

СТРУКТУРА СКОПЛЕНИЙ И ГРУПП ГАЛАКТИК И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ МАСС

© 2015 А. И. Копылов*, Ф. Г. Копылова**

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 8 апреля 2015 года; принята в печать 9 июня 2015 года

Представлены результаты измерения и сравнения масс выборки из 29 групп и скоплений галактик ($z < 0.1$). Для измерения динамических масс по одномерной дисперсии лучевых скоростей для вириализованных областей с радиусом R_{200} и R_e использованы архивные данные SDSS DR7. Разработанный нами метод определения эффективного радиуса систем галактик — по интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра — позволил оценить массы $M_{1/2}$ (в пределах R_e), которые связаны с массами, заключенными в области радиусом R_{200} : $M_{200} \sim 1.65 M_{1/2}$. Сравнение полученных динамических масс и гидростатических масс, измеренных по излучению горячего газа групп и скоплений (из литературы), позволил нам сделать вывод, что для основной выборки из 21 скопления и группы массы согласуются друг с другом в пределах 12%. Для этих систем также выполняется соотношение $M_{X,200} \sim 1.65 M_{1/2}$. Оставшиеся восемь систем галактик всей выборки, в основном расположенных в области сверхскопления Hercules, показывают несоответствие масс с отклонениями от среднего до 2σ . Вероятнее всего, это связано с незавершенностью процессов формирования этих скоплений галактик путем иерархического слияния в области богатого сверхскопления Hercules.

Ключевые слова: галактики: скопления — галактики: группы

1. ВВЕДЕНИЕ

Скопления галактик — наиболее крупные гравитационно связанные структуры во Вселенной. Около 80–90% их массы составляет скрытое вещество, оставшаяся масса представлена барионами, основную часть которых (10–20%) составляет диффузная горячая плазма с $T > 10^7$ К (это основная компонента внутренней среды скоплений галактик), которая излучает преимущественно в рентгеновской области. На долю галактик приходится всего несколько процентов массы. Функция масс скоплений галактик чувствительна к космологическим параметрам, поэтому существует проблема измерения их точных масс [1]. Для измерения масс скоплений галактик существует разные методы с разной степенью точности. Динамические методы связаны с дисперсией лучевых скоростей галактик: массы систем галактик определяются при выполнении условия вириального равновесия (например, [2–4]). Другой метод связан с излучением горячего газа скоплений в рентгеновской области, массы систем галактик определяются в предположении гидростатического равновесия и

сферической симметрии (например, [5–7]). Без дополнительных предположений определяются массы скоплений галактик по гравитационному линзированию излучения галактик, расположенных позади них (например, [8]), но полученные массы зависят от ориентации систем относительно луча зрения. Метод каустик, связанный с распределением галактик в пространстве красных смещений и скоростью отрыва галактики от скопления [9], также применяется без дополнительных условий. Полная масса скоплений и групп галактик в пределах радиуса R_0 , отделяющего их от глобального космического расширения, измеряется в предположении, что скопление имеет сферическую симметрию, и тангенциальные движения галактик на его периферии незначительны [10].

Целью данной работы является измерение динамических масс 29 скоплений и групп галактик разными методами, сравнение их между собой и с массами, полученными по излучению газа в рентгеновской области спектра. Полная исследуемая нами выборка состоит из 148 скоплений и групп галактик, принадлежащих большому сверхскоплению, двойным системам и полю в диапазоне $0.02 < z < 0.1$. В данной работе мы представляем результаты по скоплениям, имеющим измерения масс по излучению горячего газа в рентгеновской

*E-mail: akop@sao.ru

**E-mail: flera@sao.ru

Таблица 1. Физические свойства групп и скоплений галактик в пределах радиуса R_{200}

Cluster	z_h	N_z	R_{200} , Mpc	σ_c , km s $^{-1}$	M_{200} , $10^{14} M_\odot$	$L_{K,200}$, $10^{12} L_\odot$	$M_{X,200}$, $10^{14} M_\odot$	$L_{K,X200}$, $10^{12} L_\odot$	References
Virgo	0.003821	132	1.63	661	4.99 ± 1.31	6.12	1.46	3.26	[5]
A 1656	0.023282	681	2.26	924	13.52 ± 1.49	16.69	11.90 ± 1.95	16.72	[7, 17]
MKW 08	0.026906	103	1.10	450	1.56 ± 0.46	3.16	1.91 ± 0.30	3.31	[7, 17, 18]
UGC 05088	0.027622	13	0.60	247	0.26 ± 0.22	0.52	0.22 ± 0.08	0.53	[19]
NGC 6338	0.029342	83	1.35	552	2.87 ± 0.94	2.82	0.92 ± 0.12	2.25	[5, 18, 19]
A 2199	0.030458	288	1.82	746	7.09 ± 1.25	10.13	3.78 ± 0.59	9.04	[5, 7, 17, 20]
AWM 4	0.031827	37	0.93	380	0.94 ± 0.46	1.53	1.67	1.56	[20]
A 1177	0.032159	26	0.82	337	0.65 ± 0.35	1.23	0.86 ± 0.12	1.35	[18, 19]
A 2063	0.034664	146	1.83	753	7.28 ± 1.80	6.12	3.27 ± 0.32	5.51	[5, 7, 17, 20]
A 2052	0.034726	116	1.52	623	4.12 ± 1.15	4.96	2.89 ± 0.28	4.80	[5, 7, 17, 20, 21]
AWM 5	0.035043	52	1.29	528	2.51 ± 1.04	4.02	0.98 ± 0.24	3.52	[18, 19]
A 2147	0.036179	344	2.08	853	10.57 ± 1.71	13.00	2.88 ± 0.58	9.84	[7, 17]
A 2151	0.036378	255	1.78	734	6.74 ± 1.27	12.15	1.66 ± 0.07	8.00	[7, 17]
NGC 5098	0.036812	58	1.08	445	1.50 ± 0.59	2.88	0.25 ± 0.03	1.97	[19, 22]
A 1139	0.039327	80	1.12	459	1.64 ± 0.55	3.68	1.24	3.40	[19]
A 1983	0.044803	97	1.12	460	1.65 ± 0.51	4.98	1.59	4.96	[23]
MKW 03s	0.044953	82	1.47	608	3.81 ± 1.26	4.68	2.79 ± 0.25	4.25	[5, 7, 17, 20, 21]
RXCJ 1022	0.054163	59	1.33	551	2.83 ± 1.11	4.43	0.98 ± 0.16	3.25	[18, 19]
A 1991	0.058463	79	1.33	554	2.87 ± 0.96	6.40	1.77 ± 0.08	5.19	[6, 19, 23]
A 1795	0.062444	123	1.86	775	7.83 ± 2.12	9.00	9.60 ± 0.65	9.05	[5–7, 17, 20, 21]
A 1275	0.062750	22	0.84	348	0.71 ± 0.51	1.93	0.94	1.98	[19]
A 2092	0.066564	37	1.17	486	1.93 ± 0.88	3.28	1.29	3.06	[19]
A 2065	0.072211	210	2.64	1104	22.53 ± 4.29	20.31	13.94 ± 2.75	18.11	[7, 17]
A 0744	0.072812	19	1.05	440	1.43 ± 0.98	2.89	1.43	2.25	[19]
A 1238	0.074111	61	1.29	541	2.65 ± 1.01	6.01	1.72	5.48	[19]
A 1775B	0.075138	62	1.39	581	3.28 ± 1.25	6.00	4.20 ± 0.02	6.61	[7, 17]
A 1800	0.075321	67	1.68	705	5.86 ± 2.14	8.22	5.82 ± 0.13	8.22	[7, 17]
A 2029	0.078145	180	2.50	1046	19.11 ± 4.28	23.58	12.17 ± 0.65	18.76	[5–7, 17, 20]
A 2142	0.090135	191	2.28	963	14.82 ± 3.23	26.48	13.92 ± 0.79	26.44	[5, 7, 17]

области (из литературы). Работа выполнена нами с привлечением данных каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey) и каталога 2MASS XSC (Two Micron All Sky Survey Extended Source Catalog).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны измерения динамических масс скоплений галактик: массы M_{200} в пределах радиуса R_{200} , массы $M_{1/2}$ в пределах эффективного радиуса R_e . В разделе 3 описаны измерения масс $M_{X,200}$ скоплений галактик по излучению горячего газа в них. В разделе 4 проанализированы полученные результаты. В заключение 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. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАСС ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

2.1. Измерение массы M_{200}

Составленная нами выборка из 29 скоплений и групп галактик имеет красные смещения в диапазоне $0.003 < z < 0.1$. Обычно системы галактик разделяют на группы и скопления согласно их массам или дисперсиям лучевых скоростей σ галактик. Например, в [11] по данным SDSS найдено, что у групп галактик с числом членов $N_{\text{gal}} \geq 10$ дисперсии лучевых скоростей не превышают 400 км с^{-1} , то есть их массы не больше $10^{14} M_\odot$. В нашей выборке несколько систем галактик: A 1177, A 1275, AWM 4, UGC 05088 — имеют параметры, характерные для групп. Для галактик мы использовали спектральные данные, представленные в каталоге SDSS (Data Release 7, [12]) и дополнили их данными из NASA Extragalactic Database (NED). Динамические массы скоплений галактик определялись по дисперсии лучевых скоростей галактик в предположении, что они находятся в вириальном равновесии. В работе [13] получен эмпирический радиус скопления R_{200} из вириального ($R_{200} < R_{\text{vir}}$), который предсказывается дисперсией лучевых скоростей галактик при выполнении условия $M(r) \propto r$. В пределах этого радиуса плотность в скоплении превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз, и его можно оценить по формуле $R_{200} = \sqrt{3}\sigma/(10H(z)) \text{ Мпк}$. Тогда, предполагая, что в пределах этого радиуса скопление вириализовано, находим массу $M_{200} = 3G^{-1}R_{200}\sigma^2$, где σ — дисперсия лучевых скоростей галактик, расположенных в пределах радиуса R_{200} , G — гравитационная постоянная. Таким образом, измеряемая нами масса скопления $M_{200} \propto \sigma^3$. Полученная масса меньше полной M_{vir} , поскольку и при $R_{100} \sim 1.3 R_{200}$ скопления вириализованы

(например, [14]). Таким образом, сначала мы оценили среднюю лучевую скорость скопления $\langle cz \rangle$ и ее дисперсию σ , потом по дисперсии — радиус R_{200} . Затем нашли количество галактик в пределах этого радиуса, снова определили $\langle cz \rangle$, σ , R_{200} , и так далее. Двигаясь от центра скопления, итеративным способом мы нашли дисперсию лучевых скоростей галактик и другие параметры скоплений в пределах данного радиуса. Галактики со скоростями больше 2.7σ (например, [15]) считались фоновыми, обычно критерии отбора варьируют от 2.5σ до 3.0σ .

Согласно модельным расчетам [16], при вычислении вириальных масс скоплений галактик в пределах определенных радиусов (например, гармонического) надо вводить поправку за то, что не все члены системы оказались в пределах этого радиуса. В то же время в применяемой нами методике вычисления массы по дисперсии лучевых скоростей галактик эту поправку в вычисляемые массы вводить не надо. Дисперсия лучевых скоростей скоплений галактик может быть как недооценена так и переоценена в зависимости от групп галактик, которые проецируются вдоль луча зрения на изучаемое скопление.

Чтобы детальнее охарактеризовать структуру и кинематику каждого из скоплений, а также ее ближайших окрестностей, на рис. 1 и 2 (в качестве примера) для скоплений галактик Virgo и NGC 5098 представлены следующие диаграммы.

- (1) Разброс лучевых скоростей членов скопления и галактик, отнесенных к фону, в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления).
- (2) Интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса для наглядного выявления плотного ядра скопления, более разреженного гало и внешней области, где распределение выходит на линейную зависимость в выбранных координатах, т.е. наблюдается однородное в среднем распределение галактик окружения.
- (3) Расположение галактик в картинной плоскости в экваториальных координатах.
- (4) Гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса R_{200} (для нее сплошной линией показана функция Гаусса, соответствующая дисперсии лучевых скоростей скоплений из таблицы 1). Штриховой линией показана функция Гаусса только для галактик, расположенных на гистограмме в выделенном пике. О них подробнее будет сказано в следующем пункте. Галактики ранних типов отобраны по характеризующим их параметрам SDSS в фильтре r : $\text{fracDeV} \geq 0.8$, где fracDeV показывает вклад балджа в профиль поверхностной яркости

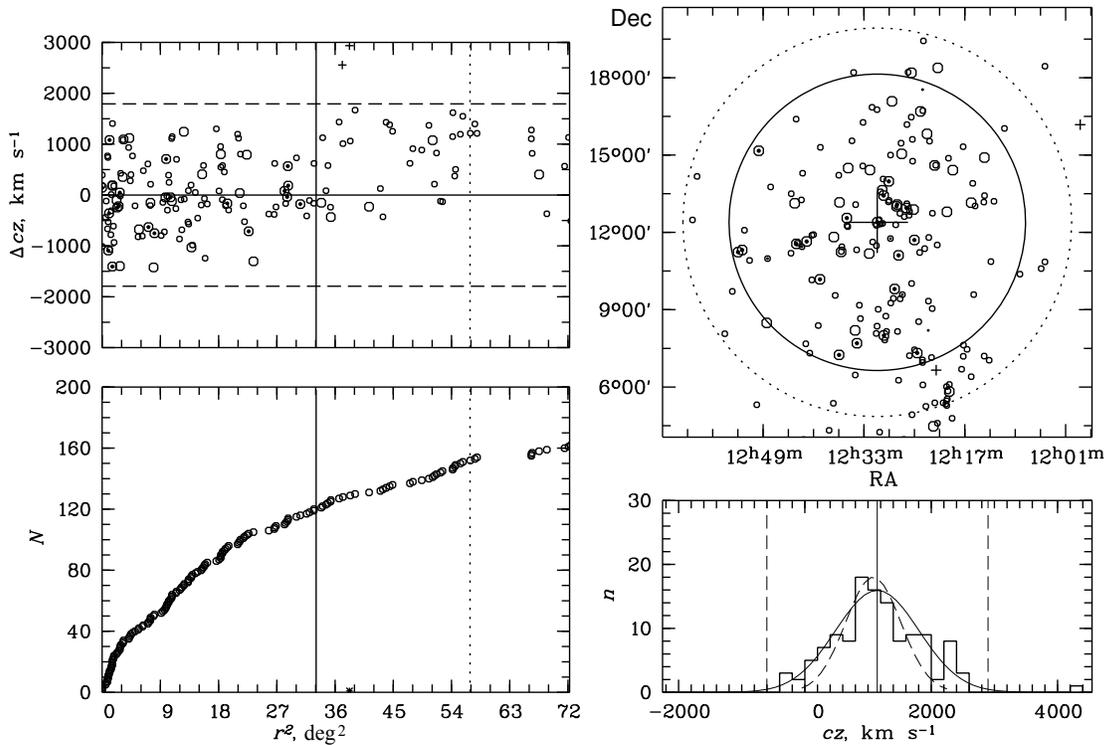


Рис. 1. Распределение галактик в скоплении Virgo ($M_K < -21^m$). На левой верхней панели показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса R_{200} . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$, вертикальной сплошной линией отмечен радиус R_{200} , пунктирной — радиус Эйбелла (2.14 Мпк). Кружками большего размера отмечены галактики ярче $M_K^* + 1 = -23^m.97$, кружками с точкой внутри — галактики ранних типов, плюсами — галактики заднего фона, крестиками — галактики переднего фона. На левой нижней панели дано интегральное распределение полного числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на левом верхнем рисунке, звездочки — галактикам фона. На правой верхней панели показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на верхнем левом рисунке (обозначения те же). Кругами обозначены радиус R_{200} (сплошная линия) и радиус Эйбелла (пунктир). Большим крестом отмечен центр скопления. На правой нижней панели представлено распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса R_{200} (сплошной линией показана гауссиана для членов скопления, соответствующая σ скопления). Штриховая линия показывает гауссиану, соответствующую значению σ , вычисленному по $M_{X,200}$. Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые линии соответствуют отклонениям $\pm 2.7\sigma$.

галактики; $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$, где $c = r_{90}/r_{50}$ — индекс концентрации, равный отношению радиусов, ограничивающих 90% и 50% потоков Петросяна. Кроме того, мы сделали ограничения по цвету: $\Delta(u - r) > -0.2$. На рисунках эти галактики помечены точкой внутри круга.

Измеренные нами массы M_{200} скоплений и групп галактик в областях сверхскоплений Ursa Major, Leo, Hercules, а также четырех бимодальных скоплений с максимальной разницей лучевых скоростей (примерно 3000 км с^{-1}) даны в работах [24–30]. Кроме того, в перечисленных работах и в данной работе нами получены инфракрасные (ИК) светимости систем галактик по галактикам с $M_K < -21^m$ в фильтре K_s 2MASS-каталога протажженных объектов.

Результаты измерений характеристик исследуемых в данной работе скоплений галактик для области радиусом R_{200} представлены в таблице 1: имя скопления, гелиоцентрическое красное смещение, количество галактик с измеренными красными смещениями ($r_{\text{pet}} < 17^m.77$), радиус R_{200} в Мпк, σ_c — дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1}$, масса M_{200} , ИК-светимость $L_{K,200}$ ($M_K < -21^m$), масса $M_{X,200}$, полученная по излучению газа скоплений в рентгеновской области (как правило пересчитанная из $M_{X,500}$), ИК-светимость $L_{K,X200}$ ($M_K < -21^m$), подсчитанная для массы $M_{X,200}$ по приведенным выше формулам. В последнем столбце приведены ссылки на работы, из которых взяты измерения масс $M_{X,200}$. Ошибки измерения M_{200} и L_K соответствуют ошибкам измерения σ_c (в дальнейшем

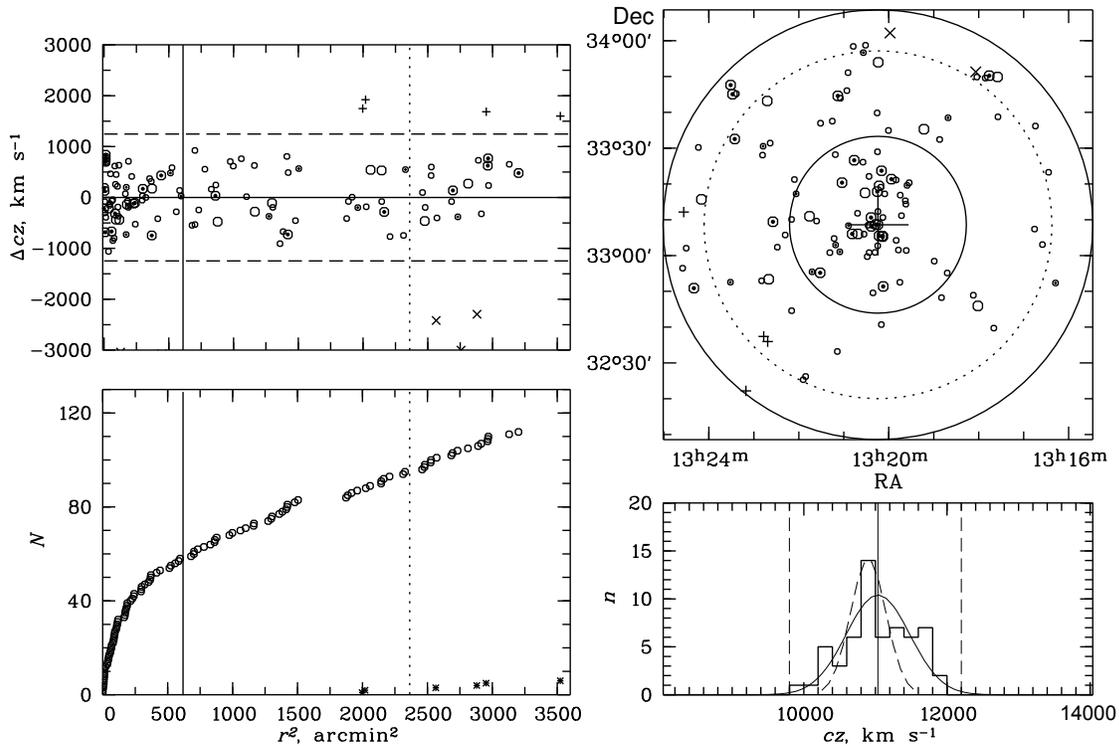


Рис. 2. Распределение галактик в NGC 5098. Структура и обозначения на рис. 1 и 2 одинаковые. Область исследования ограничена кругом радиусом 95' (сплошная линия).

просто σ), при этом ошибки измерения L_K незначительны. Если у нас имеется только одно измерение $M_{X,200}$, то в таблице нет ошибок измерения, в остальных случаях ошибки измерения $M_{X,200}$ соответствуют ошибкам среднего.

2.2. Измерение массы $M_{1/2}$

В работе [31] показано, что для сфероидальных галактик (в том числе для ярчайших галактик скоплений) с измеренной дисперсией лучевых скоростей массу можно определить для характеристического радиуса, примерно равного 3D-радиусу галактики, в пределах которого содержится половина ее светимости. В результате измеряется невириальная масса галактики, которая не зависит от анизотропии дисперсии скоростей звезд [32] и которая равна $M_{1/2} = 3G^{-1} \sigma_{1/2}^2 r_{1/2}$, где $r_{1/2} = 4/3R_e$ (R_e — эффективный радиус, в пределах которого излучается половина светимости галактики), G — гравитационная постоянная, σ — дисперсия лучевых скоростей звезд в галактике. Поскольку для скоплений галактик, как и для сфероидальных галактик, существует «фундаментальная плоскость», определяемая дисперсией лучевых скоростей систем галактик, радиусом и полной светимостью [33], мы решили измерить

массы $M_{1/2}$ групп и скоплений по предлагаемой в [32] методике, основываясь только на параметрах систем галактик, полученных из наблюдений. Такой же простой метод оценки массы галактик ранних типов (и скоплений галактик [34]) в пределах радиуса R_{sweet} , близкого к эффективному R_e , предложен в работе [35]. В этом методе используются наблюдательные данные — поверхностная яркость звезд или галактик и дисперсия их лучевых скоростей вдоль луча зрения.

Для того, чтобы определить эффективный радиус R_e группы или скопления галактик, сначала необходимо найти полную светимость системы. В работах [28–30] мы определили инфракрасную светимость скоплений галактик. Для этого мы использовали результаты фотометрии галактик, представленные в окончательной версии каталога 2MASS для протяженных объектов (XSC [36]). Фотометрический предел этого каталога мы увеличили до $K_s = 14^m7 - 15^m0$ с учетом зависимости $(r - K)$ цвета галактики от приведенного в SDSS $(u - r)$ цвета. Для того, чтобы найти эффективный радиус скопления галактик, на котором его ИК-светимость равна половине, мы применили схему, показанную графически. Основное отличие применяемого нами метода от аналогичных заключается в том, что мы рассматриваем интегральное распределение числа галактик (профиль систем галактик)

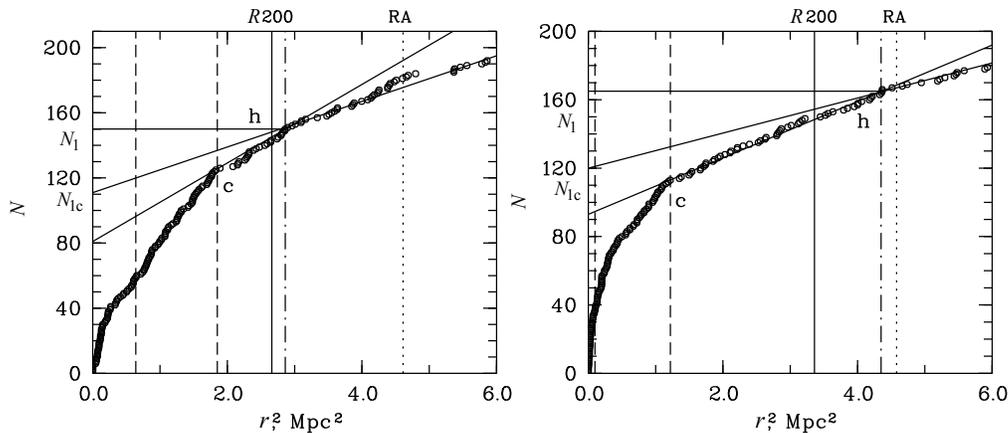


Рис. 3. Интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скоплений галактик Virgo (слева) и A 2063 (справа). Сплошной вертикальной линией показан радиус R_{200} , пунктирной — радиус Эйбелла R_A . Штрихпунктирной линией отмечен радиус R_h , ограничивающий скопление: ядро (с) и гало (h); штриховой — R_c и R_e . N_1 и N_{1c} — количество галактик в пределах радиуса R_h до и после вычитания фона. Две сплошные линии показывают ход распределения галактик в пределах гало групп и скоплений и ход распределения галактик, не входящих в гало.

в зависимости квадрата радиуса от центра. На наш взгляд, это — простое и возможно даже грубое представление профиля скопления галактик, но извлеченное из наблюдений. Теоретически обосновать подобное представление скоплений галактик мы не смогли. На рис. 3 приведено интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скоплений Virgo (слева) и A 2063 (справа). Такое распределение мы построили для всех изучаемых систем галактик и эмпирически нашли, что все скопления имеют в центральной области крутой рост числа галактик (ядро), затем наблюдается линейный рост числа галактик, расположенных в гало вокруг скопления, и, наконец, если скопление достаточно изолированно, — линейный рост числа галактик, расположенных практически в поле. Буквами с и h на рисунке обозначены радиусы выделенных нами областей скоплений (ядро и гало).

На рис. 4 приведены распределения для остальных скоплений галактик. Анализ рисунков позволяет сделать вывод, что основная часть галактик скопления расположена в его центральной области, ограниченной радиусом R_h . Наша задача — выделить эту область (фактически выделить само скопление), найти количество галактик в ней с учетом фона, подсчитать их ИК-светимость так же с учетом фона и оценить эффективный радиус скопления. Как показано на рис. 3, в пределах радиуса R_h 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 $N_{1c} = N_1 - \pi R_h^2 \Sigma^N$, где плотность галактик (в

области R_h) равна $\Sigma^N = (N_1 - N_{1c})/(\pi R_h^2)$. Для полученных галактик мы измерили ИК-светимость $L_{1c} = L_1/N_1 N_{1c}$ и нашли эффективный радиус скопления, на котором светимость равна половине. Надо отметить, что для групп галактик AWM 04 и A 1177 (типа «остаточной группы») с очень яркой галактикой в центре этот метод не подходит. В этом случае мы вычитали светимость ярчайшей галактик из полной светимости группы при определении эффективного радиуса. Если находить этот радиус по описанной методике как радиус скопления, на котором количество галактик уменьшается в два раза, проблем не возникает. Известно, что между числом галактик в пределах радиуса R_{200} и их ИК-светимостью существует практически линейная зависимость [37].

В таблице 2 представлены параметры скоплений и групп галактик (аналогичные таблице 1) для области с эффективным радиусом R_e , содержащем половину их L_K светимости: гелиоцентрическое красное смещение, количество галактик с измеренными красными смещениями ($r_{\text{pet}} < 17^m 77$), радиус ядра R_c , радиус гало R_h , радиус R_{e1} , вычисленный на $L_K/2$, радиус R_{e2} , вычисленный на $N/2$, дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой $(1+z)^{-1} - \sigma_c$, масса $M_{1/2}$, ИК-светимость $L_{K,1/2}$ (для $K \leq 15^m$). Светимости скоплений галактик определены в проекции, в цилиндрах.

2.3. Измерение массы $M_{X,200}$

В скоплениях галактик основная барионная компонента представлена горячей плазмой, рас-

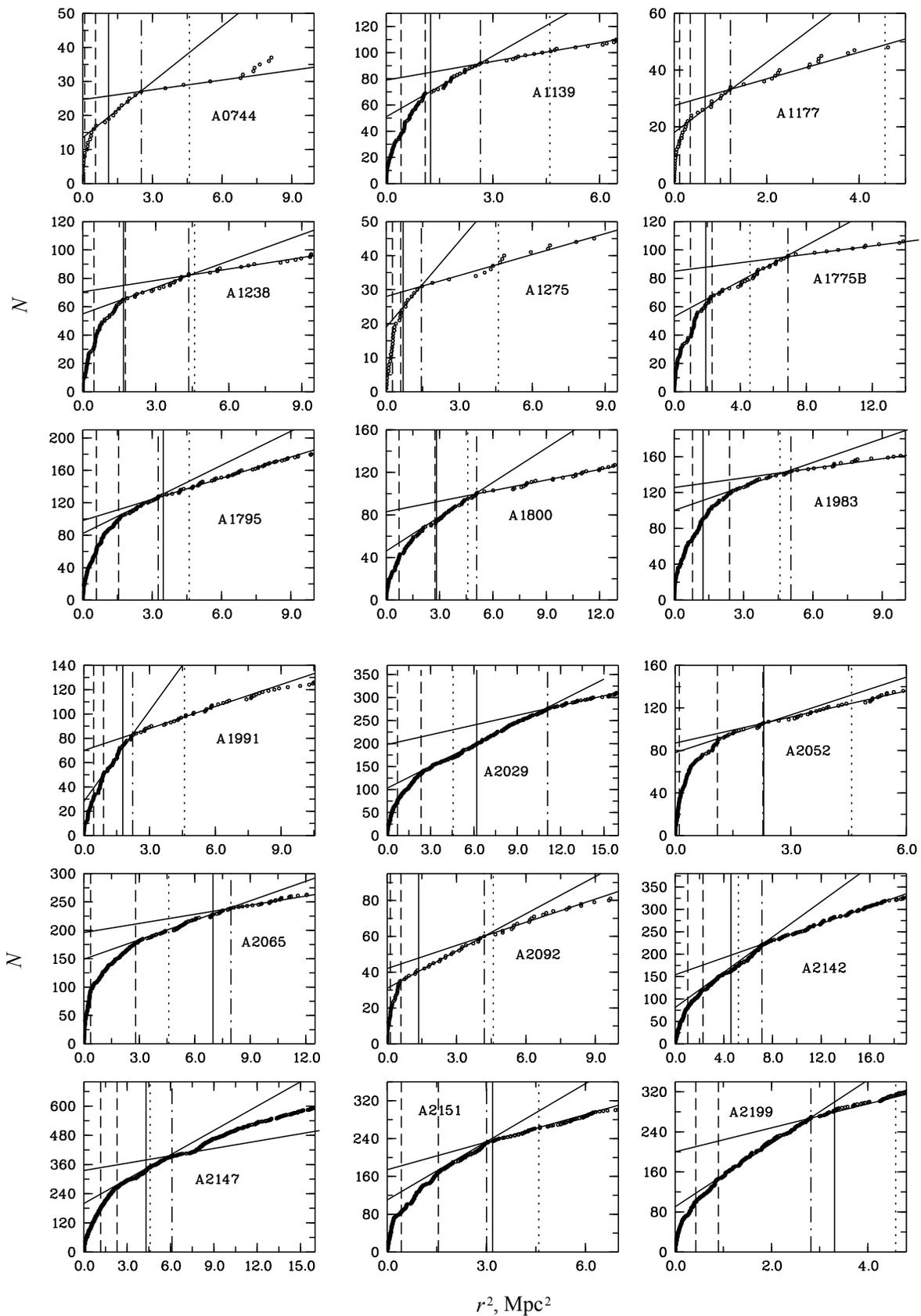


Рис. 4. Интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скоплений и групп.

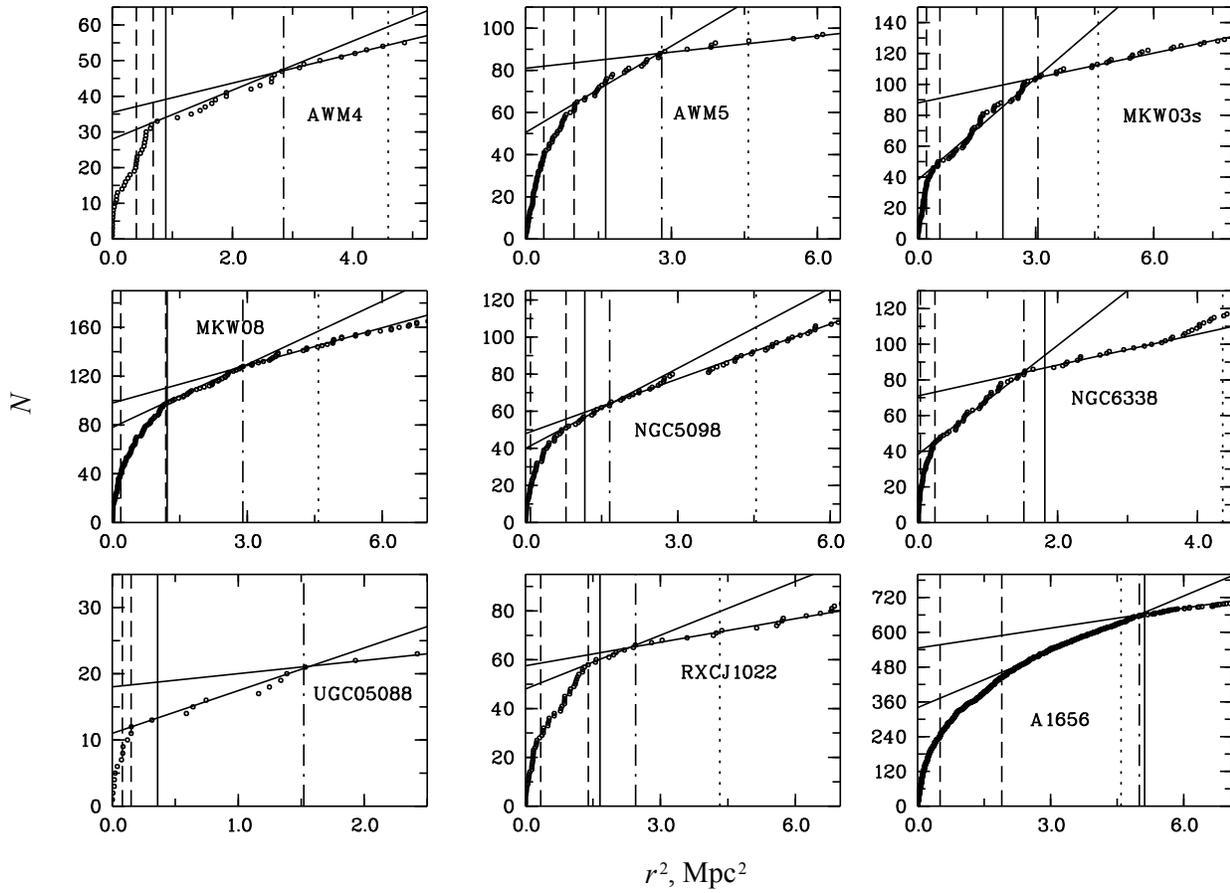


Рис. 4. (Продолжение)

пределение массы которой в пределах их вириализованных областей можно изучить по излучению в рентгеновской области. Это наблюдаемое излучение в сочетании с аналитическими моделями позволяет построить распределение плотности газа и его температурный профиль вдоль радиуса скопления. Полученные данные используются при оценке массы скопления в пределах радиуса r из уравнений гидростатического равновесия [6]:

$$M(< r) = -3.68 \times 10^{13} M_{\odot} T(r) r \times \left(\frac{d \lg \rho_g}{d \lg r} + \frac{d \lg T}{d \lg r} \right), \quad (1)$$

где T — температура, а ρ_g — плотность газа.

Измеренные таким образом массы исследуемых групп и скоплений, в основном для области радиусом R_{500} и пересчитанные нами для области R_{200} ($M_{200} = 1.4 M_{500}$), взяты нами из литературы. Они приведены в таблице 1 со ссылками на источники. В таблице приведены ошибки среднего, если в литературе было найдено несколько измерений.

3. СРАВНЕНИЕ МАСС СКОПЛЕНИЙ И ГРУПП ГАЛАКТИК, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

Нами получено, что масса вириализованной области скоплений галактик в пределах радиуса R_{200} , вычисленная по дисперсии лучевых скоростей галактик, примерно равна массе в пределах эффективного радиуса, умноженной на 1.65. Эта зависимость имеет вид

$$\lg M_{200} = 1.05(\pm 0.01) \lg(1.65 M_{1/2}) - 0.71(\pm 0.19)$$

и показана на рис. 5. Она представляет собой среднее между прямой и обратной регрессиями, в которых независимые переменные меняются местами. Среднеквадратичное отклонение σ для зависимости равно 0.17. На рисунке штрихпунктирными линиями показаны 2σ -отклонения от средней (штриховой) линии. Коэффициент 1.65 подобран так, чтобы средняя разница масс $\lg M_{200}$ и $\lg(1.65 M_{1/2})$ скоплений галактик была близка к минимальному значению. Мы получили для нашей выборки $\lg M_{200} - \lg(1.65 M_{1/2}) = 0.02 \pm 0.03$.

Поскольку масса звездного населения скоплений галактик наилучшим образом отслеживается по их ИК-светимости, мы привели на рис. 6 регрессионные зависимости, полученные таким же образом, как на рис. 5, между массой в пределах радиуса R_{200} , измеренной по одномерной дисперсии лучевых скоростей (слева) и измеренной по излучению газа в рентгеновской области (справа), и ИК- светимостью скоплений галактик, полученной при условии $M_K < -21^m$. Причем для $M_{X,200}$ мы вычислили соответствующие R_{200} , N_{200} и ИК-светимость (приведена в таблице 1). Регрессионные зависимости имеют вид:

$$\lg M_{200} = 1.19(\pm 0.01) \lg L_K - 0.64(\pm 0.15),$$

$$\lg M_{X,200} = 1.23(\pm 0.02) \lg L_K - 1.25(\pm 0.24).$$

Среднеквадратичные отклонения зависимостей равны 0.13 и 0.22. Как видно из рисунка, больший разброс в зависимости $\lg M_{X,200} - \lg L_K$ (в 1.2 раза), вызван в основном отклонениями $\lg M_{X,200}$ (масс) скоплений A2151 и NGC 5098, так как их ИК-светимости оцениваются довольно точно, и отклонением группы AWM4 («остаточной группы»), у которой светимость гигантской cD-галактики, видимо, недооценена. Полученный разброс в зависимости $\lg M_{200} - \lg L_K$ (в среднем 30%) позволяет в первом приближении оценить массы систем галактик, причем предполагается, что отклонения от зависимости вызваны в основном неопределенностью динамического состояния систем (например, [3]), которая влияет на точность определения массы. Кроме того, дисперсия лучевых скоростей скоплений может возрастать с уменьшением светимости галактик или наличием большого количества галактик с эмиссионными линиями. Полная светимость скопления, как отмечено в работе [3], также может быть недооценена: например, из-за недооценки светимости cD-галактик или недооценки светимости звезд между галактиками. Для исследуемой нами выборки мы нашли, что дисперсия лучевых скоростей систем галактик не возрастает с уменьшением светимости галактик.

Ранее между инфракрасной светимостью 93 скоплений галактик (фактически между массой звезд галактик), измеренной по их светимости в фильтре K , и полной гидростатической массой была найдена корреляция с рассеянием приблизительно 32% [38]. Кравцов и др. [39] прокалибровали эту зависимость для 21 скопления галактик и нашли, что между полной звездной массой, основанной на SDSS-фотометрии, и полной гидростатической массой гало скоплений существует зависимость с аналогично крутым наклоном приблизительно 0.6 ± 0.1 и разбросом примерно 29%. Андреев [40]

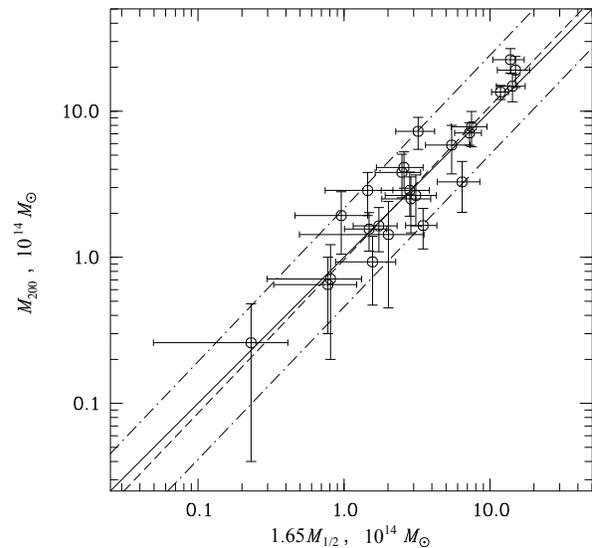


Рис. 5. Сравнение масс скоплений и групп галактик, расположенных в пределах радиуса R_{200} , с массой, заключенной в пределах эффективного радиуса R_e . Сплошная линия соответствует линейной зависимости. Регрессионное соотношение показано штриховой линией ($M_{200} \propto 1.65 M_{1/2}^{1.05 \pm 0.01}$). Штрихпунктирные линии демонстрируют отклонения в 2σ . Ошибки масс соответствуют ошибкам измерения дисперсии лучевых скоростей систем галактик.

по оптическому излучению галактик ранних типов (данные SDSS) в скоплениях определил массу их звезд и нашел хорошее согласие с гидростатическими массами с незначительным разбросом. Он также указал на возможность оценки масс звезд скоплений в ИК-области для будущих обзоров.

На рис. 6 для некоторых систем галактик не указаны ошибки измерения массы, поскольку в литературе было только одно измерение. То есть на правом рисунке ошибки измерения массы зависят от количества измерений, а на левом — от ошибки измерения дисперсии лучевых скоростей. Анализ рисунков позволяет сделать вывод, что у обеих зависимостей в пределах ошибок практически одинаковые наклоны, хотя они имеют разный разброс.

На рис. 7 мы сравнили массы: слева — $M_{X,200}$ и M_{200} , справа — $M_{X,200}$ и $1.65 M_{1/2}$. Регрессионные зависимости имеют вид:

$$\lg M_{X,200} = 1.01(\pm 0.02) \lg M_{200} - 0.39(\pm 0.30),$$

$$\lg M_{X,200} = 1.06(\pm 0.02) \lg(1.65 M_{1/2}) - 1.10(\pm 0.31).$$

Большая часть скоплений галактик располагается на линии (сплошная линия на левом рисунке), представляющей собой линейную зависимость между массами, и средние разницы масс равны:

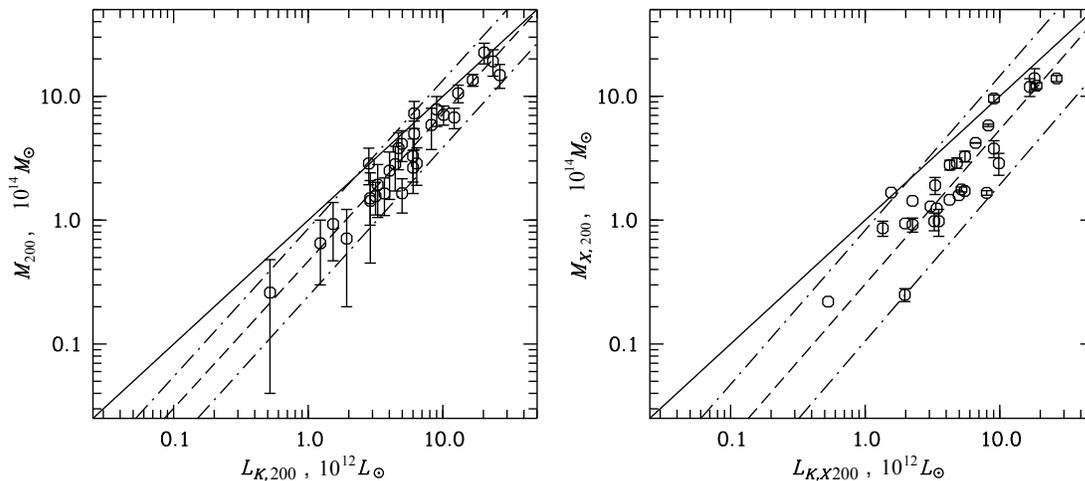


Рис. 6. Зависимость массы скоплений и групп M_{200} , измеренной по дисперсии лучевых скоростей галактик (слева) и по излучению газа в рентгеновской области (справа), от K -светимостей $L_{K,200}$ и $L_{K,X,200}$, полученных по галактикам ярче $M_K = -21^m$, расположенным в пределах соответствующих вириализованных радиусов R_{200} , представленных в таблице 1. Сплошная линия соответствует линейной зависимости. Регрессионные соотношения показаны штриховой линией ($M_{200} \propto L_K^{1.19 \pm 0.01}$ — слева, $M_{200} \propto L_K^{1.23 \pm 0.02}$ — справа). Штрихпунктирные линии демонстрируют отклонения в 2σ . Ошибки масс на левом рисунке соответствуют ошибкам измерения дисперсии лучевых скоростей систем галактик, на правом рисунке — ошибкам среднего.

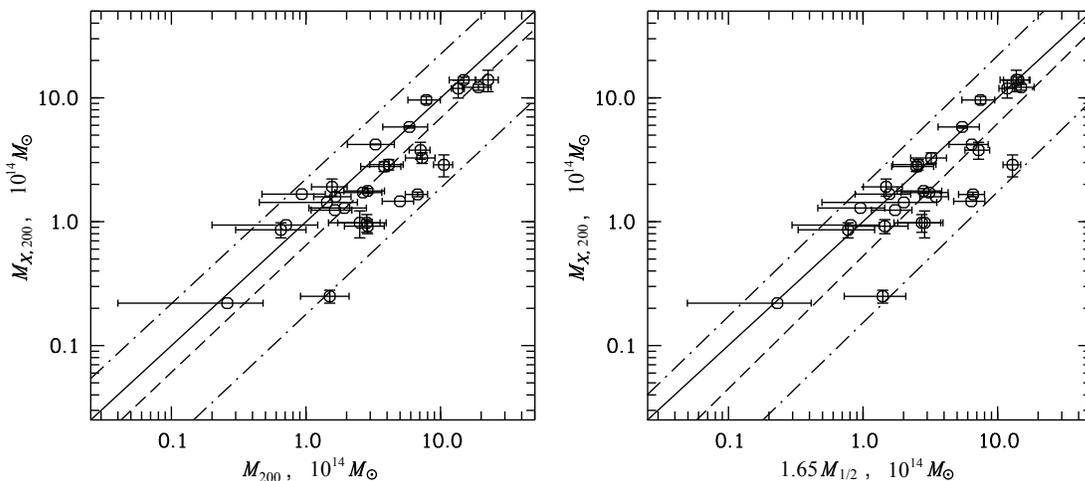


Рис. 7. Зависимость массы скоплений и групп галактик $M_{X,200}$, измеренной по излучению газа в рентгеновской области от массы, измеренной по дисперсии лучевых скоростей галактик (слева — в области радиусом R_{200} , справа — в области радиусом R_e). Сплошная линия соответствует линейной зависимости. Регрессионные соотношения показаны штриховой линией ($M_{X,200} \propto M_{200}^{1.01 \pm 0.02}$ — слева, $M_{X,200} \propto 1.65 M_{1/2}^{1.06 \pm 0.02}$ — справа). Штрихпунктирные линии демонстрируют отклонения в 2σ . Ошибки масс M_{200} и $1.65 M_{1/2}$ соответствуют ошибкам измерения дисперсии лучевых скоростей систем галактик, ошибки масс $M_{X,200}$ — ошибкам среднего.

$$\lg M_{X,200} - \lg M_{200} = -0.18 \pm 0.05,$$

$$\lg M_{X,200} - \lg(1.65 M_{1/2}) = -0.17 \pm 0.05.$$

Разница масс восьми систем галактик: A 2063, AWM 5, NGC 5098, A 2147, A 2151, NGC 6338, RXCJ 1022, Virgo — значительна, и отклонения от среднего достигают 2σ (штрихпунктирные линии на рисунках). Если их отбросить, то динамические и

гидростатические массы оставшихся 21 скопления и группы галактик согласуются друг с другом в пределах 12%, то есть

$$\lg M_{X,200} - \lg M_{200} = -0.05 \pm 0.03,$$

$$\lg M_{X,200} - \lg(1.65 M_{1/2}) = -0.05 \pm 0.03.$$

Медианная ошибка определения динамической

Таблица 2. Физические свойства групп и скоплений галактик в пределах радиуса R_e

Cluster	z_h	N_z	$R_c,$ Mpc	$R_h,$ Mpc	$R_{e1},$ Mpc	$R_{e2},$ Mpc	$\sigma_c,$ km s ⁻¹	$M_{1/2},$ 10 ¹⁴ M_\odot	$L_{K,1/2},$ 10 ¹² L_\odot
Virgo	0.003578	59	1.36	1.69	0.802	0.893	721 ± 94	3.87 ± 1.01	2.42
A 1656	0.023130	237	1.38	2.24	0.712	0.823	1040 ± 68	7.15 ± 0.94	7.19
MKW 08	0.026983	38	1.09	1.70	0.433	0.555	473 ± 77	0.90 ± 0.29	1.52
UGC 05088	0.027405	7	0.39	1.23	0.268	0.236	238 ± 90	0.14 ± 0.11	0.34
NGC 6338	0.029142	17	0.50	1.23	0.202	0.424	685 ± 166	0.88 ± 0.43	1.20
A 2199	0.030575	92	0.95	1.68	0.659	0.774	846 ± 88	4.38 ± 0.91	3.74
AWM 4	0.031980	20	0.82	1.69	0.629	0.490	404 ± 90	0.95 ± 0.42	0.49
A 1177	0.031944	12	0.59	1.10	0.344	0.327	385 ± 111	0.47 ± 0.27	0.42
A 2063	0.034457	45	1.10	2.09	0.378	0.418	746 ± 111	1.95 ± 0.58	2.46
A 2052	0.034908	32	1.05	1.52	0.336	0.427	708 ± 125	1.56 ± 0.55	2.05
AWM 5	0.035077	29	1.00	1.67	0.619	0.641	550 ± 102	1.74 ± 0.64	2.30
A 2147	0.036478	177	1.52	2.47	1.083	0.994	882 ± 66	7.83 ± 1.17	6.36
A 2151	0.035213	84	1.24	1.73	0.658	0.760	807 ± 88	3.98 ± 0.87	4.59
NGC 5098	0.037062	17	0.89	1.29	0.320	0.414	536 ± 130	0.85 ± 0.41	1.17
A 1139	0.039205	35	1.05	1.63	0.652	0.712	417 ± 70	1.05 ± 0.35	1.99
A 1983	0.044728	68	1.55	2.25	0.896	0.801	503 ± 61	2.11 ± 0.51	3.65
MKW 03s	0.045183	34	0.75	1.75	0.483	0.699	580 ± 99	1.51 ± 0.52	2.14
RXCJ 1022	0.054314	28	1.18	1.56	0.579	0.629	555 ± 105	1.66 ± 0.63	1.96
A 1991	0.059361	32	0.95	1.49	0.672	0.853	524 ± 93	1.75 ± 0.62	2.74
A 1795	0.062651	53	1.24	1.80	0.766	0.736	798 ± 110	4.53 ± 1.24	3.14
A 1275	0.062604	10	0.77	1.20	0.512	0.522	320 ± 101	0.49 ± 0.31	0.90
A 2092	0.066750	15	0.77	2.05	0.375	0.524	410 ± 106	0.58 ± 0.30	1.49
A 2065	0.073644	68	1.67	2.82	0.605	0.581	1220 ± 148	8.36 ± 2.03	7.40
A 0744	0.072600	7	0.74	1.59	0.279	0.546	685 ± 259	1.22 ± 0.92	1.03
A 1238	0.073740	27	1.29	2.08	0.680	0.674	545 ± 105	1.88 ± 0.72	2.84
A 1775B	0.075014	38	1.52	2.62	0.998	1.047	649 ± 105	3.90 ± 1.26	3.27
A 1800	0.075618	35	1.38	2.25	0.857	1.001	645 ± 109	3.31 ± 1.12	3.87
A 2029	0.077574	64	1.53	3.33	0.849	1.350	1072 ± 134	9.06 ± 2.26	9.13
A 2142	0.090113	81	1.52	2.67	1.025	1.107	952 ± 106	8.63 ± 1.92	8.08

массы M_{200} равна 30%. Семь отклоняющихся скоплений галактик расположены в области сверхскопления Hercules. Важно отметить, что сверхскопления как области повышенной плотности галактик влияют на свойства групп и скоплений галактик в них расположенных [41], и различия между сверхскоплениями, то есть фактически различия между параметрами скоплений и групп в них, могут быть результатом разной их эволюционной истории [42]. Например, нами получено, что зависимость между L_K -светимостью и массой M_{200} групп и скоплений галактик в области богатого сверхскопления Hercules круче, чем в области бедного сверхскопления Leo на тех же красных смещениях [30].

4. КОММЕНТАРИИ К НЕКОТОРЫМ СКОПЛЕНИЯМ И ГРУППАМ

Анализ данных по отклоняющимся скоплениям галактик показывает, что это системы с разными признаками динамической активности. В скопление *Virgo*, согласно [43], излучение газа в рентгеновской области соответствует тому, что основная масса скопления имеет в центре галактику M 87, но в то же время небольшая часть массы сосредоточена вокруг галактик M 86 и M 49. При этом предполагается, что галактика M 86 является частью небольшой группы, которая слилась с основной. Масса скопления, определяемая по рентгеновскому излучению газа, получается меньше, чем по дисперсии лучевых скоростей галактик. На рис. 1 (правая нижняя панель) приведено распределение галактик, расположенных в пределах радиуса R_{200} , по скоростям, и сплошной линией показана соответствующая гауссиана. Штриховой линией приведена гауссиана для галактик, расположенных в центральной части распределения (с галактикой M 87 в центре). Масса скопления, определенная по ним, соответствует гидростатической массе.

Для группы галактик *NGC 5098* [44] по оптическим данным, по рентгеновскому излучению и путем моделирования (задача двух тел) получено, что в этой области имеются две независимые, гравитационно не связанные группы. Рентгеновская светимость, связанная с основной группой, недостаточна, по мнению авторов, чтобы группы взаимодействовали — минимальная масса, связывающая эти группы, должна быть по крайней мере в 3–5 раз больше. По данным авторов, в распределении галактик по скоростям есть провал между группами. Данные SDSS (рис. 2, правая нижняя панель) этого провала не показывают, то есть члены групп перемешаны между собой, хотя одна из групп дает в распределении выделенный пик. Мы определили общую дисперсию лучевых скоростей, массу, ИК-светимость, причем светимость соответствует и массе, полученной по σ , и

массе, вычисленной по зависимости между $\lg M_{200}$ и $\lg L_K$. Для найденной нами из литературы гидростатической массы (восьмая колонка в таблице 1) мы вычислили σ , R_{200} и нашли по галактикам L_K -светимость (девятая колонка в таблице 1). Если для этой светимости вычислить массу по зависимости $\lg M_{X,200} - \lg L_K$, то она получается примерно в три раза больше, чем гидростатическая. Таким образом, измеренная нами масса M_{200} , на наш взгляд, более предпочтительна, ее можно принять за верхний предел массы этой системы. На рис. 2 (правая нижняя панель) приведена гистограмма распределения галактик по лучевым скоростям в пределах радиуса R_{200} . Сплошной линией показана гауссиана этого распределения, штриховой линией — гауссиана распределения галактик (с ярчайшей галактикой), составляющих выделенный пик. Масса группы, определенная по дисперсии лучевых скоростей этих галактик, равна гидростатической массе.

В скоплении *A 2151* излучение газа обнаруживается у двух групп галактик (например, [45]), которые находятся в пределах найденного нами радиуса R_{200} . Группа, в которой заключена ярчайшая галактика скопления, расположена не в центре, а в стороне от основной массы галактик. Поэтому мы взяли в качестве центра скопления центроид галактик. Кроме того, ярчайшая галактика скопления имеет пекулярную скорость -375 км с^{-1} относительно средней лучевой скорости системы. В близко расположенном к *A 2151* скоплении *A 2147* (сверхскопление Hercules) ярчайшая галактика находится в центре скопления и в центре рентгеновского излучения. Но само излучение имеет сложную структуру, характерную для происходящего в данный момент слияния групп (например, [46]), которые видны в пределах R_{200} в картинной плоскости. Близкое скопление *A 2152* мы вычли из *A 2147*. Богатые скопления *A 2147* и *A 2151* расположены близко и, возможно, оказывают гравитационное воздействие друг на друга.

Скопления галактик в современную эпоху динамически активны и растут, поглощая другие скопления и группы галактик. Разные стадии роста систем могут по-разному влиять на определяемые дисперсии лучевых скоростей галактик и светимость рентгеновского газа в них. Например, модельные расчеты эффектов влияния динамического состояния скоплений галактик (слияния с другими группами) на измеряемые гидростатические массы, выполненные в работе [47] (и ссылки в ней), показали, что метод оценки масс в предположении гидростатического равновесия может давать заниженные массы. Авторы показали, что наилучшее время для измерения масс скоплений наступает спустя 4 миллиарда лет после слияния с другим скоплением.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

При измерении масс коллапсирующих объектов (групп и скоплений), которые не имеют четких границ, приходится делать предположения об их размерах. В литературе существует несколько способов оценки размеров систем галактик. В последнее время наиболее распространенным является метод выделения области скопления с радиусом R_{200} , в которой плотность превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз [13]. В настоящей работе мы представляем результаты измерения динамических масс выборки скоплений и групп галактик в пределах двух радиусов (R_{200} и R_e) и сравнения их с массами, полученными по излучению горячего газа, заполняющего их внутренние области. Динамические массы скоплений галактик определены нами с медианной точностью, зависящей от ошибки определения дисперсии лучевых скоростей, 30%, и скорее всего являются верхним пределом масс для изучаемых систем галактик.

Наша выборка имеет следующие параметры: красные смещения $0.003 < z < 0.090$, массы $0.3\text{--}22.5 \times 10^{14} M_\odot$ и ИК-светимости $0.5\text{--}26.5 \times 10^{12} L_\odot$. Динамические массы (M_{200} и $M_{1/2}$) систем галактик получены для областей радиусом R_{200} и для областей с эффективным радиусом R_e , где содержится половина ИК-светимости скоплений галактик. В данной работе мы применили простой способ (наблюдательный) выделения скоплений и групп галактик и определения их эффективного радиуса R_e по наблюдаемому интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра (рис. 3, раздел 2.2). Теоретическое обоснование подобному профилю систем галактик мы не нашли.

Для измерения M_{200} и $M_{1/2}$ мы в качестве центра использовали ярчайшую галактику скопления, которая, как правило, находится вблизи центра рентгеновского излучения, галактики со скоростями больше 2.7σ считали фоновыми. Массы систем галактик ($M_{X,200}$), найденные по излучению газа (из литературы), измерены для области с радиусом R_{200} или пересчитаны из $M_{X,500}$. Нами получены следующие результаты.

(1) Разработан эмпирический способ выделения скоплений или групп галактик по наблюдаемому интегральному распределению числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра. Определены такие параметры систем галактик, как дисперсия лучевых скоростей, ИК-светимость, количество галактик на эффективном радиусе.

(2) Показано, что динамические массы групп и скоплений галактик для областей с радиусами R_{200} и R_e связаны соотношением

$M_{200} \sim 1.65 M_{1/2}$. Такое же соотношение получено для 21 скопления выборки между гидростатической и динамической массами: $M_{X,200} \sim 1.65 M_{1/2}$.

(3) Полученные динамические (M_{200} и $1.65 M_{1/2}$) и гидростатические ($M_{X,200}$) массы 21 группы и скопления галактик согласуются друг с другом в пределах 12%. Оставшиеся восемь систем галактик, в основном из сверхскопления Hercules, имеют существенные различия масс.

Скопления галактик — молодые системы, которые постоянно растут, поглощая ближайшие группы, галактики и скопления. Их индивидуальное изучение разными методами может иметь определяющее значение с точки зрения включения в выборки для определения космологических параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. А. Вихлинин, А. В. Кравцов, М. Л. Маркевич и др., УФН **184**, 349 (2014).
2. M. Girardi, G. Giuricin, F. Mardirossian, et al., *Astrophys. J.* **505**, 74 (1998).
3. M. Ramella, W. Boschin, M. Geller, et al., *Astron. J.* **128**, 2022 (2004).
4. A. Muzzin, H. K. C. Yee, P. B. Hall, and H. Lin, *Astrophys. J.* **663**, 150 (2007).
5. A. J. R. Sanderson, T. J. Ponman, A. Finoguenov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **340**, 989 (2003).
6. A. Vikhlinin, A. Kravtsov, W. Forman, et al., *Astrophys. J.* **640**, 691 (2006).
7. Y. Chen, T. H. Reiprich, H. Böhringer, et al., *Astron. and Astrophys.* **466**, 805 (2007).
8. N. Okabe, M. Takada, K. Umetsu, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **62**, 811 (2010).
9. A. Diaferio and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **481**, 633 (1997).
10. I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1075 (2010).
11. P. Nurmi, P. Heinämäki, T. Sepp, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436**, 380 (2013).
12. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Aqueros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
13. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J.* **485**, L13 (1997).

14. K. Rines and A. Diaferio, *Astron. J.* **132**, 1275 (2006).
15. G. A. Mamon, A. Biviano, and G. Murante, *Astron. and Astrophys.* **520**, A30 (2010).
16. A. Biviano, G. Murante, S. Borgani, et al., *Astron. and Astrophys.* **456**, 23 (2006).
17. T. H. Reiprich and H. Böhringer, *Astrophys. J.* **567**, 716 (2002).
18. H. J. Eckmiller, D. S. Hudson, and T. H. Reiprich, *Astron. and Astrophys.* **535**, A105 (2011).
19. M. Sun, G. M. Voit, M. Donahue, et al., *Astrophys. J.* **693**, 1142 (2009).
20. A. Finoguenov, T. H. Reiprich, and H. Böhringer, *Astron. and Astrophys.* **368**, 749 (2001).
21. R. Piffaretti, Ph. Jetzer, J. S. Kaastra, and T. Tamura, *Astron. and Astrophys.* **433**, 101 (2005).
22. F. Gastaldello, D. A. Buote, P. J. Humphrey, et al., *Astrophys. J.* **669**, 158 (2007).
23. E. Pointecouteau, M. Arnaud, and G. M. Pratt, *Astron. and Astrophys.* **435**, 1 (2005).
24. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **62**, 311 (2007).
25. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 207 (2009).
26. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **65**, 205 (2010).
27. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **67**, 17 (2012).
28. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 1 (2009).
29. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **37**, 219 (2011).
30. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **39**, 1 (2013).
31. E. J. Tollerud, J. S. Bullock, G. J. Graves, and J. Wolf, *Astrophys. J.* **726**, 108 (2011).
32. J. Wolf, G. D. Martinez, J. S. Bullock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **406**, 1220 (2010).
33. R. Schaffer, S. Maurogordato, A. Cappi, and F. Bernardeau, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **263**, L21 (1993).
34. N. Lyskova, *Astronomische Nachrichten* **334**, 360 (2013).
35. N. Lyskova, E. Churazov, A. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 2013 (2014).
36. T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, et al., *Astrophys. J.* **119**, 2498 (2000).
37. K. Rines, M. J. Geller, A. Diaferio, et al., *Astron. J.* **128**, 1078 (2004).
38. Y.-T. Lin, J. J. Mohr, and S. A. Stanford, *Astrophys. J.* **610**, 745 (2004).
39. A. Kravtsov, A. Vikhlinin, and A. Meshcheryakov, submitted to *Astrophys. J.*; arXiv:1401.7329.
40. S. Andreon, *Astron. and Astrophys.* **548**, A83 (2012).
41. M. Einasto, E. Saar, V. J. Maartinez, et al., *Astrophys. J.* **685**, 83 (2008).
42. M. Einasto, L. J. Liivamägi, E. Tempel, et al., *Astron. and Astrophys.* **542**, A36 (2012).
43. H. Böhringer, U. G. Briel, R. A. Schwartz, et al., *Nature* **368**, 828 (1994).
44. A. Mahdavi, A. Finoguenov, H. Böhringer, et al., *Astrophys. J.* **622**, 187 (2005).
45. Z. Huang and G. L. Sarazin, *Astron. and Astrophys.* **461**, 622 (1996).
46. W. Forman, Chandra proposal ID #03800400 (2001).
47. K. Nelson, D. H. Rudd, L. Shaw, and D. Nagai, *Astrophys. J.* **751**, 121 (2012).

Structure of Galaxy Groups and Clusters and Measurement of Their Masses

A. I. Kopylov and F. G. Kopylova

We report the results of measurement and comparison of masses for a sample of 29 groups and clusters of galaxies ($z < 0.1$). We use the SDSS DR7 archive data to determine dynamical masses from the one-dimensional dispersion of line-of-sight velocities for virialized regions of radii R_{200} and R_e . Our method for determination of effective radii of galaxy systems from the cumulative distribution of the number of galaxies depending on squared clustercentric distance allowed us to estimate masses $M_{1/2}$ (within R_e), which are related to the masses contained inside R_{200} : $M_{200} \sim 1.65 M_{1/2}$. A comparison of the inferred dynamic masses and the hydrostatic masses determined from the radiation of hot gas in galaxy groups and clusters (based on published data) led us to conclude that the inferred masses for the main sample of 21 groups and clusters agree to within 12%. These systems also obey the relation $M_{X,200} \sim 1.65 M_{1/2}$. For the remaining eight systems, which are mostly located in the Hercules supercluster, the discrepancy between the hydrostatic and the dynamic masses amounts to 2σ . This discrepancy is most likely due to the incompleteness of the formation processes of these clusters via hierarchical merger in the region of the rich Hercules supercluster.

Keywords: *galaxies: clusters: general—galaxies: groups: general*