

УДК 524.7-87:52-333

СПУТНИКИ ВОКРУГ ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ С РЕБРА. I. ДИНАМИЧЕСКИЕ МАССЫ

© 2023 Д. В. Смирнов¹, Д. И. Макаров², И. Д. Караченцев²¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия¹⁾

Поступила в редакцию 30 мая 2023 года; после доработки 16 августа 2023 года; принята к публикации 18 августа 2023 года

Мы предприняли поиски спутников вокруг галактик, наблюдаемых с ребра, из каталога EGIPS, который насчитывает 16 551 объект со склонениями выше -30° . Искались системы с доминирующей по светимости центральной галактикой, яркость которой как минимум на 1^m больше своих компаньонов. В результате было обнаружено 1097 кандидатов в спутники вокруг 764 EGIPS-галактик с проекционным расстоянием менее 500 кпк и разностью лучевых скоростей менее 300 км с^{-1} . Из них 757 спутников вокруг 547 центральных галактик имеют точности определения лучевых скоростей лучше 20 км с^{-1} и удовлетворяют условию гравитационной связанности. Ансамбль спутников характеризуется средним проекционным расстоянием 84 кпк и средней дисперсией лучевых скоростей 103 км с^{-1} . Рассматривая мелкие спутники как пробные частицы, двигающиеся по изотропным орбитам вокруг центральных EGIPS-галактик, мы определили проекционные (орбитальные) массы галактик, видимых с ребра. В диапазоне светимостей от 1.3×10^{10} до $42 \times 10^{10} L_\odot$ полная масса систем хорошо описывается линейной зависимостью $\lg M_p \propto 0.88 \lg \langle L_K \rangle_g$ со средним отношением полной массы к K -светимости, равном $(17.5 \pm 0.8) M_\odot / L_\odot$, что типично для близких спиральных галактик, таких как Млечный Путь, М 31 и М 81.

Ключевые слова: галактики: группы: общие сведения — галактики: гало — галактики: спиральные

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно стандартной космологической модели Λ CDM, формирование галактик из диффузной среды происходит внутри потенциальных ям, образованных флуктуациями в распределении темной материи (Wechsler and Tinker, 2018). На долю видимого барионного вещества галактик (звезд, газа и пыли) приходится всего около 5% общей плотности Вселенной (Aghanim et al., 2020). Традиционные методы определения полной массы галактики, включая темное гало, по кривой вращения или по дисперсии лучевых скоростей звезд (см., например, обзор Zasov et al., 2017) не являются достаточно строгими, поскольку предполагают экстраполяцию наблюдательных данных далеко за пределы оптических границ галактики. Фактически для прямой оценки полной массы пригодны два метода: анализ эффектов слабого гравитационного линзирования (к примеру, Viola et al., 2015), требующий также ряда модельных предпосылок, и анализ кинематики спутников, окружающих галактику. Оба метода имеют свои преимущества и

недостатки. Необходимая точность их достигается при применении к большому числу одиночных галактик, выделенных по морфологическому типу или другим признакам. Определение полной массы галактик разных категорий по кинематике их спутников применялось неоднократно: для спиральных галактик (Zaritsky et al., 1993, 1997; Zaritsky and White, 1994), для близких галактик разных типов в Местном объеме (Karachentsev and Kudrya, 2014; Karachentsev and Kashibadze, 2021), для особо изолированных галактик (Karachentseva et al., 2021) и для тонких спиралей поздних типов, видимых с ребра (Karachentsev et al., 2016).

Рассматривая относительные лучевые скорости и проекционные расстояния спутников вокруг 15 близких галактик типа Млечного Пути и туманности Андромеды, Karachentsev and Kudrya (2014) получили медианную оценку отношения полной (проекционной) массы к светимости галактик в K -полосе, равную $31 M_\odot / L_\odot$. Позднее Karachentsev and Kashibadze (2021) использовали более богатую выборку 298 спутников вокруг 25 ярких галактик Местного объема типа Млечного Пути и нашли для них среднее отношение

¹⁾E-mail: dim@sao.ru

$\langle M_p/L_K \rangle = (31 \pm 6) M_\odot/L_\odot$. При этом была отмечена более высокая величина M_p/L_K для выборки 47 галактик малой светимости типа соседних галактик M 33 и Магеллановых Облаков. Среднее отношение M_p/L_K у галактик с доминирующими дисками, $(17.4 \pm 2.8) M_\odot/L_\odot$, оказалось значительно меньше, чем у галактик с преобладающими балджами, $(73 \pm 15) M_\odot/L_\odot$.

Karachentseva et al. (2021) применили аналогичный подход к оценке полной массы особо изолированных спиральных галактик. По лучевым скоростям и проекционным расстояниям 141 спутника они получили значение $\langle M_p/L_K \rangle = (20.9 \pm 3.1) M_\odot/L_\odot$, отметив тенденцию роста этого отношения в сторону галактик более ранних морфологических типов.

Независимое определение величины M_p/L_K для Sc–Sd галактик было сделано в работе Karachentsev and Karachentseva (2019). Для 220 галактик без видимых балджей и ориентированных анфас по 43 спутникам было получено среднее отношение $(20 \pm 3) M_\odot/L_\odot$, согласующееся с предыдущими оценками.

В данной работе рассматривается кинематика спутников, которые мы обнаружили вокруг галактик, видимых с ребра, из каталога EGIPS (Makarov et al., 2022). Галактики, видимые с ребра, привлекают к себе внимание тем, что такая ориентация дает нам возможность непосредственно исследовать распределение спутников относительно плоскости диска галактик, что недоступно в других случаях. Каталог EGIPS является самой большой на данный момент выборкой галактик, видимых с ребра, что позволяет существенно увеличить статистику и, как следствие, повысить надежность получаемых выводов. В работе мы опираемся на стандартную космологическую Λ CDM модель с параметрами $H_0 = 72.0 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ СПУТНИКОВ

За основу выборки центральных объектов был взят новый каталог галактик, видимых с ребра, (EGIPS, Makarov et al., 2022) обнаруженных на изображениях обзора Pan-STARRS1 DR2 (PS1, Chambers et al., 2016). В нем содержатся данные о 16 551 галактике, расположенной выше $\delta > -30^\circ$. Фотометрия, выполненная нами с использованием пакета SExtractor (Bertin and Arnouts, 1996) во всех пяти фильтрах (g, r, i, z, y) обзора PS1, обеспечивает несмещенную оценку потока с точностью около 0.05 для галактик слабее $r \simeq 13^m.8$. Большинство EGIPS-галактик (около 63%) имеют измерения красного смещения с медианным значением $cz_{\text{CMD}} \approx 12\,000 \text{ км с}^{-1}$, что соответствует глу-

бине порядка 170 Мпк. Чтобы избежать неопределенностей в оценке расстояний до галактик, связанных с большими пекулярными скоростями в близкой Вселенной, мы ограничились рассмотрением EGIPS-галактик с $cz_{\text{LG}} \geq 2000 \text{ км с}^{-1}$. Из-за наблюдательной селекции количество галактик с известными красными смещениями стремительно падает после $cz_{\text{CMD}} \approx 12\,000 \text{ км с}^{-1}$. Статистика систем с красными смещениями более $30\,000 \text{ км с}^{-1}$ крайне скудная (имеется около 10 систем с большими скоростями), поэтому мы ограничили выборку максимальным красным смещением $cz_{\text{CMD}} = 30\,000 \text{ км с}^{-1}$.

Выборка кандидатов в спутники формировалась в четыре этапа. На первом шаге был составлен список примерно 3.2 миллиона галактик с известными красным смещением и фотометрией по данным обзора SDSS DR17 (Abdurro'uf et al., 2022) и базы данных HyperLeda¹⁾ (Makarov et al., 2014). Использование SDSS обеспечивает высокую однородность данных, однако представляет ряд трудностей. Для большого числа ярких галактик ($m_r \lesssim 14^m.5$), попадающих в фотометрическую часть обзора SDSS, не проводились измерения скоростей и звездных величин. Кроме того, существует известная проблема «расщепления» изображений близких галактик на несколько объектов, что приводит к двум взаимосвязанным эффектам: недооценке светимости галактики, с одной стороны, и получению спектра галактики в стороне от ее физического центра, с другой, что вносит неизвестную случайную составляющую в измерение красного смещения галактик. Привлечение данных из HyperLeda позволяет решить проблему с яркими галактиками. Для большинства из них существует аккуратная интегральная фотометрия, а полнота данных по красным смещениям не хуже чем 96% для галактик $B \leq 15^m.5$ (Falco et al., 1999). Кроме того, HyperLeda содержит большую коллекцию данных, полученных в ходе массовых обзоров неба в линии нейтрального водорода, таких как ALFALFA (Haynes et al., 2018) и HIPASS (Meyer et al., 2004).

Прежде чем приступить к процедуре отбора, мы привели разнородные данные о фотометрии галактик из различных обзоров к единой звездной величине в фильтре K_s в фотометрической системе 2MASS (Skrutskie et al., 2006). Выбор этого фильтра обусловлен тесной связью K -светимости звездного населения галактик с их полной звездной массой. Как правило, галактики ярче $K_s < 13^m.5$ имеют оригинальные измерения потоков в обзоре 2MASS. Соответственно, для галактик с известной K -фотометрией использовались данные

¹⁾<https://leda.univ-lyon1.fr/>

из HyperLeda без какой-либо трансформации. Подавляющее большинство данных о галактиках в нашей выборке было получено из обзора SDSS. Для перевода SDSS-величин в систему 2MASS использовалось соотношение:

$$(g - K_s)_0 = 1.907(g - r)_0 + 1.654(r - i)_0 + 0.684 \quad (1)$$

со стандартным отклонением $\sigma = 0.126$ (Bilir et al., 2008, уравнение (15)). При детальном рассмотрении галактик, оказавшихся в конечной выборке, было обнаружено, что для некоторых из них, как правило клочковатых и протяженных LSB-галактик, SDSS-фотометрия является явно ошибочной. В этих случаях мы использовали фотометрию в g -, r - и z -фильтрах из DESI Legacy Surveys (Dey et al., 2019), объединяющих три проекта: the Dark Energy Camera Legacy Survey (DECaLS), the Beijing-Arizona Sky Survey (BASS), и the Mayall z -band Legacy Survey (MzLS). Для оценки K_s -величины по этим данным мы действовали поэтапно. Сначала Legacy-фотометрия переводилась в систему SDSS в предположении $r - i \approx i - z \approx 0^m15$, характерном для галактик позднего типа на $z = 0$ (Fukugita et al., 1995; Shimasaku et al., 2001), а затем в систему 2MASS, используя уравнение (1). Для данных из обзора DECaLS, мы пользовались уравнениями перехода B1 из работы Abbott et al. (2021), а для обзоров BASS и MzLS — из работы Zou et al. (2019). Как упоминалось выше, фотометрия галактик из каталога EGIPS была выполнена в системе PS1. Звездные величины EGIPS-галактик в системе SDSS получались из уравнений перехода Tonry et al. (2012) и в дальнейшем переводились в K_s по формуле (1). Отметим, что в окончательной выборке оригинальная 2MASS-фотометрия присутствует у подавляющего большинства центральных EGIPS-галактик (только для 28 из 764 объектов пришлось использовать оптическую фотометрию). В случае кандидатов в спутники для 60% галактик K -величины были оценены через уравнения перехода. Однако это не должно приводить к существенной недооценки светимости, так как основу выборки спутников составляют карликовые галактики, где влияние внутреннего поглощения невелико. Все фотометрические данные мы исправили за поглощение в Галактике, используя калибровку Schlafly and Finkbeiner (2011).

На следующем этапе для каждой галактики из каталога EGIPS был составлен список их соседей на небе. В него попадали все галактики, находящиеся на проекционном расстоянии менее 3 Мпк и с разностью скоростей не более 500 km s^{-1} относительно галактики, видимой с ребра. Алгоритм выделения объектов в SDSS часто приво-

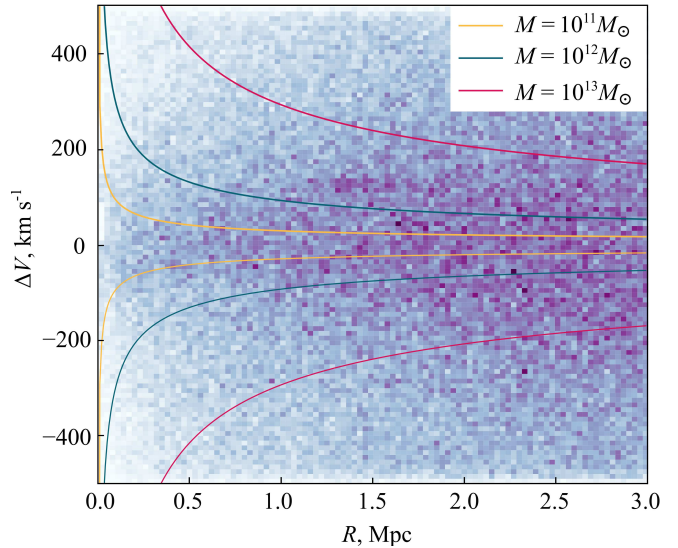


Рис. 1. Распределение галактик-соседей в плоскости $(\Delta V, R)$. Цветными линиями изображены кривые скорости убегания для различных точечных масс.

дит к искусственному расщеплению протяженных и клочковатых галактик на большое количество псевдогалактик. Для части из этих псевдогалактик в рамках обзора SDSS были получены спектры и оценены красные смещения, которые, скорее, отражают кинематику самой галактики, а не ее спутников. Чтобы избежать включения таких псевдогалактик в списки соседей, из рассмотрения исключались все объекты, попадающие в петросьяновский эллипс EGIPS-галактики в фильтре r (если фотометрия в полосе r была некачественной, использовались данные по другим фильтрам, преимущественно — g). На рис. 1 представлено распределение галактик-соседей на плоскости $(\Delta V, R)$, где $\Delta V = (V_{\text{neighbour}} - V_{\text{EGIPS}})/(1 + z)$ — скорректированная за космологическую поправку скорость соседа относительно EGIPS-галактики, а R — проекционное расстояние между галактикой-соседом и галактикой, видимой с ребра. Из рисунка видно, что на больших проекционных расстояниях ($R \gtrsim 1.5$ Мпк) заполнение плоскости примерно равномерное, а на меньших расстояниях существует вполне выраженная концентрация соседей вблизи $\Delta V = 0$. На этом этапе были удалены все EGIPS-галактики, содержащие более яркий компаньон на проекционном расстоянии менее 1.5 Мпк, и с разницей лучевых скоростей меньше скорости убегания, которая соответствует точечной массе $M = 10^{13} M_{\odot}$. Цель этого шага — исключить из рассмотрения галактики, входящие в состав групп с более массивным компаньоном, и отделить спутники EGIPS-галактик от членов групп, где галактика, видимая с ребра, не является доминирующей по массе.

Для формирования списка возможных спутников рассматриваемых галактик мы отбирали все объекты с $|\Delta V| \leq 300 \text{ км с}^{-1}$ и $R < 0.5 \text{ Мпк}$, что примерно соответствует параметрам известных групп галактик. Однако при этом в рассмотрении остаются галактики с компаньонами сопоставимой светимости — пары типа Млечный Путь и Туманность Андромеды. Из-за эффектов проекции в подобных системах задача выделения спутников конкретных галактик также сильно затруднена. Поэтому мы исключили из выборки EGIPS-галактики, имеющие компаньона в пределах 0.5 Мпк с условием на абсолютную звездную величину $(M^K - M_{\text{EGIPS}}^K) \leq 1^m$. Фактически на этом этапе мы отобрали изолированные группы галактик, в которых центральная галактика, видимая с ребра, доминирует по светимости над своими соседями как минимум в 2.5 раза.

В идеале использованный прием позволяет выделять изолированные системы с доминирующей по светимости галактикой и ее спутниками. Однако при визуальном контроле мы обнаружили, что в некоторых случаях алгоритм оставляет в рассмотрении галактики, которые, вероятно, являются членами скоплений или групп с сопоставимым по массе соседом. Это происходит из-за неполноты данных о красных смещениях галактик или когда исследуемая система находится на периферии динамически горячего скопления. Чтобы очистить выборку от подобного засорения, мы просмотрели все оставшиеся к этому этапу галактики и исключили из рассмотрения те из них, которые с высокой вероятностью являются членами скоплений или больших групп. Всего было исключено 19 кандидатов вокруг 14 EGIPS-галактик; описание каждого такого случая приведено в Приложении А. Мы также исключили из рассмотрения две EGIPS-галактики: EGIPS J144339.4+110821 и EGIPS J131905.6-242504. В первом случае для галактики отсутствует адекватная фотометрия, во втором — видны явные признаки взаимодействия, искажающие измерение скорости галактики.

По итогам описанной выше последовательности процедур в рассмотрении осталось 764 EGIPS-галактики и 1097 кандидатов в их спутники. Сведения об этих объектах приведены в Таблице 1 (в полной версии доступной только в виде Дополнительного материала).

На рис. 2 представлены распределения центральных галактик и их кандидатов в спутники по светимости и красному смещению. Разделение центральных галактик на красные и синие проводилось по условию $(g - i)_0 \leq 0.91$, что позволяет хорошо отделить галактики «красной последовательности» от «голубого облака» (Makarov et al., 2022). Распределение центральных красных галактик характеризуется медианной K -светимостью

$\widetilde{M}_K = -24^m3$, а кандидатов в их спутники — $\widetilde{M}_k = -21^m2$. Для центральных галактик «голубого облака» медианная светимость равна $\widetilde{M}_K = -22^m1$, а для их спутников — $\widetilde{M}_k = -19^m2$.

На рис. 3 представлено распределение всех 1097 кандидатов в спутники красных и синих EGIPS-галактик в плоскости $(\Delta V, R)$. Лучевая скорость основной массы кандидатов отличается от скорости центральной галактики менее чем на 100 км с^{-1} , что ожидаемо для гравитационно-связанных систем вокруг одиночных массивных галактик типа Млечного Пути.

3. ОТБОР ГРАВИТАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ СПУТНИКОВ

Для более тщательного отсева фоновых галактик мы воспользовались методикой, предложенной и развитой в работах по изучению групп галактик на шкале до $z \sim 0.01$ (Karachentsev and Makarov, 2008; Makarov and Karachentsev, 2009, 2011). Физическая пара галактик должна удовлетворять ряду ограничений. Очевидно, что полная энергия связанной системы должна быть отрицательной, откуда следует, что взаимная скорость галактик должна быть меньше скорости убегания в гравитирующей системе, $v^2 < v_{\text{esc}}^2 = 2GM/r$. Так как наблюдаемая разница лучевых скоростей, ΔV , и проекционное расстояние между галактиками, R , заведомо меньше их пространственных аналогов (v и r соответственно), то данное соотношение для наблюдаемых параметров оказывается еще более строгим:

$$\Delta V^2 < v^2 < 2\frac{GM}{r} < 2\frac{GM}{R}. \quad (2)$$

Сверх того, радиус «сферы нулевой скорости», также называемый радиусом поворота, определяет границу между уже сколлапсировавшей областью повышенной плотности и продолжающей расширяться Вселенной:

$$r_{\text{ta}}^3 \simeq \frac{8GM}{\pi^2 H_0^2}. \quad (3)$$

Это накладывает естественное ограничение на максимальный линейный размер системы.

Предполагая связь между полной массой гравитирующей системы и ее светимостью, $M = \kappa L_K$, мы можем переписать вышеприведенные условия в терминах отношения «масса — светимость». Для физической системы проекционное отношение «масса — светимость» для скорости убегания (уравнение 2) дает

$$\frac{\Delta V^2 R}{2G(L_{\text{host}} + L_{\text{sat}})} < \kappa, \quad (4)$$

Таблица 1. Кандидаты в спутники EGIPS-галактик. В колонках представлены значения следующих параметров: (1) — обозначение кандидата согласно базе данных HyperLeda (Makarov et al., 2014); (2) — координаты кандидата на эпоху J2000.0; (3) и (4) — красное смещение кандидата в системе реликтового излучения в км с⁻¹ и ошибка красного смещения; в (5)–(8) приведены полные звездные величины кандидатов в g , r , i в фотометрической системе SDSS и K_{s0} в системе 2MASS. Все величины скорректированы за поглощение в нашей Галактике согласно Schlafly and Finkbeiner (2011); в (9) дана K_s абсолютная звездная величина кандидата; (10) и (11) содержат обозначения центральной EGIPS-галактики и ее координаты согласно Makarov et al. (2022); (12) — красное смещение центральной галактики в системе реликтового излучения; (13) и (14) — угловое и проекционное расстояния между кандидатом и центральной галактикой в угловых минутах и кпк соответственно; (15) — разница лучевых скоростей, скорректированная за космологическое уширение $\Delta V = (V_{\text{candidate}} - V_{\text{EGIPS}})/(1+z)$; (16) и (17) содержат числовые значения для критериев отбора по скорости убегания (уравнение 4) и радиусу поворота (уравнение 5) соответственно. Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна как Дополнительный материал

No	Candidate	J2000.0	cz_{CMB}	e_{cz}	g_0	r_0	i_0	K_{s0}	M_K
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	SDSS J000043.54+143129.5	J000043.5+143130	27892.2	10.0	18.69	17.75	17.75	15.5	-22.58
2	UGC12895	J000038.4+200333	6394.4	2.9	15.86	15.49	15.49	14.1	-20.68
3	[МКВ2002]J000409.64+042553.3	J000409.6+042551	11488.6	60.0	18.01	17.66	17.66	16.28	-19.79
4	AGC102304	J000510.6+050954	7852.1	6.2	17.77	17.43	17.43	16.11	-19.12
5	PGC000425	J000556.1-135846	5585.2	70.0				14.05	-20.43
6	SDSS J000634.50-004714.2	J000634.5-004714	12677.4	3.7	19.57	19.28	19.28	18.1	-18.2
7	AGC105303	J000922.2+104104	6076.2	6.1	16.38	15.92	15.92	14.4	-20.27
8	PGC001031	J001524.4+184624	5215.8	8.5				11.75	-22.58
9	PGC1146389	J001529.0-001854	17771.7	2.7	17.2	16.76	16.76	15.19	-21.87
10	SDSS J001610.69-011244.9	J001610.7-011245	24925.4	2.1	18.78	18.11	18.11	16.11	-21.71

No	EGIPS ID	J2000.0	cz_{CMB}	R , arcmin	R , kpc	ΔV	$f_{V_{\text{esc}}}$	$f_{R_{\text{ta}}}$
	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
1	J000042.1+143023	J000042.2+143023	27841.1	1.16	118.0	46.7	0.15	0.01
2	J000055.9+202017	J000056.0+202017	6451.5	17.24	461.0	-55.9	2.42	2.1
3	J000344.7+041753	J000344.8+041753	11205.0	10.08	449.4	273.4	26.55	0.92
4	J000506.6+051213	J000506.6+051213	7695.0	2.52	79.5	153.1	1.97	0.01
5	J000556.8-135944	J000556.8-135945	5411.4	0.99	22.6	170.8	1.76	0.0
6	J000628.8-004702	J000628.9-004703	12907.3	1.43	72.5	-220.4	3.36	0.0
7	J000904.2+105508	J000904.2+105508	6324.9	14.74	387.4	-243.5	25.52	0.83
8	J001440.0+183455	J001440.1+183455	5055.3	15.56	332.3	157.8	4.5	0.26
9	J001539.8-001601	J001539.8-001601	17613.9	3.96	267.7	149.0	8.37	0.35
10	J001615.2-011213	J001615.3-011214	24839.7	1.26	115.7	79.2	0.49	0.01

а из условия для радиуса поворота (3) получаем

$$\frac{\pi^2 R^3 H_0^2}{8G(L_{\text{host}} + L_{\text{sat}})} < \kappa, \quad (5)$$

где L_{host} и L_{sat} обозначают K -светимость центральной галактики и ее спутника соответственно. На рис. 4 приведены распределения кандидатов в спутники по проекционным отношениям «масса–светимость» для скорости убегания и ра-

диусу поворота. Мы ограничили выборку спутников, принимая величину $\kappa = 9 M_{\odot}/L_{\odot}$ для обоих отношений.

Как было отмечено в работе Makarov and Karachentsev (2011), ошибки измерения красного смещения могут вносить существенный вклад в определяемую дисперсию скоростей галактик в группах, особенно когда эти ошибки оказываются соизмеримыми с ожидаемой дисперсией скоростей

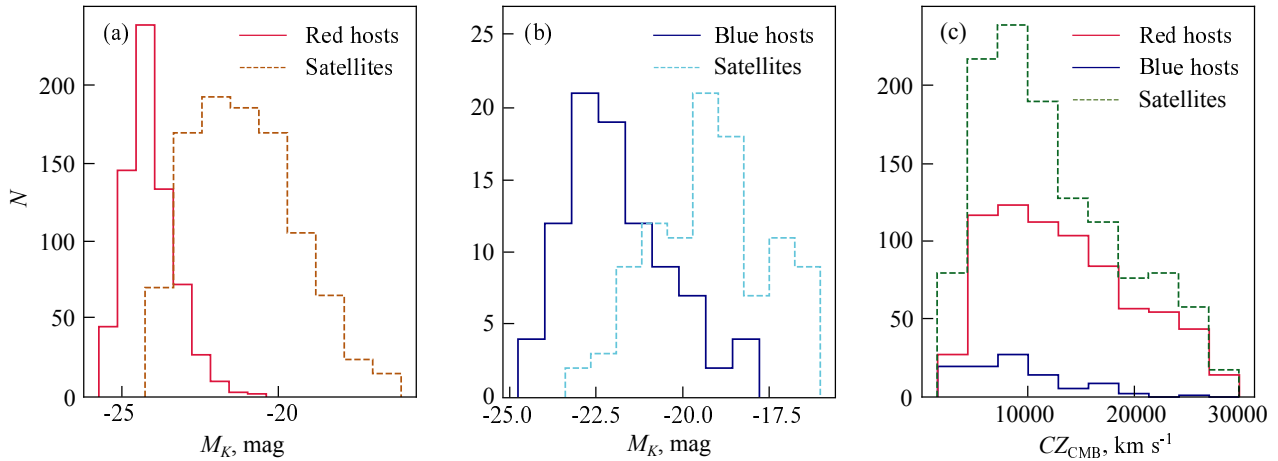


Рис. 2. Гистограммы распределения центральных EGIPS-галактик и кандидатов в спутники по абсолютной звездной величине в полосе K ((a) — для систем с красными центральными галактиками, (b) — с голубыми) и красному смещению (c).

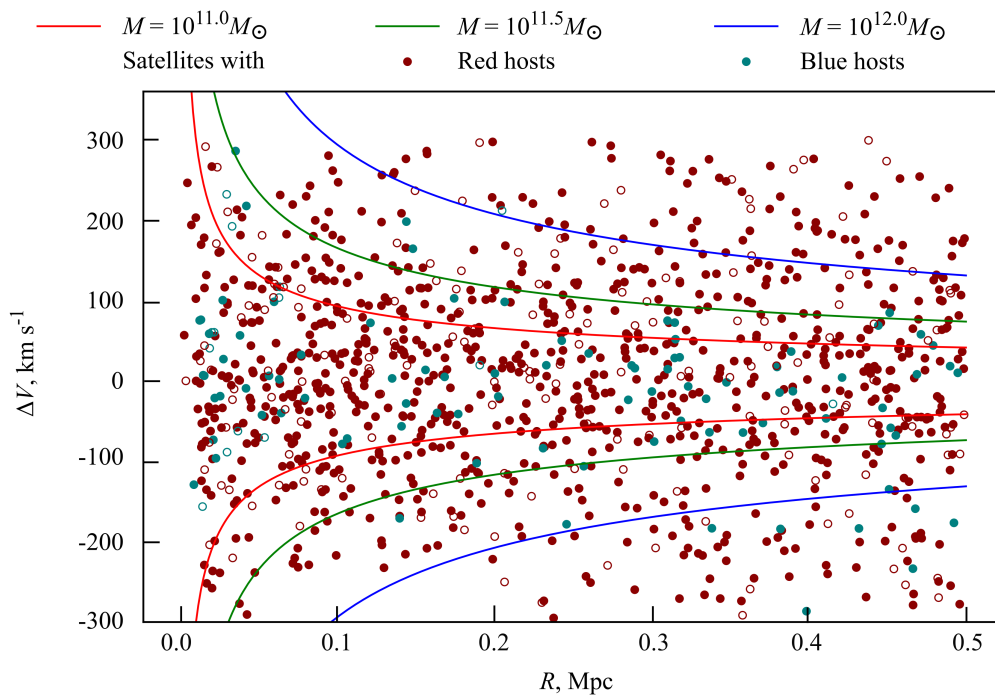


Рис. 3. Распределение кандидатов в спутники на плоскости $(\Delta V, R)$. Цветными линиями изображены кривые скорости убегания для разных центральных точечных масс. Полными кружками показаны галактики с ошибкой измерения скорости $e_{cz} \leq 20 \text{ km s}^{-1}$.

спутников около или менее 100 km s^{-1} . Как видно на рис. 5, для большинства кандидатов ошибка измерения лучевой скорости не превышает 20 km s^{-1} . Поэтому отбор именно этих галактик стал завершающим штрихом формирования выборки спутников вокруг галактик, видимых с ребра. Окончательная выборка для анализа кинематики групп с доминирующей по светимости центральной галактикой насчитывает 757 спутников вокруг 547 EGIPS-галактик.

4. ОЦЕНКА МАСС СИСТЕМ

В получившейся выборке среднее число кандидатов в спутники, приходящихся на центральную галактику, не превышает полутора. Это делает определение масс индивидуальных EGIPS-галактик очень ненадежным. Мы предположили, что сопоставимые по светимости центральные галактики имеют примерно равные массы, а следовательно, и кинематику окружающих спутников. Поэтому для оценки массы

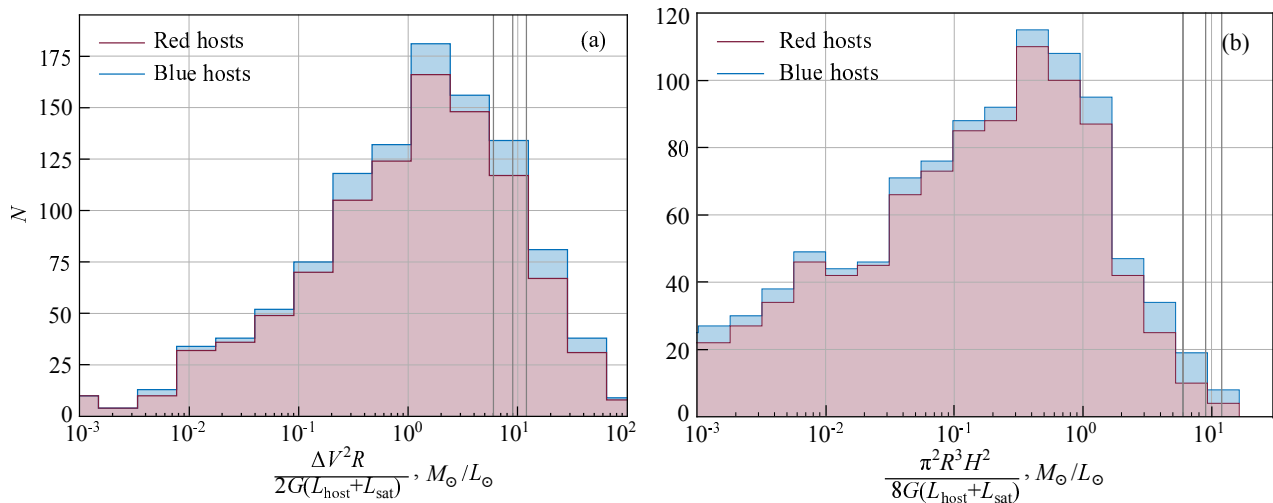


Рис. 4. Накопительные гистограммы распределения кандидатов в спутники по «вириальному» (a) и «пространственному» параметрам (b). Вертикальные линии соответствуют значениям отношения «масса – светимость» $\kappa = 6, 9, 12 M_{\odot}/L_{\odot}$.

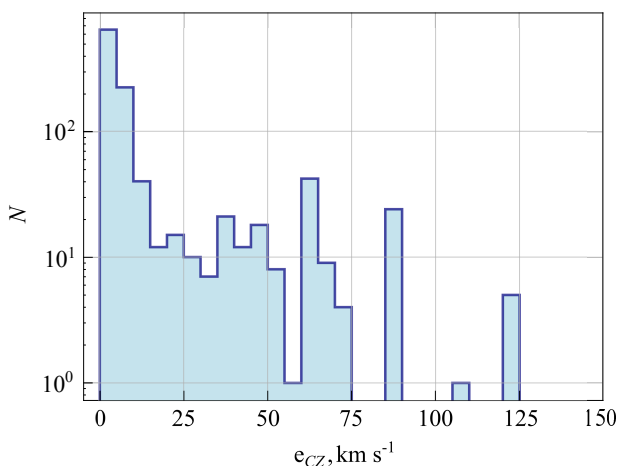


Рис. 5. Распределение кандидатов в спутники по ошибкам измерения лучевых скоростей. Для лучшей наглядности распределения количество галактик представлено в логарифмическом масштабе.

систем мы решили рассматривать не одиночные галактики, а сформировать агрегатные группы, состоящие из всех кандидатов-спутников вокруг EGIPS-галактик примерно одинаковой светимости. Мы разбили нашу выборку на 10 подвыборок по светимости центральной EGIPS-галактики. Основным критерием разбиения было примерное равенство количества кандидатов в спутники в каждой подвыборке. К сожалению, при этом диапазон светимости, охватываемый подвыборками наиболее ярких центральных галактик, оказывался чрезвычайно широким. Для большей детализации из EGIPS-галактик с $L_K \geq 2.14 \times 10^{11} L_{\odot}$ были сформированы две подвыборки с несколько меньшим количеством объектов. На рис. 6 представ-

лено распределение кандидатов в спутники для каждой из 10 подвыборок, разделенных по светимости центральной EGIPS-галактики. Каждая такая подвыборка рассматривалась в дальнейшем как единая агрегатная система спутников.

Благодаря описанному выше алгоритму отбора кандидатов в каждой агрегатной группе, светимость и масса спутников оказываются существенно ниже, чем у центральной галактики. Поэтому при оценке массы групп мы можем использовать упрощение, рассматривающее спутники как пробные частицы, движущиеся в поле тяготения центральной галактики. Bahcall and Tremaine (1981) подчеркнули проблемы использования теоремы вириала: оценка массы с учетом эффектов проекции является смещенной, статистически неэффективной и несостоятельной. Они предложили альтернативу теореме вириала — проекционную оценку массы, свободную от этих недостатков. К сожалению, оценка проекционной массы зависит от формы орбит движущихся частиц. Наиболее естественным является предположение об изотропности орбит со средним квадратом эксцентриситета, равным $\langle e^2 \rangle = 1/2$. В этом случае проекционная оценка массы приобретает вид (Bahcall and Tremaine, 1981, уравнение (20))

$$M_p = \frac{16}{\pi G N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i^2 R_i. \quad (6)$$

В отличие от теоремы вириала, где проекционные эффекты делают оценку массы статистически неэффективной, дисперсия оценки проекционной массы четко определена и в случае изотропного распределения орбит равна (Bahcall and Tremaine,

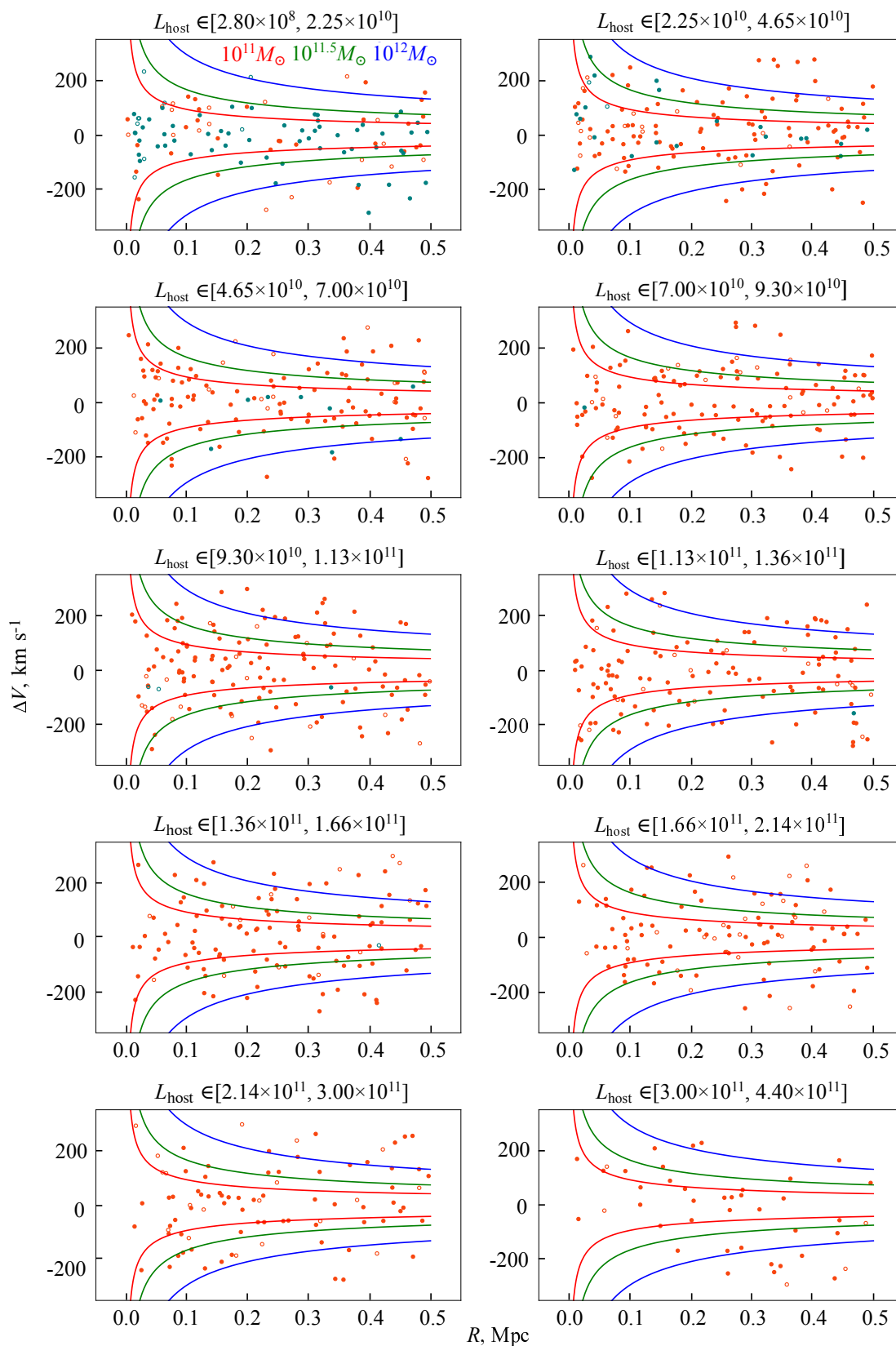


Рис. 6. Распределение кандидатов в спутники в плоскости $(\Delta V, R)$, разбитых на подвыборки по светимости центральной галактики. Обозначения аналогичны рис. 3.

Таблица 2. Основные параметры выборок, участвующих в рассмотрении. Значение M_p посчитаны для ограничения $\kappa \leq 9$ и $e_{cz} \leq 20$ км с⁻¹. В столбцах для каждой системы даны: (1) — имя подвыборки; (2) — количество N_{host} центральных EGIPS-галактик, сформированных в агрегатную группу; (3) — диапазон K -светимости, охватываемый данной подвыборкой; (4) — средняя K -светимость центральных галактик $\langle L_K \rangle_h$; (5) — среднее $\langle cz \rangle$ и (6) — медианное \tilde{cz} красное смещение в системе отсчета реликтового излучения для подвыборки центральных галактик; (7) — количество спутников, N_{sat} , входящих в агрегатную группу; (8) — разброс скоростей спутников относительно центральной галактики, $\sigma^2 = \sum \Delta V_i^2 / N_{\text{sat}}$, где разница скоростей ΔV скорректирована за космологическое уширение $1/(1+z)$; (9) — среднее гармоническое проекционных расстояний спутников от центральной галактики $R_{\text{harm}} = 1/\langle 1/R \rangle$; (10) — усредненная полная светимость группы с учетом вклада спутников $\langle L_K \rangle_g$; (11) — оценка проекционной массы M_p системы, полученная по уравнению (6); (12) — отношение «масса — светимость» M_p/L_K ; (13) — систематическая разница усредненной скорости системы спутников относительно центральной галактики $\langle \Delta cz \rangle$

Name	N_{host}	L_K -range, $10^9 L_\odot$	$\langle L_K \rangle_h$, $10^9 L_\odot$	$\langle cz \rangle$, км с ⁻¹	\tilde{cz} , км с ⁻¹	N_{sat}	σ , км с ⁻¹	R_{harm} , кpc	$\langle L_K \rangle_g$, $10^9 L_\odot$	M_p , $10^{11} M_\odot$	M_p/L_K , M_\odot/L_\odot	$\langle \Delta cz \rangle$, км с ⁻¹
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Full	547		114.0	12861	11605	757	103	84	132.5	23.2 ± 1.1	17.5	0 ± 4
L_1	36	0.28–22.5	12.1	7037	6237	38	47	33	13.3	2.89 ± 0.59	21.7	-10 ± 8
L_2	67	22.5–46.5	35.7	9061	8251	82	66	70	39.4	6.67 ± 0.93	16.9	0 ± 7
L_3	76	46.5–70	58.6	10714	9892	91	90	77	66.2	12.3 ± 1.6	18.6	6 ± 10
L_4	66	70–93	81.5	10554	9938	96	96	83	92.8	17.4 ± 2.2	18.8	3 ± 10
L_5	71	93–113	103.1	12467	12238	94	106	100	117.8	20.3 ± 2.6	17.2	7 ± 11
L_6	68	113–136	125.0	14076	14216	92	118	75	145.5	27.9 ± 3.7	19.2	-15 ± 12
L_7	55	136–166	151.6	14618	14587	88	114	107	179.2	29.8 ± 4.0	16.6	3 ± 12
L_8	51	166–214	188.0	15976	17311	77	108	143	222.4	31.5 ± 4.5	14.2	9 ± 12
L_9	38	214–300	246.1	17254	19521	62	118	123	285.3	35.4 ± 5.7	12.4	-7 ± 15
L_{10}	19	300–440	346.2	18485	20118	37	140	119	415.3	64.3 ± 13.3	15.5	-11 ± 23
Blue	48		29.7	10120	9289	51	64	52	34.0	7.6 ± 1.3	22.5	-9 ± 9

1981, уравнение (22)):

$$\sigma^2(M_p) = \frac{1}{N} \left(\frac{128}{5\pi^2} - 1 \right) \langle M_p \rangle^2. \quad (7)$$

Мы использовали эти соотношения для оценки масс агрегатных групп и их ошибок.

Усредненные свойства центральных галактик и соответствующих агрегатных групп систематизированы в таблице 2. Помимо агрегатных групп, имеющих обозначения от L_1 до L_{10} , в ней приведены усредненные параметры для полной выборки центральных галактик, а также отдельно для «голубой» подвыборки галактик.

Как видно из данных последней колонки таблицы 2 и рис. 6, распределение скоростей спутников относительно центральных галактик оказывается статистически несмещенным.

Прослеживается тесная корреляция между полной светимостью агрегатной группы и ее проекционной массой, показанная на рис. 7. Взаимосвязь между массой и K -светимостью

хорошо описывается линейной зависимостью в логарифмических шкалах

$$\lg M_p = (0.875 \pm 0.028) \lg \langle L_K \rangle_g + (2.59 \pm 0.29). \quad (8)$$

Наклон зависимости на уровне 4σ оказывается меньше единицы.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Используя фотометрию и красные смещения, полученные в обзоре SDSS DR17 (Abdurro'uf et al., 2022) и собранные в базе данных HyperLeda (Makarov et al., 2014), мы выполнили поиск вероятных спутников вокруг галактик, ориентированных с ребра, из каталога EGIPS (Makarov et al., 2022). Искались системы с доминирующей по светимости центральной галактикой: $(M^K - M_{\text{EGIPS}}^K) > 1^m$. В окрестностях 764 EGIPS-галактик с лучевыми скоростями в диапазоне $cz_{\text{LG}} \geq 2000$ и $cz_{\text{CMD}} \leq 30\,000$ км с⁻¹ обнаружено 1097 кандидатов в спутники с проекционными расстояниями

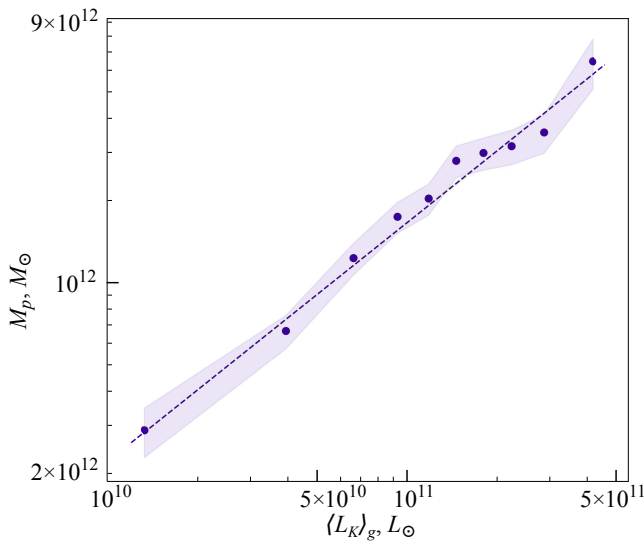


Рис. 7. Зависимость массы агрегатных групп от светимости. Линейная регрессия из уравнения (8) показана штриховой линией. Закрашенные области отмечают интервал 1σ -ошибок оценки массы.

менее 500 кпк и лучевыми скоростями менее 300 км с^{-1} относительно центральной галактики. Из них 757 спутников вокруг 547 центральных галактик имеют точность определения красного смещения лучше 20 км с^{-1} и удовлетворяют критерию гравитационно-связанной системы, что позволяет использовать их для определения физических параметров систем. Популяция спутников имеет типичное проекционное расстояние 84 кпк и среднюю дисперсию скоростей 103 км с^{-1} . Распределение скоростей спутников относительно центральных галактик оказывается статистически несмещенным. Предполагая изотропный характер орбит спутников со средним эксцентриситетом $\langle e^2 \rangle = 1/2$, мы оценили полные (проекционные) массы EGIPS-галактик. В широком интервале светимостей оценки проекционных масс EGIPS-галактик следуют зависимости $M_p \propto \langle L_K \rangle_g^{0.88}$ со средним отношением $(17.5 \pm 0.8) M_\odot / L_\odot$, типичным для близких массивных спиральных галактик (Karachentsev and Kudrya, 2014; Karachentsev and Kashibadze, 2021). Многочисленные работы по исследованию групп галактик выявили, что отношение «масса – светимость» систем растет с их светимостью и массой. Так, Makarov and Karachentsev (2011) по выборке, насчитывающей примерно 11 000 галактик, на шкале Местного Сверхскопления $cz_{LG} \leq 3500 \text{ км с}^{-1}$ нашли зависимость $M \propto L_K^{1.15}$. В их работе подавляющее большинство составили группы со светимостью $L_K \gtrsim 10^{10} L_\odot$ и медианным значением $L_K = 1.2 \times 10^{11} L_\odot$. Однако

при переходе к системам меньшей светимости поведение зависимости кардинально меняется. Изучая ассоциации карликовых галактик, Tully (2005) и Tully et al. (2006) обнаружили, что группы низкой светимости показывают существенно более высокое отношение «масса – светимость» по сравнению с «нормальными» группами. Аналогичный результат был получен в работе Makarov and Uklein (2012). Kouřkchi and Tully (2017) постулировали зависимость $M/L_K \propto L_K^{-0.5}$ для систем со светимостью $L_K < 9.27 \times 10^8 L_\odot$. Изучая близкие группы галактик в Местном Объем на расстояниях менее 11 Мпк, пожалуй наиболее изученной области Вселенной, Karachentsev and Kashibadze (2021) показали, что группы малой светимости хорошо следуют данной зависимости. Переход между зависимостями для групп низкой и высокой светимости происходит при $L_K \simeq 3 \times 10^{10} L_\odot$. Вблизи данной светимости отношение «масса – светимость» достигает своего минимального значения, что указывает на наиболее эффективную трансформацию вещества в звезды для систем данной светимости. Центральные доминирующие галактики групп в нашей работе как раз занимают диапазон светимостей, попадающих в переходную зону. Соотношение (8) и таблица 2 демонстрируют плавный рост отношения «масса – светимость» в область галактик низкой светимости.

В качестве следующего этапа нашей работы мы предполагаем рассмотреть ориентацию и характер движения спутников с учетом направления вращения самих EGIPS-галактик. Такая задача стала актуальна в последнее время в связи с обнаружением планарных структур спутников вокруг Млечного Пути, Туманности Андромеды и других близких массивных галактик (Kroupa et al., 2005; Koch and Grebel, 2006; Ibata et al., 2013; Pawłowski et al., 2015; Tully et al., 2015; Libeskind et al., 2019; Martínez-Delgado et al., 2021), являющимся серьезным вызовом для стандартной космологической модели на масштабах порядка 100 кпк.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ГАЛАКТИКИ, ИСКЛЮЧЕННЫЕ ИЗ РАССМОТРЕНИЯ

Информация о членстве галактик в скоплениях и их лучевой скорости взята из базы данных HyperLeda (Makarov et al., 2014).

- SDSS J000301.88+331036.1, кандидат в спутники EGIPS J000312.06+331118.0, проецируется близко к тесной паре SDSS J000302.29+331032.6 и SDSS J000302.15+331024.6, входящих в скопление галактик. За исключением EGIPS-галактики и кандидата в спутники

- измерения красных смещений отсутствуют для остальных членов скопления, однако очевидно, что скопление реально и эти две галактики являются его членами.
- PGC 1157067 и ее основная галактика EGIPS J011551.3+000848 находятся на периферии скопления ABELL 168. Лучевая скорость относительно центра скопления примерно 1700 км с^{-1} .
 - EGIPS J030718.3–093645 (NGC 1216) и ее кандидат в спутники HCG 023:[dRC97]26, вероятно, являются членами компактной группы HCG023 (Hickson, 1982). Их лучевые скорости отличаются от групповой на 775 и 685 км с^{-1} соответственно.
 - Галактика EGIPS J031922.9+004924 и ее кандидаты в спутники, SDSS J031844.25+005302.5 и PGC 1176312, исключены из рассмотрения из-за возможной связи с группой [BFW2006]MR18_06184 с лучевой скоростью 10949 км с^{-1} .
 - На изображении видно, что галактика EGIPS J074900.3+370942 (ее кандидат в спутники PGC 3128739) взаимодействует с близким компаньоном PGC 021876, у которого нет данных по красному смещению. Разница звездных величин составляет меньше 1^m , так что система не должна была пройти второй этап отбора.
 - EGIPS J075939.3+263309 и ее кандидат в спутники PGC 1781379 находятся на периферии группы IC 486, IC 485, IC 484. Мы исключили ее из рассмотрения, чтобы избежать краевых эффектов, несмотря на довольно большое различие по скоростям, равное 672 км с^{-1} .
 - EGIPS J080613.4+174223 (NGC 2522) со всеми кандидатами в спутники — PGC 1534373, PGC 1536557, PGC 1548640 и SDSS J080627.26+174317.1 — является членом группы USGC U167 (Ramella et al., 2002). Она была пропущена алгоритмом отсева из-за разницы скоростей между галактикой EGIPS J080613.4+174223 и другими известными компаньонами группы USGC U167 выше 300 км с^{-1} .
 - В направлении EGIPS J104046.9–090040 и ее кандидата в спутники PGC 996238 наблюдается разреженная структура галактик с лучевой скоростью 9000 км с^{-1} , близкой к скорости рассматриваемой пары галактик. На дальнем плане находится скопление ABELL 1069.
 - На изображении видно, что галактика EGIPS J155604.4+402747 (ее кандидат в спутники SDSS J155543.93+402703.8) взаимодействует с близким, более ярким компаньоном SDSS J155605.25+402752.8, не имеющим измерений красного смещения. Как следствие, пара была не замечена алгоритмом.
 - Центральный объект EGIPS J160459.5+235812, кандидат в спутники PGC 2567181, является членом скопления AWM 4 (Koranyi and Geller, 2002). Разница лучевых скоростей 1719 км с^{-1} оказалась слишком велика для ассоциации EGIS-галактики со скоплением нашим алгоритмом.
 - Вероятно, что EGIPS J161234.0+253002 (ее кандидат в спутники SDSS J161155.08+253725.8) образует группу со спиральной галактикой SDSS J161212.79+253340.3 сопоставимой светимости. Для последней известно только фотометрическое красное смещение $z_{\text{photo}} = 0.033$ (Bilicki et al., 2014), что не противоречит предположению, что они вместе с галактикой EGIPS J161234.0+253002 образуют связанную систему.
 - EGIPS J171524.2+572101 (NGC 6345) и ее кандидат в спутники PGC 2567181 были исключены из-за возможной связи с группой галактик вокруг NGC 6338, несмотря на большую разницу лучевых скоростей 1737 км с^{-1} .
 - На расположенную в центре галактику EGIPS J225650.8–085803 (ее кандидат в спутники PGC070056) проецируется XLSB-галактика PGC 3441769 примерно сопоставимого размера. Галактики, вероятно, образуют близкую пару.
 - EGIPS J234800.6+272231 вместе с кандидатами в спутники PGC 1809943 и PGC 085775 находятся на периферии скопления ABELL 2666. Лучевая скорость относительно центра скопления 480 км с^{-1} .

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны рецензенту за ценные замечания, позволившие существенно улучшить работу. Мы подтверждаем использование базы данных HyperLeda (<https://leda.univ-lyon1.fr/>). Финансирование Sloan Digital Sky Survey V было предоставлено фондом Альфреда П. Слоана, фондом Хейзинга–Саймонса, Национальным научным фондом и участвующими учреждениями. SDSS выражает признательность за поддержку и ресурсы Центра Высокопроизводительных вычислений университета Юты. SDSS веб-сайт — www.sdss.org. SDSS находится в ведении Астрофизического Исследовательского консорциума учреждений-участников «SDSS Сотрудничество», в том чис-

ле с Института науки Карнеги, Чилийского национального комитета по распределению времени (CNTAC) ратифицированных исследователей, Группы участия Готэма, Гарвардского университета, Гейдельбергского университета, Университета Джонса Хопкинса, Политехнической федеральной школы Лозанны (EPFL), Лейбниц-Института астрофизики Потсдама (AIP), Астрономического Института Макса Планка (MPIA Гейдельберг), Института Макса Планка внеземной физики (MPE), Нанкинского университета, Национальной астрономической обсерватории Китая (НАОС), Университета штата Нью-Мексико, Университета штата Огайо, Университета штата Пенсильвания, Смитсоновской астрофизической обсерватории, Научного института космического телескопа (STScI), Группы участия в звездной астрофизике, Национального университета астрономии Мехико, Университета Аризоны, Университета Колорадо Боулдер, Университета Иллинойса в Урбана-Шампейн, Университета Торонто, Университета Юты, Университета Вирджинии, Йельского и Юньнаньского университетов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дополнительные материалы, представленные онлайн, включают полную версию таблицы 1.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 19-12-00145.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. M. C. Abbott, M. Adamów, M. Agüena, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **255** (2), id. 20 (2021).
2. Abdurro'uf, K. Accetta, C. Aerts, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **259** (2), id. 35 (2022).
3. N. Aghanim et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A6 (2020).
4. J. N. Bahcall and S. Tremaine, *Astrophys. J.* **244**, 805 (1981).
5. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
6. M. Bilicki, T. H. Jarrett, J. A. Peacock, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **210** (1), article id. 9 (2014).
7. S. Bilir, S. Ak, S. Karaali, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **384** (3), 1178 (2008).
8. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al., arXiv e-prints astro/ph:1612.05560 (2016).
9. A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 168 (2019).
10. E. E. Falco, M. J. Kurtz, M. J. Geller, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (758), 438 (1999).
11. M. Fukugita, K. Shimasaku, and T. Ichikawa, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 945 (1995).
12. M. P. Haynes, R. Giovanelli, B. R. Kent, et al., *Astrophys. J.* **861** (1), article id. 49 (2018).
13. P. Hickson, *Astrophys. J.* **255**, 382 (1982).
14. R. A. Ibata, G. F. Lewis, A. R. Conn, et al., *Nature* **493** (7430), 62 (2013).
15. I. Karachentsev and O. Kashibadze, *Astronomische Nachrichten* **342** (999), 999 (2021).
16. I. D. Karachentsev and V. E. Karachentseva, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (3), 3697 (2019).
17. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and Y. N. Kudrya, *Astrophysical Bulletin* **71** (2), 129 (2016).
18. I. D. Karachentsev and Y. N. Kudrya, *Astron. J.* **148** (3), 50 (2014).
19. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63** (4), 299 (2008).
20. V. E. Karachentseva, I. D. Karachentsev, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 341 (2021).
21. A. Koch and E. K. Grebel, *Astron. J.* **131** (3), 1405 (2006).
22. D. M. Koranyi and M. J. Geller, *Astron. J.* **123** (1), 100 (2002).
23. E. Kourkchi and R. B. Tully, *Astrophys. J.* **843** (1), article id. 16 (2017).
24. P. Kroupa, C. Theis, and C. M. Boily, *Astron. and Astrophys.* **431**, 517 (2005).
25. N. I. Libeskind, E. Carlesi, O. Müller, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490** (3), 3786 (2019).
26. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412** (4), 2498 (2011).
27. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, id. A13 (2014).
28. D. Makarov, S. Savchenko, A. Mosenkov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (2), 3063 (2022).
29. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **64** (1), 24 (2009).
30. D. I. Makarov and R. I. Uklein, *Astrophysical Bulletin* **67** (2), 135 (2012).
31. D. Martínez-Delgado, D. Makarov, B. Javanmardi, et al., *Astron. and Astrophys.* **652**, id. A48 (2021).
32. M. J. Meyer, M. A. Zwaan, R. L. Webster, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **350** (4), 1195 (2004).
33. M. S. Pawłowski, B. Famaey, D. Merritt, and P. Kroupa, *Astrophys. J.* **815** (1), article id. 19 (2015).
34. M. Ramella, M. J. Geller, A. Pisani, and L. N. da Costa, *Astron. J.* **123** (6), 2976 (2002).
35. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 103 (2011).
36. K. Shimasaku, M. Fukugita, M. Doi, et al., *Astron. J.* **122** (3), 1238 (2001).

37. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006).
38. J. L. Tonry, C. W. Stubbs, K. R. Lykke, et al., *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 99 (2012).
39. R. B. Tully, *Astrophys. J.* **618** (1), 214 (2005).
40. R. B. Tully, N. I. Libeskind, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophys. J.* **802** (2), article id. L25 (2015).
41. R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **132** (2), 729 (2006).
42. M. Viola, M. Cacciato, M. Brouwer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452** (4), 3529 (2015).
43. R. H. Wechsler and J. L. Tinker, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 435 (2018).
44. D. Zaritsky, R. Smith, C. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **405**, 464 (1993).
45. D. Zaritsky, R. Smith, C. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **478** (1), 39 (1997).
46. D. Zaritsky and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **435**, 599 (1994).
47. A. V. Zasov, A. S. Saburova, A. V. Khoperskov, and S. A. Khoperskov, *Physics Uspekhi* **60** (1), 3 (2017).
48. H. Zou, X. Zhou, X. Fan, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **245** (1), article id. 4 (2019).

Satellites around Edge-on Galaxies. I. Dynamical Masses

D. V. Smirnov¹, D. I. Makarov², and I. D. Karachentsev²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We have undertaken a search for satellites around edge-on galaxies in the EGIPS catalog, which contains 16 551 objects with declinations above -30° . We searched for systems with a central galaxy dominating in brightness by at least 1^m compared to its companions. As a result, we discovered 1097 candidate satellites around 764 EGIPS galaxies with projected distances less than 500 kpc and a radial velocity difference less than 300 km s^{-1} . Of these, 757 satellites around 547 central galaxies have radial velocity accuracies higher than 20 km s^{-1} and satisfy the gravitationally bound condition. The ensemble of satellites is characterized by an average projected distance of 84 kpc and an average radial velocity dispersion of 103 km s^{-1} . Treating small satellites as test particles moving on isotropic orbits around central EGIPS galaxies, we determined the projected (orbital) masses of the edge-on galaxies. Within the luminosity range of 1.3×10^{10} to $42 \times 10^{10} L_\odot$, the total mass of the systems is well described by a linear dependence $\log M_p \propto 0.88 \log \langle L_K \rangle_g$ with an average total mass-to- K -band luminosity equal to $(17.5 \pm 0.8) M_\odot / L_\odot$, which is typical for nearby spiral galaxies such as the Milky Way, M 31 and M 81.

Keywords: *galaxies: groups: general—galaxies: haloes—galaxies: spiral*