

УДК: 524.7

ОЦЕНКИ МАССЫ МЕСТНОЙ ГРУППЫ И ГРУППЫ М 81 ПО ИСКАЖЕНИЯМ ОКРЕСТНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ¹, О.Г.КАШИБАДЗЕ²

Поступила 12 августа 2005

Основываясь на высокоточных измерениях расстояний до близких галактик на космическом телескопе Хаббла, мы определили радиус сферы нулевой скорости для Местной группы, $R_0 = 0.96 \pm 0.03$ Мпк, и для группы галактик вокруг М 81/М 82, 0.89 ± 0.05 Мпк. Эти значения приводят к оценкам полной массы групп, соответственно, $M_T = (1.29 \pm 0.14) \cdot 10^{12} M_\odot$ и $(1.03 \pm 0.17) \cdot 10^{12} M_\odot$. Используемый нами R_0 -метод позволяет определить также отношение масс у двух самых ярких членов в обеих группах. Варьируя положение центра масс между двумя главными членами группы и добиваясь минимального рассеяния галактик на хаббловской диаграмме, мы получили для нашей Галактики и Андромеды отношение масс $0.8 : 1.0$, а для галактик М 82 и М 81 отношение масс $0.54 : 1.00$ в хорошем согласии с наблюдаемым отношением светимостей этих галактик.

1. *Введение.* До недавнего времени использование вириального соотношения $2T + U = 0$ между кинетической (T) и потенциальной (U) энергией группы галактик являлось единственным методом вычисления массы систем галактик на масштабе ~ 0.3 Мпк. Однако неопределенность членства некоторых галактик даже в самых близких группах, возможное отсутствие предполагаемого вириального равновесия, а также неизвестный характер преобладающих движений в группах делают вириальные оценки массы не вполне надежным инструментом, особенно в случае рассеянных (бедных) групп.

Как было отмечено Линден-Беллом [1], всякая группа как некая концентрация массы, оказывает тормозящее воздействие на окружающий хаббловский поток. На малых расстояниях от центра группы зависимость "скорость-расстояние" отклоняется от линейного хаббловского закона $V = H_0 R$ и пересекает линию нулевой скорости при значении $R = R_0$, которое получило название "радиус сферы нулевой скорости". Согласно [1], в случае сферической симметрии полная масса группы M_T и радиус R_0 связаны простым соотношением

$$M_T = (\pi^2 / 8G) \cdot R_0^3 T_0^{-2}, \quad (1)$$

где G - постоянная тяготения, а T_0 - возраст Вселенной. Таким образом, определение из наблюдательных данных величины R_0 позволяет вычислить массу группы, поскольку третий параметр в (1) - возраст Вселенной

известен сейчас с достаточно хорошей точностью: $T_0 = 13.7 \pm 0.2$ млрд. лет [2]. Эти соображения были использованы Сэндиджем [3,4] и Жиро [5] для оценки массы Местной группы. Основываясь на расстояниях и скоростях дюжины близких галактик, Сэндидж [3] определил полную массу Местной группы как $4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$. В то время расстояния даже до самых близких галактик были измерены с невысокой точностью. К примеру, принятые Сэндиджем расстояния до некоторых галактик сильно отличаются от современных надежных оценок, указанных в скобках: 1.58 Мпк для LeoA (0.69 Мпк), 1.66 Мпк для NGC 300 (2.15 Мпк), 2.51 Мпк для Pegasus dIг (0.76 Мпк), 2.63 Мпк для NGC 2403 (3.30 Мпк), 5.75 Мпк для M 81 (3.63 Мпк) и 6.31 Мпк для IC 342 (3.28 Мпк). Недавно Караченцев и др. [6] использовали аккуратные оценки расстояний и скоростей у 38 ближайших галактик в окрестности LG и получили значение полной массы группы $(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{12} M_{\odot}$, т.е. в три раза выше оценки Сэндиджа. Позднее этот же подход был применен к определению R_0 и M_T для других близких групп вокруг M 81, CentaurusA, IC342, NGC 253 (Sculptor filament) и NGC 4736 (Canes Venatici cloud). Сводка оценок полной массы этих групп и их сравнение с вириальными оценками массы были представлены в [7]. Как показало сравнение, в группах галактик с "временем пересечения" $t_{\text{cross}} < (2 \cdot H_0)^{-1}$ оценки массы по внутренним (вириальным) движениям и внешнему хаббловскому узору скоростей согласуются друг с другом в пределах ошибок измерений (~30 - 40%). Остается, однако, открытым вопрос, насколько устойчива оценка массы новым методом в зависимости от тех или иных предположений о структуре и кинематике самой группы и ее окружения. Выяснение этих вопросов и является предметом данной работы.

2. Наблюдательные данные для определения радиуса R_0

Рассмотрим группу галактик с центром в "С" (рис. 1а), которая находится от наблюдателя (LG) на расстоянии D_c и удаляется по лучу зрения со скоростью V_c . Пусть в окрестности группы на расстоянии D_g от наблюдателя имеется галактика G, которая движется по лучу зрения со скоростью V_g . При угловом расстоянии Θ между С и G, их взаимное линейное расстояние R выражается как

$$R^2 = D_g^2 + D_c^2 - 2 D_g \cdot D_c \cdot \cos \Theta, \quad (2)$$

а взаимная разность скоростей в проекции на линию, их соединяющую, есть

$$V_{gc} = V_g \cdot \cos \lambda - V_c \cdot \cos \mu, \quad (3)$$

где $\mu = \lambda + \Theta$, а

$$\operatorname{tg} \lambda = D_c \cdot \sin \Theta / (D_g - D_c \cdot \cos \Theta). \quad (4)$$

Здесь мы предполагали, что случайные пекулярные скорости галактик малы по сравнению со скоростями регулярного хаббловского потока.

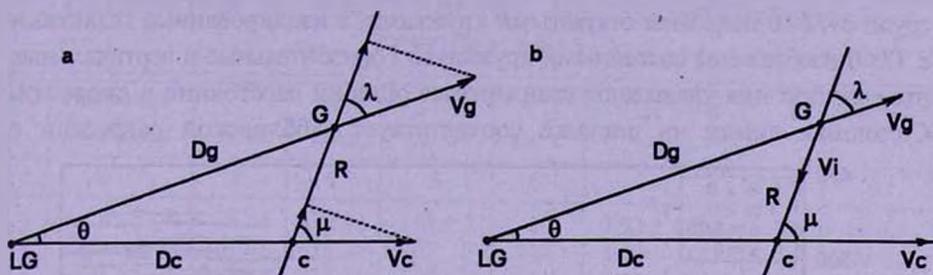


Рис.1. Схемы движения галактики относительно центра группы.

Для построения зависимости между V_{pec} и R мы использовали наблюдательные данные о лучевых скоростях и расстояниях галактик в окрестностях нашей Галактики (MW), Андромеды (M 31) и M 81. Главным источником данных служил Catalog of Neighboring Galaxies = CNG [8], дополненный самыми последними измерениями расстояний до близких галактик. Используемые ниже данные собраны в табл.1, столбцы которой содержат: 1 - имя галактики; 2, 3 - ее галактические координаты; 4 - гелиоцентрическую лучевую скорость со стандартной ошибкой измерения; 5 - лучевую скорость, приведенную к центроиду Местной группы (LG) с параметрами апекса из NED (NASA Extragalactic Database); 6 - измеренное расстояние до галактики и его погрешность в Мпк; 7 - так называемый приливной индекс или индекс изолированности галактики

$$TI_k = \max[\log(M_k/D_{ik})^3] + C, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

где M_k - масса соседней галактики, расположенной на расстоянии D_{ik} от рассматриваемой; константа C здесь выбрана таким образом, чтобы отрицательные значения TI соответствовали изолированным галактикам общего поля, а положительные - членам групп; 8 - ссылка на источник данных о расстоянии галактики. В эту выборку мы включали только галактики с аккуратно измеренными расстояниями, большинство расстояний определено по светимости верхушки ветви красных гигантов (TRGB) с типичной погрешностью $\sim 10\%$. Предварительные оценки расстояния, полученные в текущих обзорах близких галактик, которые выполняются на HST по программам Karachentsev (№9971, №10234) и Tully (№10210), обозначены, соответственно, как Kar05, Kar06 и Tully05. Всего в нашей выборке содержится 133 близкие галактики. В этом же объеме известно еще 35 галактик, однако расстояния у них измерены пока с низкой точностью или же отсутствуют измерения лучевых скоростей.

Используя скорости и расстояния из колонок 5 и 6 табл.1, мы

построили хаббловскую диаграмму $V_{LG} \propto D_{MW}$ для 104 самых близких галактик в сфере радиусом 4 Мпк от нас. На этой диаграмме (рис.2) члены групп с $TI > 0$ показаны открытыми кружками, а изолированные галактики с $TI < 0$ изображены сплошными кружками. Горизонтальные и вертикальные отрезки при них указывают стандартные ошибки расстояния и скорости. Сплошная линия на рисунке соответствует хаббловской регрессии с

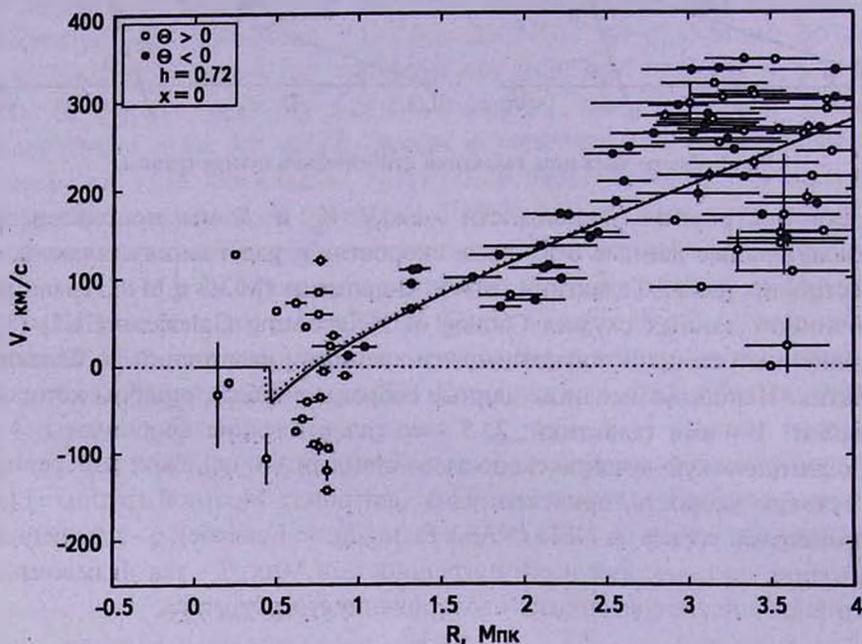


Рис.2. Хаббловская диаграмма для окрестностей Местной группы в случае, когда центром группы является наша Галактика (Млечный Путь).

параметром $H_0 = 72 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, искривленной на малых расстояниях из-за гравитационного торможения массой Местной группы. Из семейства регрессий с одинаковым значением H_0 и разными значениями M_{LG} (или R_0) показана только одна регрессия, для которой сумма квадратов уклонений галактик является минимальной. Эта регрессия пересекает линию нулевой скорости при $R_0 = 0.73 \text{ Мпк}$.

Как видно из этой диаграммы, дисперсия скоростей галактик относительно хаббловской регрессии заметно возрастает при $R \approx 3 - 4 \text{ Мпк}$. Причиной этого являются галактики в группах вокруг М 81 и IC 342/Maffei с большими вириальными скоростями. Две из них (KDG63 и KDG61) имеют близкие к нулю скорости по отношению к центроиду LG. Если продолжить хаббловскую диаграмму до расстояний $\sim 15 - 20 \text{ Мпк}$, то там мы снова встретим галактики со скоростями $V_{LG} < 0$, которые располагаются в зоне больших вириальных движений в

Таблица 1

ГАЛАКТИКИ С АККУРАТНЫМИ ОЦЕНКАМИ РАССТОЯНИЙ И СКОРОСТЕЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ МЕСТНОЙ ГРУППЫ И ГРУППЫ М81

N	Название галактики	<i>l</i> град.	<i>b</i> град.	$V_r \pm dV$ км с ⁻¹	V_{LG} км с ⁻¹	$D_{MW} \pm dD$ Мпк	<i>Tl</i>	Ссылка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	WLM	75.86	-73.62	-116 ± 2	-10	0.92 ± 0.04	0.3	CNG
2	ESO349-31	351.48	-78.12	207 7	216	3.13 0.31	0.5	Kar05
3	NGC55	332.67	-75.74	129 3	111	2.12 0.21	-0.4	[12]
4	IC10	118.97	-3.34	-344 1	-60	0.66 0.06	1.8	CNG
5	ESO294-10	320.42	-74.42	117 5	81	1.92 0.19	1.0	CNG
6	NGC147	119.82	-14.25	-193 3	85	0.76 0.08	3.0	CNG
7	AndIII	119.37	-26.26	-355 9	-92	0.76 0.07	3.5	CNG
8	NGC185	120.79	-14.48	-202 3	73	0.62 0.06	2.3	CNG
9	NGC205	120.72	-21.14	-244 3	24	0.83 0.11	3.7	CNG
10	NGC221	121.15	-21.98	-145 6	121	0.77 0.04	6.8	CNG
11	M31	121.17	-21.57	-301 1	-35	0.77 0.04	4.6	CNG
12	AndI	121.68	-24.82	-380 11	-120	0.81 0.03	3.7	CNG
13	NGC247	113.94	-83.56	160 2	215	3.75 0.38	1.3	Kar05
14	NGC253	97.43	-87.97	241 2	274	3.94 0.37	0.3	CNG
15	DDO6	119.39	-83.88	295 5	348	3.34 0.24	0.5	CNG
16	SMC	302.81	-44.33	158 4	-22	0.06 0.01	3.5	CNG
17	NGC300	299.21	-79.42	144 5	114	2.15 0.10	-0.3	CNG
18	Sculptor	287.53	-83.16	110 1	96	0.09 0.01	2.8	CNG
19	LGS-3	126.77	-40.88	-286 5	-74	0.62 0.02	1.7	CNG
20	IC1613	129.79	-60.56	-232 1	-89	0.73 0.02	0.9	CNG
21	KKH5	125.49	-11.35	39 2	304	4.26 0.43	-1.2	CNG
22	NGC404	127.03	-27.01	-48 9	195	3.06 0.37	-1.0	CNG
23	AndV	126.22	-15.12	-403 4	-143	0.81 0.04	2.8	CNG
24	AndII	128.92	-29.16	-188 3	46	0.68 0.02	2.4	CNG
25	M33	133.61	-31.33	-180 3	36	0.85 0.04	2.0	CNG
26	KKH6	129.68	-10.21	17 1	270	3.80 0.38	-0.8	Kar05
27	NGC625	273.67	-73.12	405 1	335	3.89 0.39	-0.4	[13]
28	Phoenix	272.16	-68.95	-13 29	-106	0.44 0.02	0.8	CNG
29	Maffei1	135.86	-0.55	66 22	297	3.01 0.60	2.7	[14]
30	Fornax	237.29	-65.65	53 9	-32	0.14 0.01	2.3	CNG
31	KK35	138.20	10.30	105 1	320	3.16 0.32	2.4	CNG
32	IC342	138.17	10.58	31 3	245	3.28 0.27	-0.1	CNG
33	UGCA86	139.77	10.64	67 4	275	3.12 0.31	0.3	Kar05
34	CarA	137.25	16.20	-47 1	164	3.93 0.47	0.1	CNG
35	UGCA92	144.70	10.51	-99 5	89	3.08 0.31	1.1	Kar05
36	NGC1560	138.37	16.02	-36 5	171	3.45 0.36	1.0	CNG
37	CarB	143.38	14.42	77 5	266	3.34 0.32	1.0	CNG
38	UGCA105	148.52	13.66	111 5	279	3.15 0.32	0.3	CNG
39	LMC	280.47	-32.89	278 2	28	0.05 0.01	3.6	CNG
40	KKH34	140.42	22.35	110 1	299	4.61 0.46	-0.8	CNG
41	Carina	260.11	-22.22	223 60	-53	0.10 0.01	2.7	CNG
42	KKH37	133.98	26.54	10 1	214	3.34 0.33	-0.3	Kar05
43	HIZSS003	217.71	0.09	280 1	101	1.69 0.17	-0.6	[15]

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	NGC2366	146.43	28.53	99 3	253	3.19 0.41	1.0	CNG
45	NGC2403	150.57	29.19	131 3	268	3.30 0.36	0.0	CNG
46	HoII	144.28	32.69	157 1	311	3.39 0.20	0.6	CNG
47	KDG52	143.82	33.01	113 5	268	3.55 0.26	0.7	CNG
48	DDO53	149.30	34.95	20 1	151	3.56 0.24	0.7	CNG
49	UGC4483	144.97	34.38	156 1	304	3.21 0.18	0.5	CNG
50	HoI	140.73	38.65	139 1	291	3.84 0.46	1.5	CNG
51	NGC2976	143.92	40.90	3 5	139	3.56 0.38	2.7	CNG
52	BK3n	142.31	40.83	-40 5	101	4.02 0.26	1.0	CNG
53	M81	142.09	40.90	-35 4	107	3.63 0.34	2.2	CNG
54	M82	141.40	40.57	202 4	347	3.53 0.26	2.7	CNG
55	KDG61	142.50	41.28	-116 30	23	3.60 0.25	3.9	CNG
56	A0952+69	141.74	40.92	100 5	243	3.87 0.21	1.9	CNG
57	LeoA	196.90	52.42	24 4	-40	0.69 0.06	0.2	CNG
58	SexB	233.20	43.78	301 1	111	1.36 0.07	-0.7	CNG
59	NGC3109	262.10	23.07	403 1	110	1.33 0.08	-0.1	CNG
60	NGC3077	141.90	41.66	13 4	153	3.82 0.38	1.9	CNG
61	Antlia	263.10	22.31	362 1	66	1.32 0.06	2.3	CNG
62	KDG63	144.13	43.10	-129 5	0	3.50 0.24	1.8	CNG
63	LeoI	225.98	49.11	285 2	128	0.25 0.02	1.5	CNG
64	SexA	246.15	39.88	324 1	94	1.32 0.04	-0.6	CNG
65	SexdSph	243.50	42.27	226 2	8	0.09 0.01	2.8	CNG
66	HS117	138.14	41.30	-37 5	116	3.93 0.39	1.9	Kar05
67	DDO78	141.14	44.00	55 9	191	3.72 0.26	1.8	CNG
68	IC2574	140.20	43.60	57 2	197	4.02 0.41	0.9	CNG
69	DDO82	137.90	42.18	56 3	207	4.00 0.40	0.9	CNG
70	KDG73	136.88	44.23	116 6	263	3.70 0.22	1.3	CNG
71	LeoII	220.16	67.23	76 5	-18	0.21 0.02	1.7	CNG
72	UGC6456	127.84	37.33	-103 1	89	4.34 0.43	-0.3	CNG
73	UGC6541	151.90	63.27	250 4	304	3.89 0.47	-0.7	CNG
74	NGC3738	144.56	59.32	228 4	305	4.90 0.49	-1.0	CNG
75	NGC374	157.57	66.45	230 4	264	3.03 0.30	-0.8	CNG
76	KK109	156.85	68.98	212 1	241	4.51 0.45	-0.6	CNG
77	DDO99	166.20	72.75	242 1	248	2.64 0.21	-0.5	CNG
78	NGC4068	138.91	63.04	210 3	290	4.25 0.42	-1.0	Kar05
79	NGC4163	163.21	77.70	163 5	164	2.92 0.29	0.1	Kar05
80	ESO321-14	294.85	24.05	613 5	337	3.19 0.26	-0.3	CNG
81	UGC7242	128.87	50.60	68 2	213	5.20 0.52	0.4	Kar05
82	KDG90	161.10	78.06	280 6	283	2.86 0.14	1.6	CNG
83	NGC4214	160.26	78.07	291 3	295	2.94 0.18	-0.7	CNG
84	UGC7298	135.22	64.06	173 1	255	4.21 0.42	-0.7	CNG
85	NGC4236	127.41	47.36	0 4	160	4.45 0.44	-0.4	CNG
86	NGC4244	154.56	77.16	243 1	255	4.49 0.45	0.0	CNG
87	IC3104	301.41	-16.95	430 5	171	2.27 0.19	-0.5	CNG
88	NGC4395	162.08	81.54	320 1	315	4.61 0.46	0.1	CNG
89	DDO126	148.60	78.74	218 5	231	4.87 0.49	0.1	CNG
90	DDO125	137.75	72.94	195 4	240	2.54 0.17	-0.9	CNG
91	NGC4449	136.85	72.40	201 4	249	4.21 0.42	0.0	CNG
92	UGC7605	150.99	80.13	310 1	317	4.43 0.44	0.7	CNG
93	NGC4605	125.33	55.47	143 5	276	5.32 0.53	-1.1	Kar05

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
94	IC3687	131.95	78.46	358 1	385	4.57 0.46	1.1	CNG
95	NGC4736	123.36	76.01	309 1	353	4.66 0.47	-0.5	CNG
96	GR8	310.74	76.98	214 3	136	2.10 0.34	-1.2	CNG
97	IC4182	107.71	79.09	320 1	356	4.70 0.65	0.6	CNG
98	DDO165	120.75	49.36	31 1	196	4.57 0.46	0.0	CNG
99	UGC8215	114.58	70.03	218 1	297	4.47 0.45	-0.5	Kar05
100	DDO167	111.62	70.32	163 6	243	4.19 0.47	0.0	CNG
101	DDO168	110.76	70.66	194 1	273	4.33 0.43	0.0	CNG
102	NGC5102	309.73	25.84	467 7	230	3.40 0.39	0.7	CNG
103	NGC5204	113.50	58.01	203 1	341	4.65 0.46	-1.1	CNG
104	UGC8508	111.14	61.31	62 5	186	2.56 0.15	-1.0	CNG
105	NGC5237	311.88	19.22	361 4	122	3.30 0.33	2.1	Kar05
106	UGC8638	23.28	78.99	274 1	273	4.09 0.40	-1.3	Kar05
107	DDO181	89.73	73.12	202 1	272	3.10 0.31	-1.3	Tully05
108	ESO325-11	313.51	19.91	540 4	307	3.40 0.39	1.1	CNG
109	DDO183	77.79	73.45	191 1	257	3.24 0.32	-0.8	Tully05
110	KKH86	339.04	62.60	287 3	209	2.61 0.16	-1.5	CNG
111	UGC8833	69.71	73.96	226 5	285	3.22 0.31	-1.4	Tully05
112	KK230	63.71	71.99	62 2	126	1.85 0.18	-1.0	Kar05
113	DDO187	25.57	70.46	152 4	172	2.22 0.22	-1.3	Tully05
114	DDO190	82.01	64.48	150 4	263	2.79 0.26	-1.3	CNG
115	UMin	104.95	44.80	-247 1	-44	0.06 0.01	3.3	CNG
116	ESO274-01	326.80	9.33	522 5	335	3.02 0.30	-1.0	Kar06
117	KKR25	83.88	44.41	-139 2	68	1.86 0.12	-0.7	CNG
118	Draco	86.36	34.75	-293 21	-48	0.08 0.01	3.0	CNG
119	MilkyWay	0.73	0.57	0 10	-88	0.01 0.00	2.5	CNG
120	IC4662	328.55	-17.85	308 4	145	2.40 0.24	-0.9	Kar05
121	NGC6503	100.57	30.64	43 7	301	5.27 0.53	-1.2	CNG
122	SagdSph	5.61	-14.09	142 4	161	0.02 0.00	5.6	CNG
123	NGC6789	94.97	21.52	-141 9	144	3.60 0.36	-1.4	CNG
124	SagDIG	21.06	-16.28	-77 4	23	1.04 0.07	-0.3	CNG
125	NGC6822	25.34	-18.40	-57 2	64	0.50 0.01	0.6	CNG
126	DDO210	34.05	-31.34	-137 5	13	0.94 0.04	-0.1	CNG
127	IC5152	343.92	-50.19	124 3	75	2.07 0.18	-1.1	CNG
128	UGCA438	11.86	-70.86	62 5	99	2.23 0.15	-0.7	CNG
129	CasdSph	109.46	-9.96	-307 2	-5	0.79 0.04	2.0	CNG
130	Pegasus	94.77	-43.55	-184 2	60	0.76 0.08	1.2	CNG
131	KKH98	109.09	-22.38	-137 3	151	2.45 0.13	-0.7	CNG
132	PegdSph	106.04	-36.32	-354 3	-94	0.82 0.02	1.7	CNG
133	NGC7793	4.52	-77.17	229 2	252	3.91 0.41	0.1	CNG

скоплении Девы. Чтобы отделить вклад вириальных движений, мы провели на рис.2 еще одну линию регрессии с использованием только галактик поля. Она показана на рисунке пунктиром и дает несколько меньшее значение искомого радиуса, $R_0 = 0.69$ Мпк.

3. Радиус R_0 и положение центроида Местной группы. Как известно, Местная группа имеет бинарную (гантелеобразную) форму.

Млечный Путь с его спутниками и Андромеда (М31) с ее спутниками разделены расстоянием 0.77 Мпк и движутся навстречу друг другу со скоростью 123 км с^{-1} . Ниже мы рассматриваем, насколько оценка радиуса нулевой скорости для Местной группы зависит от того, где находится ее центр масс. Мы предполагаем, что центр масс нашей группы расположен на линии, соединяющей Млечный Путь и Андромеду на произвольном относительном расстоянии $x = D_c / D_{M31}$. Для каждого значения x с шагом 0.05 в интервале от 0 (центр совпадает с Млечным Путем) до 1 (центр совпадает с М31) нами были вычислены расстояния и скорости галактик, используя выражения (2) и (3). В каждом случае мы строили хаббловскую диаграмму, аналогичную рис.2, и определяли радиус R_0 по критерию χ^2 . Результаты представлены в табл.2. Первый столбец указывает относительное положение центра масс Местной группы, второй и третий - значение радиуса R_0 для всех галактик и отдельно для галактик поля. Четвертый столбец показывает дисперсию скоростей относительно хаббловской регрессии и последний - дисперсию скоростей после квадратичного вычитания ошибок $H_0 \cdot \sigma_D$, вызванных ошибками измерения расстояний до галактик. Чтобы уменьшить вклад

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ХАББЛОВСКОГО ПОТОКА ВОКРУГ МЕСТНОЙ ГРУППЫ ПРИ РАЗНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ЦЕНТРА ГРУППЫ МЕЖДУ МЛЕЧНЫМ ПУТЕМ и М31

Положение центра	R_0 Мпк	R_0 , поле Мпк	σ_v км с ⁻¹	σ_{v_c} км с ⁻¹
0.00	0.73	0.69	31.9	20.5
0.05	0.76	0.70	31.4	19.8
0.10	0.77	0.71	30.6	19.0
0.15	0.78	0.73	29.9	18.3
0.20	0.79	0.74	29.4	17.8
0.25	0.79	0.75	29.1	17.2
0.30	0.81	0.77	28.9	17.0
0.35	0.83	0.79	28.6	16.8
0.40	0.83	0.80	28.3	16.7
0.45	0.85	0.81	28.1	16.6
0.50	0.86	0.83	27.8	16.3
0.55	0.95	0.89	23.8	12.8
0.60	0.90	0.89	37.7	22.4
0.65	0.92	0.91	38.5	23.2
0.70	0.93	0.92	39.6	24.3
0.75	0.94	0.94	40.5	25.2
0.80	0.96	0.96	41.7	26.4
0.85	0.97	0.97	42.8	27.5
0.90	0.97	0.99	50.3	34.3
0.95	0.81	1.01	59.7	44.0
1.00	0.88	1.02	61.0	46.3

вириальных движений галактик в близких группах, мы вычисляли σ_V и σ_{rc} по галактикам в интервале расстояний от 0.5 до 2.6 Мпк. Приведенные в табл.2 данные позволяют сделать следующие заключения:

а) При любом положении центра масс LG между Млечным Путем и Андромедой радиус сферы нулевой скорости меняется в ограниченном интервале от 0.73 до 0.97 Мпк (или 0.69 - 1.02 Мпк для галактик поля), что свидетельствует об устойчивости оценки R_0 на основе имеющихся наблюдательных данных.

б) При разных положениях центра масс LG дисперсия скоростей галактик относительно хаббловской регрессии меняется от 23 до 61 км с⁻¹, а с учетом ошибок измерения расстояний галактик σ_{rc} меняется в диапазоне (13-46) км с⁻¹. Следовательно, хаббловский поток вокруг Местной группы является довольно холодным.

в) Принимая минимальную величину σ_V или σ_{rc} в качестве индикатора оптимального положения центра масс LG, мы получаем значение $x = D_c/D_{M31} = 0.55 \pm 0.05$. По закону сохранения количества движения это означает, что массы нашей Галактики и M31 находятся в соотношении $M_{MW} : M_{M31} = 0.8 : 1.0$. Близость оценок масс у обеих галактик с небольшим перевесом в пользу Андромеды хорошо согласуется с отношением их максимальной скорости вращения V_m . Согласно Фукуджита и Пиблсу [9], $V_m(MW) = 241 \pm 13$ км с⁻¹, а из LEDA (Lyon Extracalactic Database) имеем $V_m(M31) = 259 \pm 5$ км с⁻¹. Поскольку массы спиральных галактик приблизительно пропорциональны кубу величины V_m , то из приведенных амплитуд вращения следует соотношение масс, $M_{MW} : M_{M31} = 0.8 : 1.0$, совпадающее с нашей оценкой.

Хаббловская диаграмма для окрестностей LG при положении центроида на расстоянии $D_c = 0.55 \cdot D_{M31} = 0.42$ Мпк представлена на рис.3. Верхняя панель рисунка показывает распределение галактик по скоростям и расстояниям относительно центра масс с указанием соответствующих ошибок в скоростях и расстояниях. Нижняя панель содержит ссылки на порядковые номера галактик в табл.1. Как видно из рисунка, положение радиуса сферы нулевой скорости наиболее чувствительно к скоростям и расстояниям всего лишь нескольких "стратегически расположенных" галактик: LeoA, WLM, DDO210 и SagDIG.

4. *Влияние тангенциальных движений.* До сих пор мы предполагали, что тангенциальные скорости галактик пренебрежимо малы. Чтобы проверить, в какой степени это предположение влияет на оценку радиуса R_0 , мы выполнили численные моделирования хаббловской диаграммы, добавляя к лучевой скорости каждой галактики из табл.1 еще тангенциальную компоненту. Распределение тангенциальных скоростей предполагалось гауссовым со средним $\langle V_t \rangle$ и

стандартным отклонением $\sigma(V_i) = 30 \text{ км с}^{-1}$. Ориентация вектора тангенциальной скорости по позиционному углу задавалась равномерно случайной. Принимая положение центра LG на $D_c/D_{M31} = 0.55$, мы выполнили 10 серий моделирования при $\langle V_i \rangle = 35 \text{ км с}^{-1}$ и $\langle V_i \rangle = 70 \text{ км с}^{-1}$. Последняя величина соответствует дисперсии лучевых скоростей

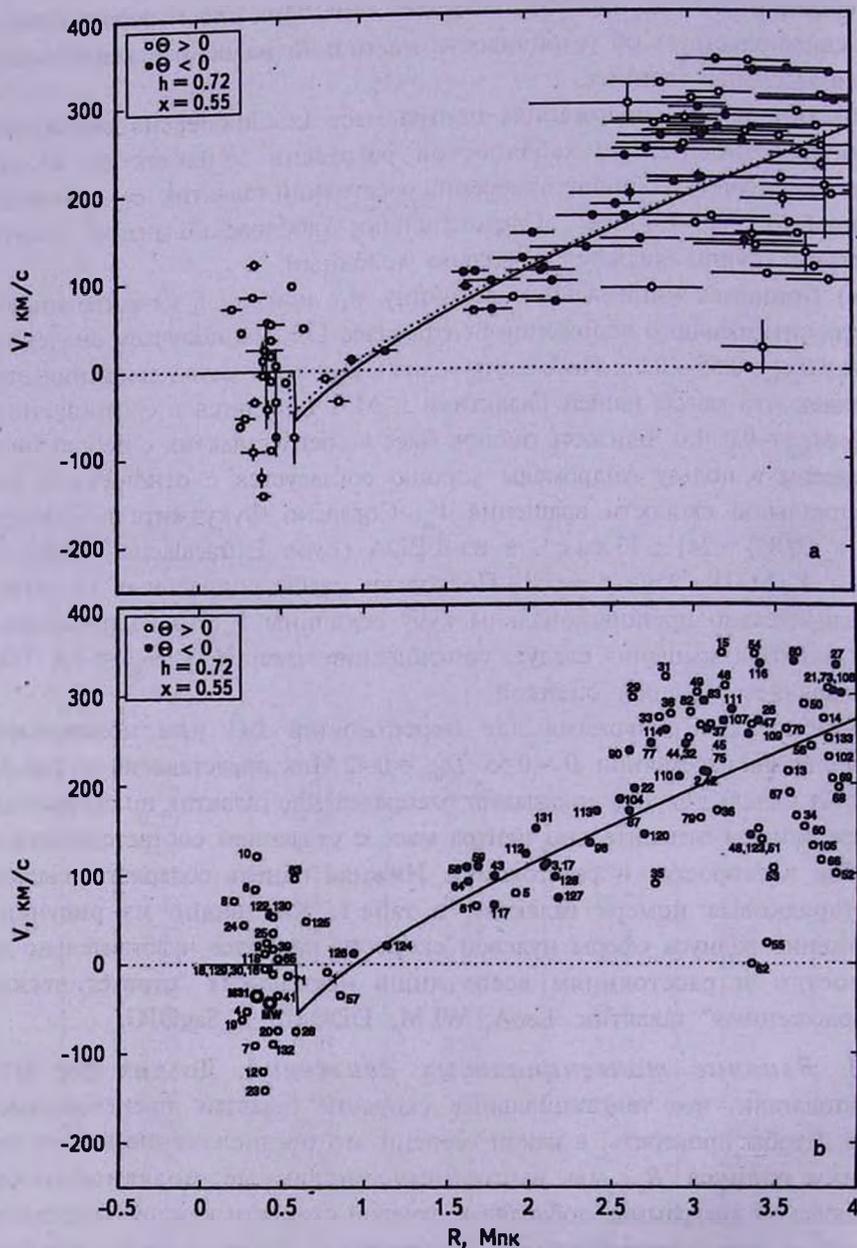


Рис.3. Хаббловская диаграмма окрестностей Местной группы в случае, когда центр масс находится на относительном расстоянии 0.55 в сторону M31.

галактик в LG и группе М81. Результаты определения радиуса R_0 представлены в табл.3. Как следует из этих данных, оценки радиуса флуктуируют вокруг среднего значения $R_0 = 0.96$ Мпк с характерным разбросом всего ± 0.03 Мпк.

Таблица 3

ЗНАЧЕНИЕ РАДИУСА R_0 ДЛЯ МЕСТНОЙ ГРУППЫ ПРИ НАЛИЧИИ У ГАЛАКТИК ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ

	R_0 (Мпк) ($V_t = 35 \text{ км с}^{-1}$)	R_0 (Мпк) ($V_t = 70 \text{ км с}^{-1}$)
	0.99	0.89
	0.96	1.03
	0.95	0.96
	0.96	0.98
	0.95	0.91
	0.94	0.95
	0.99	1.02
	0.96	0.97
	0.91	0.98
	0.95	0.95
Среднее	0.96 ± 0.02	0.96 ± 0.04

Возвращаясь к оценке полной массы LG, мы принимаем в (1) возраст Вселенной $T_0 = 13.7 \pm 0.2$ млрд.лет [2], что приводит к выражению

$$M_T / M_\odot = 1.46 \cdot 10^{12} \cdot (R_0 / \text{Мпк})^3. \quad (6)$$

При указанной погрешности в оценке T_0 и значении радиуса сферы нулевой скорости $R_0 = (0.96 \pm 0.03)$ Мпк величина полной массы Местной группы равна $M_T(LG) = (1.29 \pm 0.14) \cdot 10^{12} M_\odot$. Пренебрегая массой других членов LG, мы получаем значения полной массы двух главных членов группы: $M_{MW} = 5.8 \cdot 10^{11} M_\odot$ и $M_{M81} = 7.1 \cdot 10^{11} M_\odot$.

5. Радиус R_0 для группы М81. Хаббловская диаграмма для галактик в окрестностях М81 представлена на рис.4. Все обозначения здесь такие же, как и на рис.2. Скорости и расстояния галактик выражены по отношению к центроиду группы, совмещенному с ярчайшей галактикой М81. Пересечение хаббловской регрессии с линией нулевой скорости дает $R_0 = 1.10$ Мпк. Регрессия отдельно для изолированных галактик (пунктирная кривая) приводит к несколько меньшей оценке, $R_0 = 1.05$ Мпк.

Как известно, второй по светимости галактикой в этой группе является М82, лучевая скорость которой на 240 км с^{-1} больше, чем у М81. Предполагая, что центр масс группы располагается на линии, соединяющей М81 и М82, мы определили скорости и расстояния галактик по отношению к новому центру и построили соответствующие

хаббловские регрессии. Результаты приведены в табл. 4. Первая колонка таблицы указывает относительное положение центра между M81 ($x=0$) и M82 ($x=1$), вторая и третья колонки дают значение радиуса R_0 для всех галактик и отдельно для галактик поля, две последние колонки

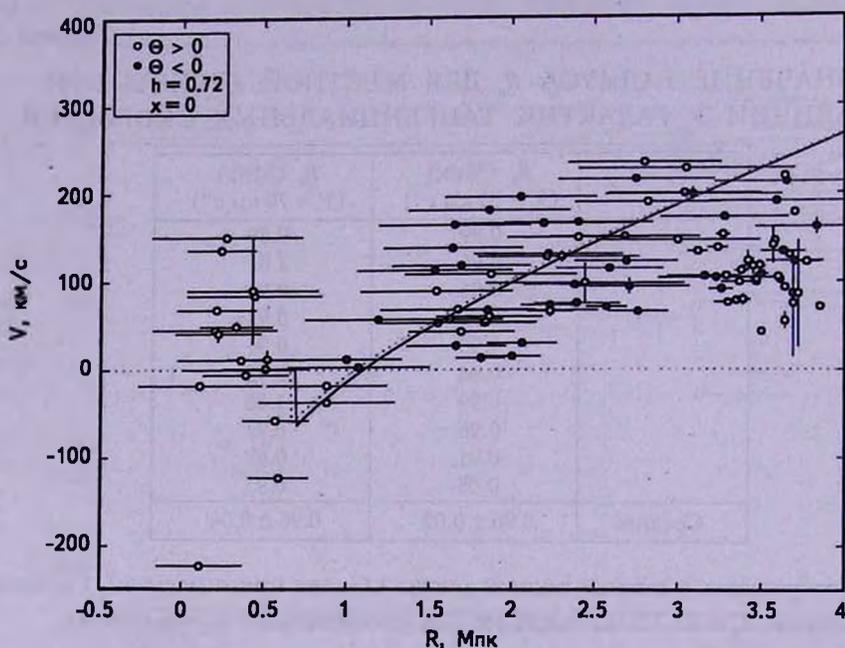


Рис.4. Хаббловская диаграмма для группы M81 и ее окрестностей в случае, когда центром группы является галактика M81.

содержат значения дисперсии скоростей без учета и с учетом ошибок расстояния галактик, $H_0 \cdot \sigma_D$. Оценки R_0 и σ_V сделаны только по галактикам, расположенным в пределах от 0.6 до 3.0 Мпк от центра группы. Из приведенных данных мы можем сделать два заключения:

а) Дисперсия скоростей галактик относительно хаббловской регрессии достигает минимума при положении центра масс группы на расстоянии 0.35 ± 0.05 от M81 в направлении M82. Этому значению соответствует отношение масс двух галактик $M_{M82} : M_{M81} = (0.54 \pm 0.12) : 1$. Полученное соотношение масс согласуется в пределах погрешности с отношением инфракрасных К-светимостей этих галактик, $L_{M82} : L_{M81} = 0.47 : 1$, по данным 2MASS-обзора.

б) Как и в случае окрестностей LG, галактики вокруг группы M81 демонстрируют удивительную "холодность" хаббловского потока. При оптимальном положении центра масс группы ($x=0.35$) дисперсия скоростей относительно хаббловской регрессии не превышает 30 км с^{-1} , а с учетом ошибок измерения расстояний она падает до нескольких км с^{-1} .

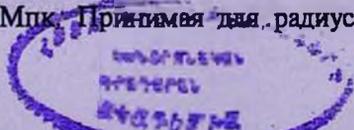
Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ ХАББЛОВСКОГО ПОТОКА ВОКРУГ ГРУППЫ М81 ПРИ РАЗНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ЦЕНТРА ГРУППЫ МЕЖДУ М81 И М82

Положение центра	R_0 (Мпк)	R_0 , поле (Мпк)	σ_v (км с ⁻¹)	σ_{rc} (км с ⁻¹)
0.00	1.10	1.05	49.9	22.2
0.05	1.07	1.03	45.4	17.7
0.10	1.04	1.01	41.2	13.5
0.15	1.01	0.98	37.2	9.7
0.20	0.98	0.96	33.7	6.2
0.25	0.95	0.94	31.0	3.4
0.30	0.92	0.92	29.1	1.5
0.35	0.89	0.90	28.2	0.6
0.40	0.83	0.86	30.1	2.5
0.50	0.80	0.84	32.6	5.0
0.55	0.79	0.82	35.7	8.2
0.60	0.77	0.80	39.4	11.8
0.65	0.74	0.78	43.6	16.1
0.70	0.71	0.76	48.2	20.6
0.75	0.69	0.74	53.0	25.5
0.80	0.66	0.72	58.0	30.5
0.85	0.63	0.70	63.0	35.5
0.90	0.60	0.69	68.4	40.8
0.95	0.63	0.67	73.8	46.3
1.00	0.60	0.65	79.4	51.9

Хаббловская диаграмма для галактик вокруг М81 и М82 при $x=0.35$ представлена на рис.5. Верхняя панель рисунка показывает ошибки измеренных расстояний и скоростей галактик. На нижней панели мы указываем номера, под которыми галактики обозначены в табл.1. Для определения радиуса R_0 наиболее критичными являются положения галактик UGC 6456 = VII Zw403, NGC 4236, KKH37 и UGC 7242, что делает их привлекательными мишенями для применения более рафинированных методов оценки расстояний с целью уточнения величины R_0 .

Чтобы определить роль возможных тангенциальных движений, мы предприняли численное моделирование хаббловского потока вокруг М81/М82, задаваясь теми же параметрами, что и в случае LG. При средней тангенциальной скорости галактик $\langle V_T \rangle = 35 \text{ км с}^{-1}$ мы получили практически то же самое положение центра масс группы $\langle x \rangle = 0.35 \pm 0.03$ и среднее значение радиуса сферы нулевой скорости $\langle R_0 \rangle = 0.89 \pm 0.05$ Мпк. Моделирование при $\langle V_T \rangle = 70 \text{ км с}^{-1}$ оставило эти параметры почти неизменными, но увеличило их погрешности: $\langle x \rangle = 0.37 \pm 0.05$ и $\langle R_0 \rangle = 0.87 \pm 0.10$ Мпк. Принимая для радиуса R_0 значение 0.89 ± 0.05 Мпк, мы



получаем оценку полной массы группы $M_T = (1.03 \pm 0.17) \cdot 10^{12} M_\odot$. Тогда, пренебрегая вкладом других членов группы, имеем индивидуальные массы для двух самых ярких галактик: $M_{M81} = 6.7 \cdot 10^{11} M_\odot$ и $M_{M82} = 3.6 \cdot 10^{11} M_\odot$.

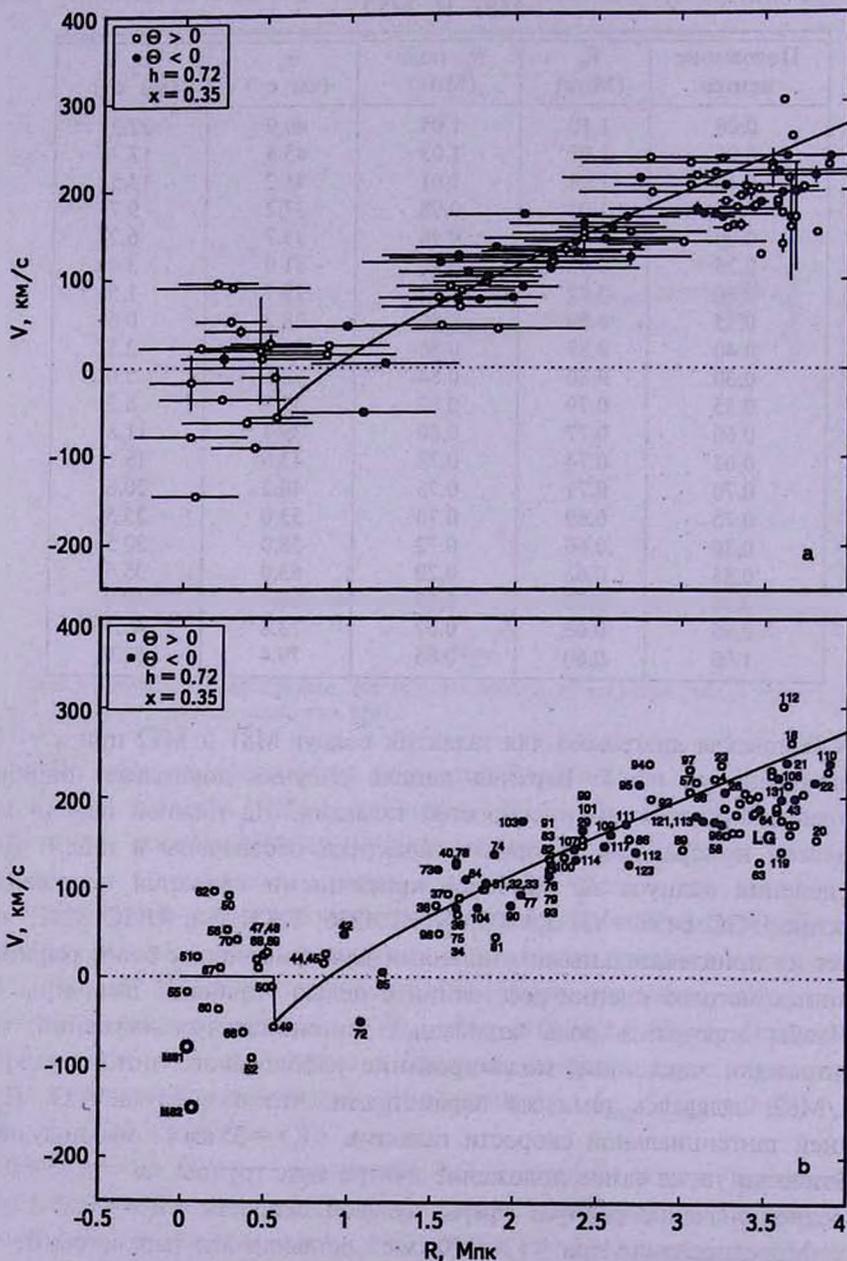


Рис.5. Хаббловская диаграмма для группы M81 и ее окрестностей в случае, когда центр группы находится между M81 и M82 на относительном расстоянии 0.35 от M81.

6. *Другой подход к оценке радиуса R_0* . Дж.Пиблс (частное сообщение) обратил наше внимание на возможность иного хода рассуждений при оценке радиуса сферы нулевой скорости для группы или скопления. Пусть галактика G не участвует в общем космологическом расширении, а падает радиально на центр группы С со скоростью V_i (см. рис.1б). Если центр группы движется от нас со скоростью V_c , направленной по лучу зрения, то скорость по лучу зрения у галактики G, находящейся на угловом расстоянии Θ от центра группы, будет

$$V_g = V_c \cdot \cos\Theta - V_i \cdot \cos\lambda. \quad (7)$$

Тогда скорость падения галактики выражается как

$$V_i = [V_c \cdot \cos\Theta - V_g] / \cos\lambda, \quad (8)$$

и именно эту скорость следует сопоставлять с расстоянием галактики от центра группы, определяемым из (2), при описании картины движения галактик вокруг массивной группы. Когда углы λ и Θ малы (т.е. галактика находится почти строго перед или позади центра группы), выражения (3) и (8) дают приблизительно одинаковую скорость падения галактики на центр группы. Очевидно, что при больших углах λ и Θ расхождение между двумя подходами становится значительным.

Чтобы определить радиус R_0 этим способом, мы построили хаббловскую диаграмму для Местной группы и ее окрестностей при положении центра масс на $x = D_c / D_{M81} = 0.55$. Используя соотношение (8) и исключая галактики с углами $\lambda > 45^\circ$, мы получили для радиуса сферы нулевой скорости значение $R_0 = 0.92$ Мпк (и 0.78 Мпк для галактик поля с $TI < 0$). Дисперсия скоростей относительно хаббловской регрессии получилась равной 29 км с^{-1} или 18 км с^{-1} после учета ошибок в расстояниях галактик. Как видим, в случае LG различия в оценках R_0 и σ_v при двух подходах оказываются небольшими. Однако, рассматривая этим способом хаббловский поток вокруг группы М81, мы обнаружили значительные расхождения. При прежнем положении центра масс $x = 0.35$ и исключении галактик с $\lambda > 45^\circ$ мы получили значительно больший радиус $R_0 = 1.31$ Мпк (или 1.23 Мпк для галактик поля). Рассеяние галактик на хаббловской диаграмме также выросло, составив $\sigma_v = 70 \text{ км с}^{-1}$ и $\sigma_{vc} = 35 \text{ км с}^{-1}$.

Прямое сравнение двух рассмотренных способов оценки радиуса R_0 пока затруднено из-за отсутствия наблюдательных данных о тангенциальных скоростях галактик. Однако такие данные могут появиться в недалеком будущем после осуществления космических проектов типа SIM (Space Interferometric Mission) [10]. При отсутствии данных о полных векторах скоростей галактик, два этих метода делают фактически различный акцент на свойствах хаббловского потока в

окрестности близких групп. В первом случае мы предполагали, что большинство рассматриваемых галактик находятся не в зоне падения, а на асимптотической хаббловской зависимости (модель малого аттрактора). Второй подход предполагает, что многие рассматриваемые галактики вовлечены в зону падения (модель большого протяженного аттрактора). Имеющиеся ограниченные наблюдательные данные пока не позволяют сделать выбор между двумя описанными подходами.

7. Заключительные замечания. Выполненные в последние 2-3 года измерения расстояний до многих близких галактик с точностью ~10% послужили наблюдательной основой для определения массы близких групп не по внутренним (вириальным) движениям, а по внешнему хаббловскому полю скоростей вокруг групп. Применение этого метода, предложенного Линден-Беллом [1] и Сэндиджем [3], предполагает следующие условия: 1) сферически-симметричную форму потенциала группы, 2) малые случайные движения галактик относительно регулярного хаббловского потока и 3) достаточно высокую плотность поля пробных частиц (галактик), для которых известны лучевые скорости и расстояния с высокой точностью.

Основываясь на самых последних измерениях расстояний галактик на Космическом телескопе Хаббла, мы определили радиусы сферы нулевой скорости $R_0 = 0.96 \pm 0.03$ Мпк для LG и $R_0 = 0.89 \pm 0.05$ Мпк для группы галактик вокруг M81/M82. При указанных погрешностях формальная точность оценки массы группы новым методом составляет всего ~15%, что примерно в три раза лучше, чем по вириальным движениям.

При интегральных светимостях $L_B = 10.1 \cdot 10^{10} L_\odot$ для Местной группы и $L_B = 6.1 \cdot 10^{10} L_\odot$ для группы M81 [7], их отношения полной массы к B -светимости составляют всего $(12.8 \pm 1.4) M_\odot/L_\odot$ и $(16.9 \pm 12.8) M_\odot/L_\odot$, соответственно. Полученные значения M_T/L_B существенно ниже старых вириальных оценок $M_T/L_B \sim 100 M_\odot/L_\odot$ [11], считавшихся типичными для бедных групп галактик. Поскольку более половины галактик Местного объема входит в группы типа LG и группы M81, то это приводит к довольно низкой средней плотности материи в Местном объеме.

Случайные движения галактик относительно регулярного хаббловского потока составляют всего 15 - 25 км с⁻¹ в зоне $(1 - 3)R_0$ вокруг LG и 3 - 28 км с⁻¹ в такой же зоне вокруг M81. Наблюдаемая "холодность" хаббловского потока независимо свидетельствует о низкой плотности той части материи в Местном объеме, которая сконцентрирована в группах.

Заслуживает быть отмеченным также тот факт, что R_0 -метод позволил определить соотношение масс у двух самых ярких членов рассмотренных групп. Основываясь на минимальной величине разброса галактик

относительно Хаббловской регрессии, мы получили для Млечного Пути и М31 отношение масс 0.8 : 1.0, а для М82 и М81 нашли отношение масс 0.54 : 1.00, что весьма близко к отношению инфракрасных светимостей этих галактик.

Авторы благодарны Дж.Пиблсу за ценные дискуссии. Работа поддержана грантом РФФИ 04-02-16115 и грантом DFG-РФФИ 02-02-04012.

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: ikar@sao.ru

² Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
Россия, e-mail: okashibadze@mail.ru

TOTAL MASSES OF THE LOCAL GROUP AND M 81 GROUP DERIVED FROM THE LOCAL HUBBLE FLOW

I.D.KARACHENTSEV¹, O.G.KASHIBADZE²

Based on accurate measurements of distances to nearby galaxies made with Hubble Space Telescope, we determined the radii of the zero-velocity surface: $R_0 = 0.96 \pm 0.03$ Mpc for the Local Group and $R_0 = 0.89 \pm 0.05$ Mpc for the group of galaxies around M81/M82. This yields the total masses of the groups to be $M_T = (1.29 \pm 0.14) \cdot 10^{12} M_\odot$ and $M_T = (1.03 \pm 0.17) \cdot 10^{12} M_\odot$, respectively. The R_0 -method allowed us to determine the mass ratio of the brightest two members in the considered groups. Based on the minimum scatter of galaxies with respect to the Hubble regression, we derived a mass ratio of 0.8 : 1.0 for the Milky Way and Andromeda, and 0.54 : 1.00 for M82 and M81, which is quite close to the ratio of luminosities of these galaxies.

Key words: (*Galaxies:*)Local Group:M81 group - *galaxies:masses*

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.Lynden-Bell*, Observatory, **101**, 111, 1981.
2. *D.N.Spergel, L.Verde, H.V.Peiris et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **148**, 175, 2003.
3. *A.Sandage*, Astrophys. J., **307**, 1986.
4. *A.Sandage*, Astrophys. J., **317**, 557, 1987.

5. *E.Giraud*, *Astron. Astrophys.*, **231**, 1990.
6. *I.D.Karachentsev, M.E.Sharina, I.D.Makarov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **389**, 812, 2002.
7. *I.D.Karachentsev*, *Astron. J.*, **129**, 17, 2005.
8. *I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva, W.K.Hutchmeier, D.I.Makarov*, *Astron. J.*, **127**, 2031, 2004(=CNG).
9. *M.Fukugita, P.J.E.Peebles*, *Astrophys. J.*, **616**, 643, 2004.
10. *P.J.E.Peebles, S.D.Phelps, E.J.Shaya, R.B.Tully*, *Astrophys. J.*, **554**, 104, 2001.
11. *R.B.Tully*, *Astrophys. J.*, **321**, 280, 1987.
12. *A.C.Seth, J.J.Dalkanton, R.S. de Jong*, *Astron. J.*, **129**, 1331, 2005.
13. *J.M.Cannon, E.D.Skillman, K.R.Sembach, D.J.Bomans*, *Astrophys. J.*, **618**, 247, 2005.
14. *R.L.Fingerhut, M.L.McCall, M. De Robertis et al.*, *Astrophys. J.*, **587**, 672, 2003.
15. *D.R.Silva, P.Massey, K.DeGioia-Eastwood, P.A.Henning*, *Astrophys. J.*, **129**, 1331, 2005.