей между характеристиками 205 групп и скоплений галактик другими методами, которые могут обеспечить меньший разброс на ФП и, следовательно, повысить точность определения расстояний систем галактик. Работа выполнена нами с привлечением данных каталогов SDSS (Sloan Digital Sky Survey Data Realease 7, 8, Abazajian et al., 2009), 2MASS XSC (Two-Micron ALL-Sky Survey Extended Source Catalog, Jarrett et al., 2000) и NED (NASA Extragalactic Database).

Статья организована следующим образом: в разделе 2 описана процедура построения ФП I, II, III; в разделе 3 приведено сравнение угловых расстояний систем галактик (нуль-пунктов ФП), полученных по ФП галактик разных типов и по ФП систем галактик (данная работа); в разделе 4 описано измерение пекулярных скоростей скоплений и сверхскоплений галактик; в разделе 5 перечислены основные результаты. В работе использованы следующие космологические параметры: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПЛОСКОСТИ

Для оценки размера вириализованной области скоплений галактик часто используется R_{200} — радиус, в пределах которого плотность массы систем превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз. Существуют различные методы оценки этого радиуса, например метод каустик (Diaferio and Geller, 1997) и аналитический профиль NFW (Navarro et al., 1997).

В наших работах мы оцениваем R_{200} по формуле $R_{200} = \sqrt{3} \sigma / (10H(z)) \text{ Мпк}$ (Carlberg et al., 1997). Предполагая, что в пределах этого радиуса скопление галактик 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} , а G — гравитационная постоянная. Найденный радиус скопления R_{200} не может быть использован для построения ФП, поскольку другие характеристики (σ_{200} и M_{200}) будут зависимыми параметрами.

Если в работе Kopylova and Kopylov (2024b) мы использовали радиус гало, R_{sp} , чтобы найти радиус R_e , содержащий половину галактик, то в данной работе используем радиус R_{200} , в пределах которого измерили количество галактик. На следующем

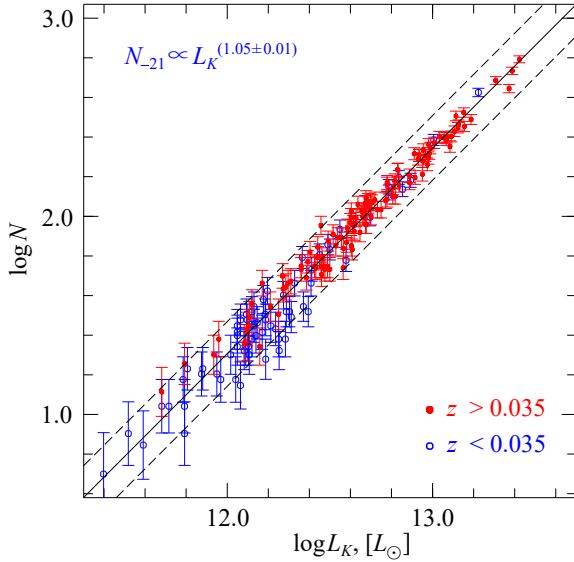


Рис. 1. Количество галактик (богатство) в пределах радиуса R_{200} в группах и скоплениях галактик в зависимости от K -светимости. Ошибки количества галактик определены как \sqrt{N} . Красными кружками показаны системы галактик с $z_h > 0.035$, синими — с $z_h < 0.035$. Сплошной линией приведено регрессионное соотношение $N_{-21} \propto L_K^{1.05 \pm 0.01}$. Штриховые линии соответствуют 3σ -отклонениям.

этапе мы нашли радиус, содержащий половину галактик в скоплении. Группы и скопления галактик в нашей выборке имеют большой диапазон красных смещений: $z = [0.012–0.150]$ (за исключением трех систем). Для их совместного исследования мы взяли общий предел по абсолютной величине $M_K = -21^m$ в фильтре K_s (далее K). Затем мы подсчитали полные светимости L_K и полное число галактик (богатство систем галактик) N_{-21} (далее N) по методике Ramella et al. (2004). Определение полной светимости или полного числа галактик в скоплениях с помощью функции светимости (Φ С) в границах выбранного предела состоит из двух этапов. Сначала Φ С нормируется на наблюдаемое число галактик. Мы взяли параметры функции Шехтера составной Φ С для скоплений галактик в сверхскоплениях Hercules и Leo: $M_K^* = -24^m97 \pm 0^m30$, $\alpha = -1.19 \pm 0.10$ (Kopylova and Kopylov, 2024b). Мы определили нормировку для каждого скопления следующим образом:

$$\phi^* = N_{\text{obs}} / \int_{L_{K,\text{lim}}/L_K^*}^{+\infty} t^\alpha e^{-t} dt, \quad (3)$$

где $t = L/L_K^*$.

Затем, просуммировав светимости галактик в скоплении до собственного предела $L_{K,\text{lim}}$ (в абсолютных звездных величинах) и использовав полученную нормализацию, мы экстраполировали

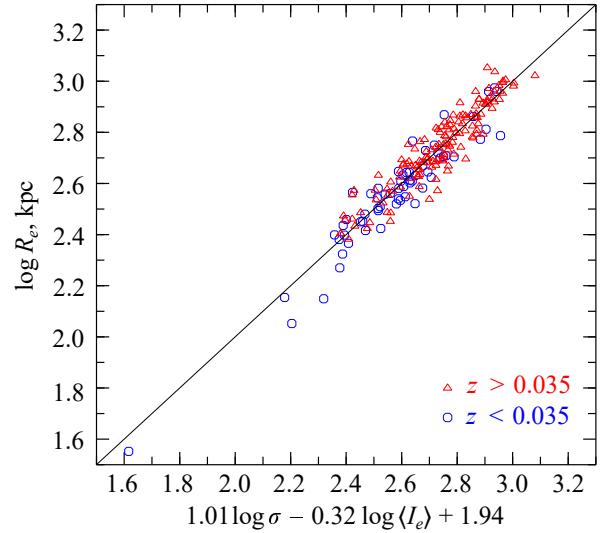


Рис. 2. Проекция фундаментальной плоскости I групп и скоплений галактик в фильтре K вдоль оси $\lg R_e$. Красными треугольниками показаны системы галактик с $z > 0.035$, синими кружками — с $z < 0.035$.

функцию светимости в область слабых величин до предела, равного -21^m , который соответствует светимости $L_{K,\text{obs}}$:

$$L_K = \sum_{i=1}^{N_{\text{obs}}} L_{K,i} + \phi^* L_K^* \int_{L_{K,\text{min}}/L_K^*}^{L_{K,\text{lim}}/L_K^*} t^{\alpha+1} e^{-t} dt. \quad (4)$$

Мы нашли, что для скоплений галактик с $z < 0.035$ можно просто просуммировать светимости всех галактик. На рис. 1 показана общая зависимость богатства систем галактик N от светимости L_K для радиуса R_{200} . Можно заметить, что K -светимости и богатство групп и скоплений галактик с $z > 0.035$ являются продолжением аналогичных параметров систем галактик с $z < 0.035$. Общая зависимость рентгеновских систем галактик имеет вид: $N \propto L_K^{1.05 \pm 0.01}$. Средняя ошибка в L_K меньше $0.2 \times 10^{12} M_\odot$. Ошибка в N равна \sqrt{N} .

2.1. Фундаментальная плоскость I

В первом варианте при построении ФП I мы использовали дисперсию лучевых скоростей галактик в системах вдоль луча зрения в пределах радиуса R_{200} ($\lg \sigma$ в $\text{км} \text{с}^{-1}$), радиус R_e в кпк, содержащий половину галактик ($M_K \leq -21^m$), и среднюю поверхностную яркость на этом радиусе, $\langle I_e \rangle = L_K / (2\pi R_e^2)$, которую измеряют в этом случае в светимостях L_\odot с площади 1 пк^2 или, в случае групп и скоплений галактик, с площади 1 кпк^2 .

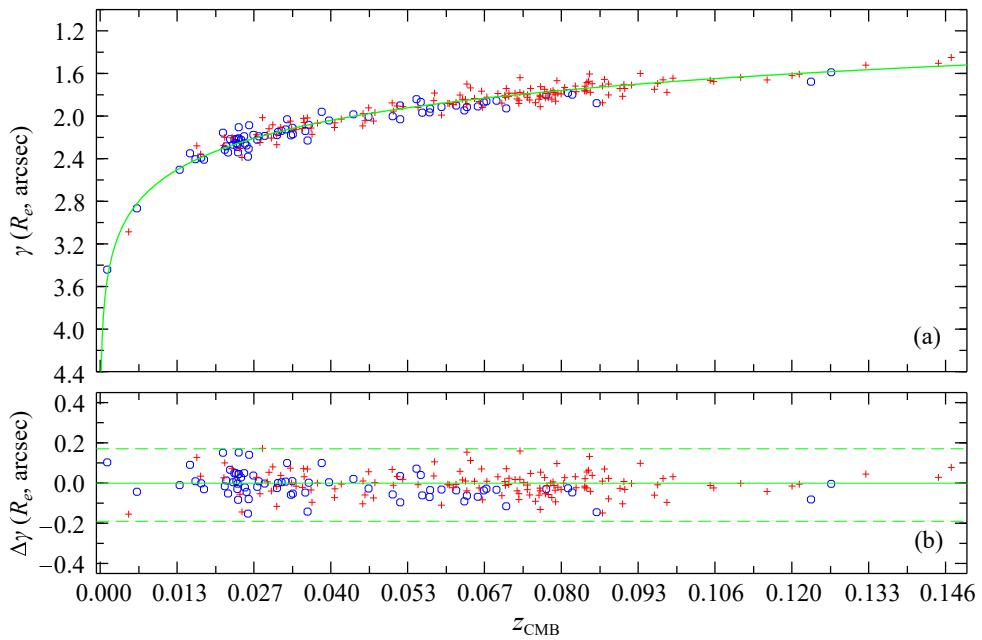


Рис. 3. На панели (а) представлена зависимость нуль-пунктов γ фундаментальной плоскости I (угловых расстояний 205 групп и скоплений галактик) от красного смещения в системе СМВ. Красными крестиками показаны скопления галактик с $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$, а синими кружками — с $\sigma < 400 \text{ км с}^{-1}$. Сплошной зеленой линией показана ожидаемая зависимость Хаббла для космологической модели ΛCDM с $\Omega_m = 0.30$. На панели (б) показаны отклонения угловых расстояний систем галактик от ожидаемой зависимости Хаббла; штриховые линии соответствуют 3σ -отклонениям.

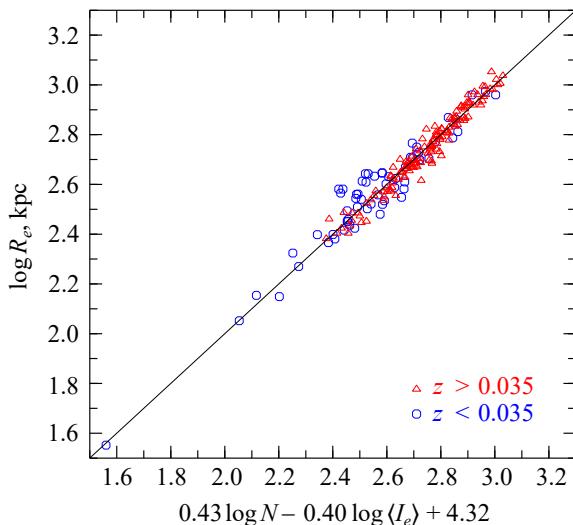


Рис. 4. Проекция фундаментальной плоскости II групп и скоплений галактик в фильтре K вдоль оси $\lg R_e$. Красными треугольниками показаны системы галактик с $z > 0.035$, синими кружками — с $z < 0.035$.

В расширяющейся Вселенной поверхностная яркость объектов испытывает космологическое затемнение, пропорциональное $(1+z)^4$ (закон Толмена), то есть $\lg I \propto 4 \lg(1+z)$. Для скоплений галактик ($N = 135$) мы нашли зависимость

$$\lg \langle I_e \rangle = (3.375 \pm 1.445) \lg(1+z_{\text{CMB}}) + (5.994 \pm 0.043),$$

где в скобках приведены стандартные отклонения. Наша зависимость имеет коэффициент несколько меньше четырех (но в пределах ошибок), тем не менее мы вычли поправку $4 \lg(1+z)$ из поверхностной яркости систем галактик. При этом в светимости L_K мы не вводили поправку за эволюцию светимости в фильтре K , поскольку диапазон изменения красных смещений в нашей выборке невелик.

Для 135 скоплений галактик ($\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$) мы получили следующую фундаментальную плоскость (ФП I) в сопутствующей системе координат методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \lg R_e = & (1.009 \pm 0.047) \lg \sigma \\ & - (0.323 \pm 0.029) \langle I_e \rangle + 1.938, \end{aligned}$$

где R_e — эффективный радиус, выраженный в килопарсеках. Другие ФП для разных выборок приведены в Таблице 1. Важно отметить, что коэффициенты классических фундаментальных плоскостей галактик ранних типов и скоплений галактик, построенных нами, согласуются друг с другом: $R_e \propto \sigma^{0.991 \pm 0.124} \langle I_e \rangle^{0.318 \pm 0.020}$ (Kopylova and Kopylov, 2024c) и $R_e \propto \sigma^{1.009 \pm 0.047} \langle I_e \rangle^{-0.323 \pm 0.029}$.

Мы использовали значение нуль-пункта $\gamma = -8.066 \pm 0.001$, найденное нами по 2654 галактикам (Kopylova and Kopylov, 2024c) для принятой модели ΛCDM при построении ожидаемой зависимости Хаббла. Чтобы использовать этот нуль-

пункт в ФП скоплений галактик, мы сместили его, учитя разницу между -8.066 и 1.938 . В данной работе ФП скоплений галактик имеет нуль-пункт со стандартным отклонением 0.060 , эквивалентным примерно 14% ошибке определения расстояния одного скопления. На рис. 2 показана полученная ФП групп и скоплений галактик вдоль оси $\lg R_e$ (R_e в кпк). Мы продемонстрировали, что данные по близким ($z < 0.035$) и далеким ($z > 0.035$) системам галактик, полученные описанным выше методом, хорошо согласуются между собой, за исключением нескольких близких групп. Кроме скопления Virgo, мы включили в выборку две близкие группы: M 101 и NGC 5846 — для демонстрации возможностей методов, хотя эти объекты не влияют на оценку отклонений от ожидаемого закона Хаббла, поскольку отклонения определяются для всей выборки сразу. Нуль-пункт изменяется с расстоянием систем галактик, если $\lg R_e$ изменяется в угловых секундах. На рис. 3а показана корреляция между относительными расстояниями групп и скоплений галактик (R_e в угловых секундах) и красным смещением в системе СМВ (зависимость Хаббла). Красными крестиками отмечены скопления галактик с дисперсией лучевых скоростей в проекции $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$. Сплошной зеленой линией показана (как в Kopylova and Kopylov, 2024c) ожидаемая зависимость Хаббла для принятой нами модели Λ CDM и найденного по галактикам нуль-пункта, равного $\gamma = -8.066$. Мы можем отметить, что нуль-пункт (важная составляющая в данной работе), найденный нами по галактикам ранних типов в скоплениях, хорошо описывает ФП самих скоплений галактик. Можно сказать, что ожидаемая зависимость Хаббла (подробно в Kopylova and Kopylov, 2024c) служит критерием фундаментальных плоскостей, образованных комбинацией параметров систем галактик. На рис. 3б приведены отклонения угловых расстояний систем галактик от зависимости Хаббла. В работе Kopylova and Kopylov (2024c) ошибки измерения расстояний систем галактик определяются количеством галактик ранних типов в них. Средняя ошибка по всем системам равна 0.018 ± 0.002 . В ФП систем галактик ошибки измерения расстояний систем галактик определяются ошибками измерения дисперсии лучевых скоростей σ как σ/\sqrt{N} , где N — количество галактик. В этом случае нами найдено, что средняя ошибка измерения расстояний скоплений галактик в три раза больше. Мы получили среднее отклонение от зависимости Хаббла для выборки с $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$: $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0103 \pm 0.0053$ ($N = 134$, без скопления Virgo). При этом стандартное отклонение равно 0.0610 , что соответствует отклонению постоянной Хаббла в 14% ($\pm 9.9 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$). Это

значение незначительно меньше, чем полученное нами в работе Kopylova and Kopylov (2024b).

2.2. Фундаментальная плоскость II

Во втором варианте фундаментальной плоскости (ФП II), использовав полученную нормализацию каждого скопления (см. уравнение (3)), мы определили полное число галактик в системах до определенного одинакового предела по абсолютной звездной величине:

$$N_{-21} = \phi^* \int_{L_{K,\min}/L_K^*}^{+\infty} t^\alpha e^{-t} dt. \quad (5)$$

Если в уравнении ФП I скоплений галактик $\lg \sigma$ заменить на $\lg N$, то получим новую ФП II (фотометрическую) с меньшим разбросом:

$$\begin{aligned} \lg R_e = & (0.432 \pm 0.011) \lg N \\ & + (0.400 \pm 0.018) \langle I_e \rangle + 4.316, \end{aligned}$$

где R_e также выражено в килопарсеках. Данная ФП скоплений галактик имеет нуль-пункт со стандартным отклонением 0.036 , эквивалентным примерно 8% ошибке определения расстояния одного скопления. На рис. 4 показана полученная ФП групп и скоплений галактик вдоль оси $\lg R_e$. На рисунке можно отметить согласие данных, полученных для близких и далеких систем галактик по методике, описанной выше.

На рис. 5а показана зависимость между относительными расстояниями групп и скоплений галактик (R_e в угловых секундах) и красным смещением в системе СМВ (зависимость Хаббла). Красными крестиками помечены скопления галактик с дисперсией лучевых скоростей в проекции $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$. Сплошной зеленой линией показана (как в Kopylova and Kopylov, 2024c) ожидаемая зависимость Хаббла для принятой нами модели Λ CDM и нуль-пункта, найденного по галактикам, равного $\gamma = -8.066$. На рис. 5б приведены отклонения угловых расстояний систем галактик от зависимости Хаббла. Мы получили среднее отклонение от зависимости Хаббла скоплений галактик: $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0051 \pm 0.0030$ ($N = 134$). При этом стандартное отклонение равно 0.0352 , которое соответствует отклонению постоянной Хаббла в 8.1% ($\pm 5.7 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$).

2.3. Фундаментальная плоскость III

Наилучшей фундаментальной плоскостью групп и скоплений галактик является ФП III, полученная

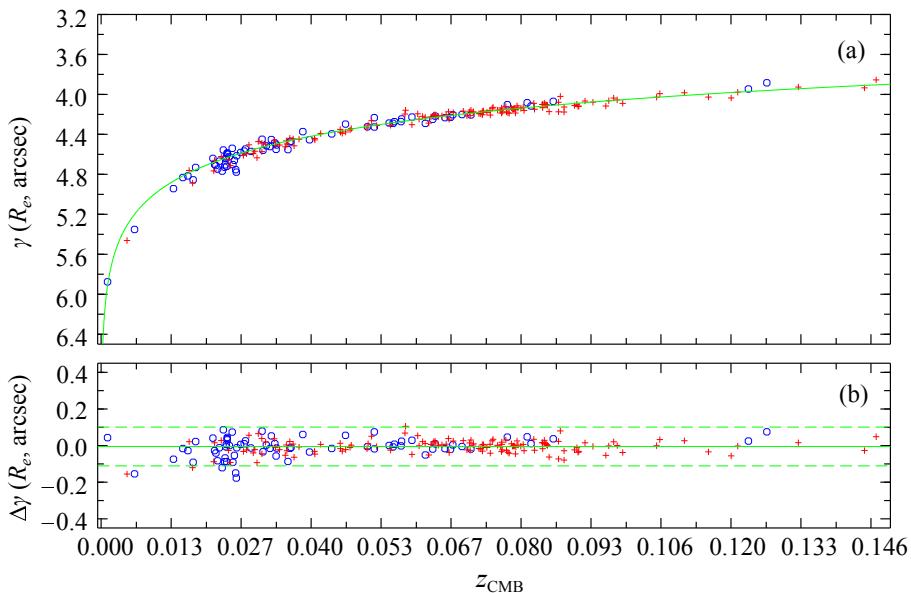


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для случая фундаментальной плоскости II.

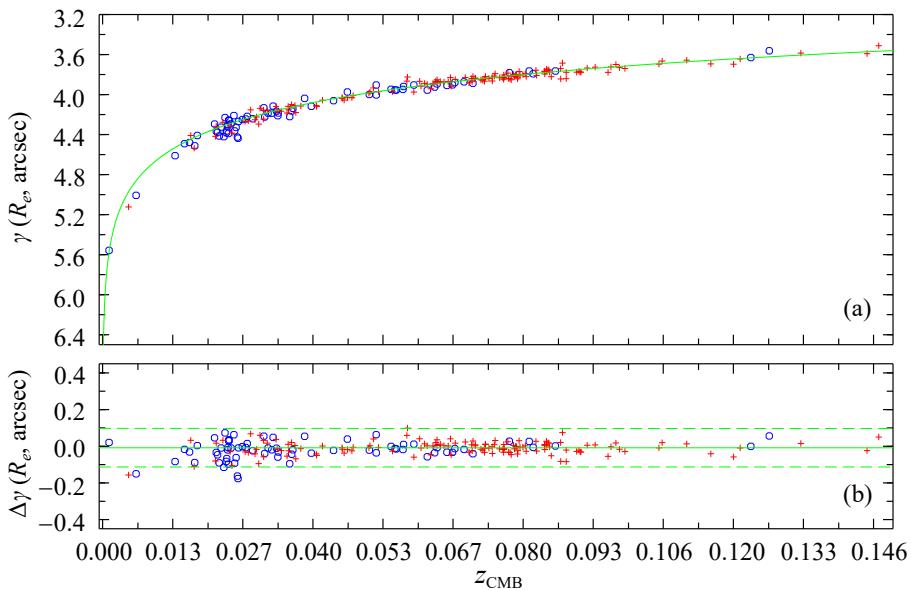


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для случая фундаментальной плоскости III.

из ФП I добавлением четвертого параметра ($\lg N$):

$$\begin{aligned} \lg R_e = & (0.147 \pm 0.059) \lg \sigma - (0.394 \pm 0.018) \langle I_e \rangle \\ & + (0.380 \pm 0.023) \lg N + 3.978, \end{aligned} \quad (6)$$

где R_e выражено в килопарсеках. Данная ФП скоплений галактик имеет нуль-пункт со стандартным отклонением 0.035, эквивалентным примерно 8% ошибке определения расстояния одной системы (см. рис. 6). Мы получили среднее отклонение от зависимости Хаббла для выборки с $\sigma \geq 400 \text{ км с}^{-1}$: $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0082 \pm 0.0030$

($N = 134$). При этом стандартное отклонение равно 0.0346, что соответствует отклонению постоянной Хаббла в 8%. Мы получаем постоянную Хаббла $H_0 = 70 \pm 5.6 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Вместо $\lg N$ в качестве четвертого параметра можно взять $\lg L_X$ (таблица 1) и получить ФП IV (рис. 7), но ошибка измерения расстояния одной системы равна приблизительно 13%. В этом случае, чтобы повысить точность, необходимы более точные измерения L_X (лучше T_X) и массы M_X (Kopylova and Kopylov, 2016). Кроме того, в таблице 1 приведена ФП V, аналогичная построенной в работе Fritsch and Buchert (1999). В

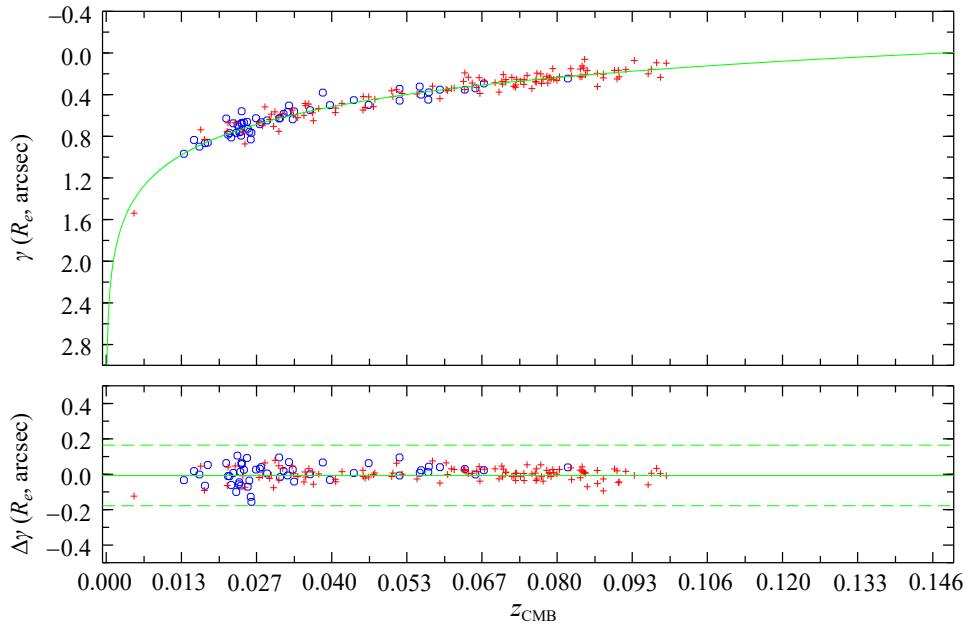


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для случая фундаментальной плоскости IV и угловых расстояний 167 групп и скоплений галактик ($L_X > 0$).

нашей работе эта ФП связывает K -светимость, L_X -светимость и радиус, содержащий половину галактик ($M_K < -21^m$). Ошибка измерения расстояния одного скопления галактик у этой ФП больше, чем у других методов, и составляет 19%.

2.4. Комментарии к M 101 и NGC 5846

По сравнению с работой Kopylova and Kopylov (2024b) мы увеличили выборку, добавив две близкие системы.

Группа M 101, состоящая из гигантской спиральной галактики и нескольких мелких иррегулярных галактик, является изолированной системой. Группа многократно исследовалась. В работе Karachentsev et al. (1994) определен фотометрический модуль расстояния по ярчайшим голубым и красным звездам (CCD-снимки получены в первичном фокусе 6-м телескопа САО РАН). В работе Tully et al. (2013) представлен компилятивный каталог расстояний и пекулярных скоростей групп, в том числе M 101 и NGC 5846.

По данным NED и 2MASX нами получены физические параметры группы таким же образом, как для всей выборки групп и скоплений галактик. В пределах радиуса R_{200} , равного 191 кпк, нами найдено пять галактик — M 101, NGC 5477, NGC 5474, UGC 8882 и Но IV — со средней гелиоцентрической лучевой скоростью $cz = 397 \text{ km s}^{-1}$ и дисперсией лучевых скоростей в проекции $\sigma = 77.3 \pm 34.6 \text{ km s}^{-1}$. Соответствующие масса $M_{200} = 0.008 \times 10^{14} M_\odot$

и $L_{K,200} = 0.062 \times 10^{12} L_\odot (M_K < -21^m)$ дают $M/L = 13 M_\odot/L_\odot$. Заданному нами пределу соответствует фактически только одна ярчайшая галактика, все остальные галактик слабее.

Группа NGC 5846 — детально изученная группа с несколькими яркими галактиками ранних типов в центральной области (см., например, Makhavi et al., 2005). По данным NED, SDSS, 2MASX нами измерены следующие физические параметры группы: гелиоцентрическая лучевая скорость $cz = 1775 \text{ km s}^{-1}$, дисперсия лучевых скоростей $\sigma = 320 \pm 38 \text{ km s}^{-1}$, радиус $R_{200} = 790 \text{ кпк}$, $M_{200} = 0.57 \times 10^{14} M_\odot$, $L_{K,200} = 1.02 \times 10^{12} L_\odot (M_K < -21^m)$ и $M/L = 56 M_\odot/L_\odot$.

3. СРАВНЕНИЕ УГЛОВЫХ РАССТОЯНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ФП ГАЛАКТИК И ФП СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Сравнение угловых расстояний систем галактик, полученных по ФП галактик ранних типов (Kopylova and Kopylov, 2024c) и по ФП систем галактик (данная работа), показало, что наименьшая разница получается при использовании ФП с четырьмя параметрами. Для 125 систем галактик (общие системы в двух работах) мы получили $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0012 \pm 0.0036$. Для двух других ФП (I и II): $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0209 \pm 0.0061$ и $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0191 \pm 0.0037$. В работе Kopylova and Kopylov (2024c) нами была найдена небольшая зависимость измеренных расстояний γ (и

Таблица 1. Фундаментальные плоскости

Relation	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Normalization	Scatter
$N = 135, \sigma \geq 400 \text{ km s}^{-1}$					
I $\lg R_e = \text{alg} \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	1.009 ± 0.047	-0.323 ± 0.029		1.938	0.060
II $\lg R_e = a \lg N - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	0.432 ± 0.011	-0.400 ± 0.018		4.316	0.036
III $\lg R_e = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c \lg N + \gamma$	0.147 ± 0.059	-0.394 ± 0.023	0.380 ± 0.023	3.978	0.035
$N = 115, \sigma \geq 400 \text{ km s}^{-1}, L_X > 0$					
IV $\lg R_e = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c \lg L_X + \gamma$	0.844 ± 0.048	-0.329 ± 0.023	0.046 ± 0.012	0.421	0.057
V $\lg R_e = a \lg L_X - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	0.171 ± 0.014	-0.287 ± 0.046		2.931	0.084
$N = 205, \text{total}$					
I $\lg R_e = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	0.988 ± 0.027	-0.339 ± 0.021		2.090	0.062
II $\lg R_e = a \lg N - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	0.421 ± 0.008	-0.388 ± 0.014		4.266	0.043
III $\lg R_e = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c \lg N + \gamma$	0.232 ± 0.032	-0.379 ± 0.014	0.332 ± 0.020	3.751	0.041
$N = 167, L_X > 0$					
IV $\lg R_e = a \lg \sigma - b \lg \langle I_e \rangle + c \lg L_X + \gamma$	0.887 ± 0.048	-0.330 ± 0.023	0.041 ± 0.012	0.548	0.057
V $\lg R_e = a \lg L_X - b \lg \langle I_e \rangle + \gamma$	0.220 ± 0.012	-0.314 ± 0.040		4.912	0.101

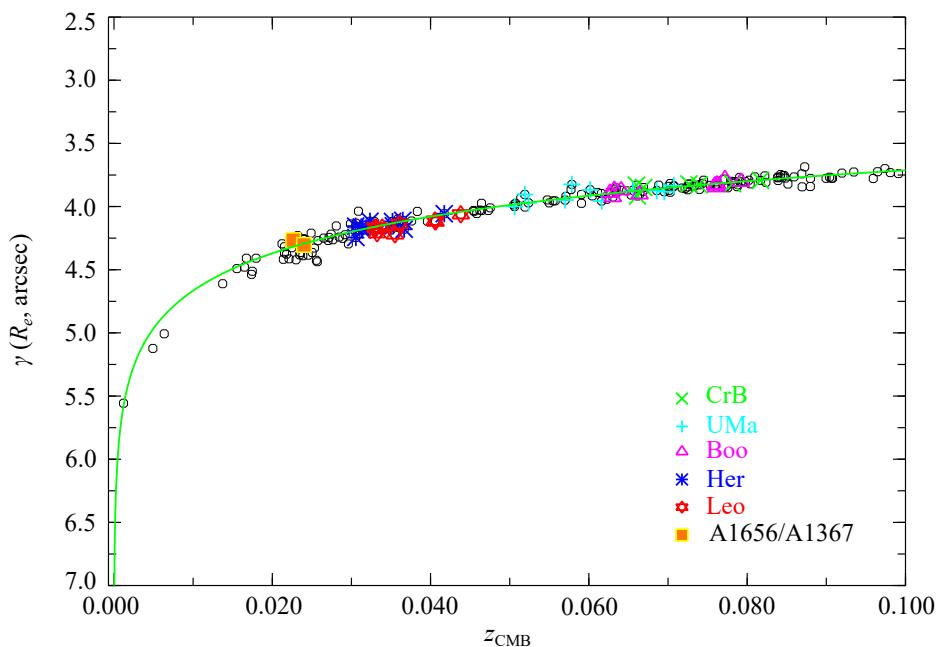


Рис. 8. Зависимость нуль-пунктов γ фундаментальной плоскости III (угловых расстояний групп и скоплений галактик) от красного смещения в системе СМВ. Пустые кружки соответствуют 205 системам галактик. Зелеными крестами отмечены члены сверхскопления Сорона Бореалис, голубыми — члены сверхскопления Урса Мажор, пурпурными — члены сверхскопления Боотес, синими крестами показаны члены сверхскопления Геркулес, красными — члены сверхскопления Лео, оранжевыми квадратами — сверхскопление А 1656/А 1367. Сплошная зеленая линия соответствует Хаббловской зависимости между красным смещением и расстоянием для модели с космологическими параметрами: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

пекулярных скоростей) в сопровождающей системе координат от рентгеновской светимости в полосе 0.1–2.4 keV: группы и скопления с $L_X \leq 0.151 \times 10^{44}$ эрг с $^{-1}$ показывают в основном положительные пекулярные скорости, а скопления с $L_X > 4 \times 10^{44}$ эрг с $^{-1}$ — отрицательные. Рассто-

яния, измеренные по собственной фундаментальной плоскости групп и скоплений галактик, подобной зависимости не демонстрируют, доказывая тем самым, что, возможно, свойства галактик ранних типов подвергаются влиянию внутригалактической среды систем галактик.

4. ПЕКУЛЯРНЫЕ СКОРОСТИ СИСТЕМ ГАЛАКТИК

В области нашего исследования (в области обзора SDSS) расположены пять сверхскоплений галактик: Hercules (Her, $z_h = 0.034$, $N = 10$), Leo ($z_h = 0.037$, $N = 9$), Ursa Major (UMa, $z_h = 0.060$, $N = 11$), Bootes (Boo, $z_h = 0.070$, $N = 10$), Corona Borealis (CrB, $z_h = 0.072$, $N = 7$). На рис. 8 приведены наблюдаемые угловые расстояния групп и скоплений галактик (нуль-пункты ФП III) в зависимости от красного смещения в системе СМВ. Члены сверхскоплений галактик показаны разноцветными крестами. Оранжевыми квадратами мы отметили скопления A 1656 и A 1367.

Как и в работах Kopylova and Kopylov (2024b; c), для этих самых больших систем галактик мы измерили пекулярные скорости. Приведенная Хаббловская зависимость (рис. 3, 5, 6) позволяет по наблюдаемому угловому расстоянию ($\lg R_e$ в угловых секундах), измеренному по фундаментальным плоскостям, определить соответствующее красное смещение скопления z_{FP} в сопутствующей системе координат (Kopylova and Kopylov (2024c), рис. 2). Пекулярные скорости скоплений галактик в этом случае равны разнице между спектроскопическим и фотометрическим красными смещениями:

$$V_{\text{pec}} = c(z_{\text{CMB}} - z_{\text{FP}})/(1 + z_{\text{FP}}). \quad (7)$$

Используя фундаментальные плоскости, мы тремя методами измерили пекулярную скорость группы M 101 и определили ее среднее значение: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = -48 \pm 150 \text{ км с}^{-1}$. Ошибка соответствует ошибке измерения σ и N . Пекулярная скорость группы NGC 5846 равна $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +482 \pm 100 \text{ км с}^{-1}$. Кроме того, мы измерили пекулярную скорость близкого скопления Virgo (данные по скоплению приведены в Kopylova and Kopylov (2024c)) также как среднее по трем ФП: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +439 \pm 60$. В работе Kopylova and Kopylov (2024c) по восьми галактикам на окраине радиуса R_{200} скопления Virgo была измерена $\langle V_{\text{pec}} \rangle = -240 \pm 260 \text{ км с}^{-1}$. Если мы возьмем постоянную Хаббла $H_0 = 71.1 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, определенную нами по галактикам ранних типов в скоплениях (Kopylova and Kopylov, 2024a), то пекулярные скорости систем будут следующими:

$$\begin{aligned} \langle V_{\text{pec}} \rangle &= -134 \pm 250 \text{ км с}^{-1} (\text{M 101}), \\ \langle V_{\text{pec}} \rangle &= +311 \pm 100 \text{ км с}^{-1} (\text{NGC 5846}) \text{ и} \\ \langle V_{\text{pec}} \rangle &= +281 \pm 60 \text{ км с}^{-1} (\text{Virgo}). \end{aligned}$$

Представленные пекулярные скорости измерены как отклонения от Хаббловской зависимости (Kopylova and Kopylov, 2024c); если мы оценим их как отклонения от нуль-пункта (Kopylova and Kopylov, 2024b) в сопутствующей системе координат, то получим следующие значения:

$$\begin{aligned} \langle V_{\text{pec}} \rangle &= -96 \pm 250 \text{ км с}^{-1} (\text{M 101}), \\ \langle V_{\text{pec}} \rangle &= +329 \pm 170 \text{ км с}^{-1} (\text{NGC 5846}) \text{ и} \\ \langle V_{\text{pec}} \rangle &= +146 \pm 140 \text{ км с}^{-1} (\text{Virgo}). \end{aligned}$$

Можно отметить, что близкое скопление галактик Virgo и группа NGC 5846 имеют положительные пекулярные скорости, измеренные относительно ожидаемой Хаббловской зависимости (модель Λ CDM), то есть они имеют красное смещение в сопутствующей системе, z_{FP} , меньше чем z_{CMB} .

Нами получены следующие средние пекулярные скорости пяти сверхскоплений галактик с помощью четырехпараметрической фундаментальной плоскости III (в системе СМВ):

$$\begin{aligned} \text{Hercules} &- \langle V_{\text{pec}} \rangle = +71 \pm 390 \text{ км с}^{-1}, \\ \text{Leo} &- \langle V_{\text{pec}} \rangle = +871 \pm 390 \text{ км с}^{-1}, \\ \text{Ursa Major} &- \langle V_{\text{pec}} \rangle = -307 \pm 750 \text{ км с}^{-1}, \\ \text{Bootes} &- \langle V_{\text{pec}} \rangle = +241 \pm 700 \text{ км с}^{-1}, \\ \text{Corona Borealis} &- \langle V_{\text{pec}} \rangle = -136 \pm 760 \text{ км с}^{-1}. \end{aligned}$$

В среднем мы имеем $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +148 \pm 280 \text{ км с}^{-1}$. Согласно уравнению (6) ошибка нуль-пункта составляет 3.978 ± 0.003 . Вариации этой ошибки влекут вариации $\langle V_{\text{pec}} \rangle$ сверхскоплений галактик в пределах $[+20, -198]$. Самую большую пекулярную скорость показывает сверхскопление Leo, в котором пекулярная скорость превышает ошибку измерения примерно в 2.2 раза. Если усреднить значения пекулярных скоростей сверхскоплений галактик, полученных тремя методами, то получим среднюю величину сносового движения: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +241 \pm 180 \text{ км с}^{-1}$. Близкое значение было получено нами в работе Kopylova and Kopylov (2024c) по галактикам ранних типов в скоплениях: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +240 \pm 250 \text{ км с}^{-1}$.

Ранее, также по ФП галактик ранних типов (с вариацией метода) нами получен следующий результат по 57 системам галактик: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +83 \pm 130 \text{ км с}^{-1}$ (Kopylova and Kopylov, 2017). В работе Kopylova and Kopylov (2024b) по ФП самих скоплений галактик мы измерили сносовое движение пяти сверхскоплений галактик: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +75 \pm 360 \text{ км с}^{-1}$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Масштабные соотношения между динамическими и фотометрическими характеристиками (фундаментальные плоскости) групп и скоплений галактик из-за космологической зависимости могут дать ограничения на изменение космологических параметров, например постоянной Хаббла, или способствовать обнаружению крупномасштабных объемных потоков. Преимуществом фундаментальных плоскостей самих скоплений галактик является то, что количество и качество

галактик ранних типов в скоплениях не имеют значения, хотя основной ошибкой измеряемого расстояния является общее количество галактик в пределах измеряемого радиуса, влияющее на дисперсию лучевых расстояний систем. Поле пекулярных скоростей, получаемое в исследованиях, играет важную роль в проверке космологических моделей. У исследователей появляется возможность проводить прямые сравнения между наблюдаемыми движениями галактик и систем галактик и теоретическими предсказаниями, основанными на распределении темной материи (см., например, Pike and Hudson, 2005; Carrick et al., 2015; Dupuy et al., 2019).

К основным результатам работы по построению фундаментальных плоскостей групп и скоплений галактик можно отнести:

1. Установлено, что нуль-пункт фундаментальной плоскости, найденный нами (Kopylova and Kopylov, 2024c) по галактикам ранних типов, хорошо описывает фундаментальные плоскости групп и скоплений галактик.

2. Впервые построена фундаментальная плоскость систем галактик в фильтре K с наименьшим стандартным отклонением, соответствующим 8% ошибке определения расстояния одной системы: $R_e \propto \sigma^{0.147 \pm 0.059} \langle I_e \rangle^{-0.394 \pm 0.018} N^{0.380 \pm 0.023}$. Аналогичная ФП с рентгеновской светимостью L_X вместо богатства скопления N ,

$$R_e \propto \sigma^{0.843 \pm 0.073} \langle I_e \rangle^{-0.332 \pm 0.031} L_X^{0.047 \pm 0.014},$$

имеет 13% ошибку определения расстояния одной системы.

3. Впервые построена фотометрическая фундаментальная плоскость в фильтре K со стандартным отклонением, также соответствующим 8% ошибке определения расстояния одной системы:

$$R_e \propto N^{0.432 \pm 0.011} \langle I_e \rangle^{-0.400 \pm 0.018}.$$

4. Построена ФП для 167 систем галактик с измеренным излучением в рентгеновской области: $L_K = R_e^{1.144 \pm 0.112} L_X^{0.236 \pm 0.031}$.

5. Найдено, что разница угловых расстояний систем галактик, измеренных по ФП галактик ранних типов и по ФП самих скоплений галактик, минимальна, когда расстояния измеряются по ФП с четырьмя параметрами (уравнение (6)). В этом случае $\langle \Delta\gamma \rangle = -0.0012 \pm 0.0036$.

6. С помощью трех ФП измерено сносовое движение пяти сверхскоплений галактик в системе СМВ: $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +241 \pm 180 \text{ км с}^{-1}$ (раннее в Kopylova and Kopylov (2024b) мы получили $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +75 \pm 360 \text{ км с}^{-1}$).

БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовались данные из базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu>), которая поддерживается Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением по аeronавтике и исследованию космического пространства, Слоановского цифрового обзора неба (SDSS, <http://www.sdss.org>), поддерживаемого Фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками сотрудничества SDSS, Национальным научным фондом и Министерством энергетики США, а также Двухмикронного обзора неба (2MASS, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (2), 543 (2009). DOI:10.1088/0067-0049/182/2/543
2. C. Adami, A. Mazure, A. Biviano, et al., *Astron. and Astrophys.* **331**, 493 (1998).
3. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J.* **485** (1), L13 (1997). DOI:10.1086/310801
4. J. Carrick, S. J. Turnbull, G. Lavaux, and M. J. Hudson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450** (1), 317 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv547
5. A. Diaferio and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **481** (2), 633 (1997). DOI:10.1086/304075
6. S. Djorgovski and M. Davis, *Astrophys. J.* **313**, 59 (1987). DOI:10.1086/164948
7. M. D'Onofrio, D. Bettoni, D. Bindoni, et al., *Astronomische Nachrichten* **334** (4-5), 373 (2013). DOI:10.1002/asna.201211860
8. A. Dressler, D. Lynden-Bell, D. Burstein, et al., *Astrophys. J.* **313**, 42 (1987). DOI:10.1086/164947
9. A. Dupuy, H. M. Courtois, and B. Kubik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (1), 440 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz901
10. C. Fritsch and T. Buchert, *Astron. and Astrophys.* **344**, 749 (1999). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9806173

11. Y. Fujita and F. Takahara, *Astrophys. J.* **519** (1), L51 (1999). DOI:10.1086/312090
12. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astron. J.* **119** (5), 2498 (2000). DOI:10.1086/301330
13. I. D. Karachentsev, A. I. Kopylov, and F. G. Kopylova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 5 (1994).
14. F. Kopylova and A. Kopylov, in *Proc. All-Russian Conf. on Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK-2024)*, Nizhnii Arkhyz, Russia, 2024, Ed. by Yu. Yu. Balega, A. M. Cherepashchuk et al. (Moscow RIOR, 2024), pp. 161–166. (2024a). DOI:10.26119/VAK2024.027
15. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 257 (2016). DOI:10.1134/S1990341316030019
16. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 363 (2017). DOI:10.1134/S1990341317040010
17. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **79** (1), 1 (2024b). DOI:10.1134/S1990341324600054
18. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Reports* **68** (8), 761 (2024c). DOI:10.1134/S1063772924700756
19. J. Kormendy and S. Djorgovski, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **27**, 235 (1989). DOI:10.1146/annurev.aa.27.090189.001315
20. B. Lanzoni, L. Ciotti, A. Cappi, et al., *Astrophys. J.* **600** (2), 640 (2004). DOI:10.1086/379850
21. A. Mahdavi, N. Trentham, and R. B. Tully, *Astron. J.* **130** (4), 1502 (2005). DOI:10.1086/444560
22. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **490** (2), 493 (1997). DOI:10.1086/304888
23. R. W. Pike and M. J. Hudson, *Astrophys. J.* **635** (1), 11 (2005). DOI:10.1086/497359
24. M. Ramella, W. Boschin, M. J. Geller, et al., *Astron. J.* **128** (5), 2022 (2004). DOI:10.1086/424862
25. R. Schaeffer, S. Maurogordato, A. Cappi, and F. Bernardeau, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **263**, L21 (1993). DOI:10.1093/mnras/263.1.L21
26. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146** (4), id. 86 (2013). DOI:10.1088/0004-6256/146/4/86
27. D. Zaritsky, *ISRN Astronomy and Astrophysics* **2012**, id. 189625 (2012). DOI:10.5402/2012/189625

Distances of Galaxy Groups and Clusters Measured Using Fundamental Planes

F. G. Kopylova¹ and A. I. Kopylov¹

¹Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz 369167, Russia

In this paper, we continue our research on constructing the optimal fundamental plane (FP) of galaxy groups and clusters for measuring their distances. This work was carried out using archival data from the SDSS and 2MASX catalogs. We present the fundamental planes (scaling relation of dynamical and photometric parameters) of 205 galaxy groups and clusters ($z < 0.15$). We found that in the near infrared (K -filter), the distribution of galaxy clusters is well approximated by three-parameter planes of the form $R_e \propto \sigma^{1.01 \pm 0.05} \langle I_e \rangle^{-0.32 \pm 0.03}$ and $R_e \propto N^{0.43 \pm 0.01} \langle I_e \rangle^{-0.40 \pm 0.02}$ and a four-parameter plane of the form $R_e \propto \sigma^{0.15 \pm 0.06} \langle I_e \rangle^{-0.39 \pm 0.02} N^{0.38 \pm 0.02}$. The fundamental planes have logarithmic standard deviations of 0.060, 0.036, and 0.035. If we use the fundamental planes to measure distances of galaxy systems, these deviations correspond to 14% and 8% errors in the distance of a single cluster. Using the four-parameter fundamental plane, we obtained the scatter of the Hubble constant $H_0 = 70 \pm 5.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Using three fundamental planes of galaxy clusters, it was found that the velocity of the average drift motion in the three-degree cosmic microwave background (CMB) system of five superclusters of galaxies from the SDSS region is $\langle V_{\text{pec}} \rangle = +241 \pm 180 \text{ km s}^{-1}$.

Keywords: galaxies: groups—galaxies: clusters—galaxies: fundamental parameters—galaxies: distances and redshifts—cosmology: large-scale structure of the Universe