

УДК: 524.74-323.4

МЕСТНОЕ ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ГАЛАКТИК

И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ, Д.И.МАКАРОВ

Поступила 22 августа 2000

Рассмотрена выборка 145 галактик с лучевыми скоростями относительно центроида Местной группы $V_{10} < 500$ км/с и фотометрическими оценками расстояния $D < 8$ Мпк. Поле пекулярных скоростей у этих галактик описывается тензором локальной величины параметра Хаббла H_0 с главными значениями 81:62:48 в км/с/Мпк, которые имеют стандартную погрешность ~ 4 км/с/Мпк. Малая ось хаббловского эллипсоида ориентирована почти вдоль полярной оси Местного сверхскопления, а большая ось образует угол $\theta = (29 \pm 5)^\circ$ с направлением на центр скопления Virgo. Такая конфигурация поля пекулярных скоростей показывает неудовлетворительное согласие с моделью сферически-симметричного потока галактик на скопление Virgo. Одной из причин этого различия может быть вращение Местного сверхскопления. Пекулярные скорости галактик в объеме $D < 8$ Мпк характеризуются дисперсией $\sigma_v = 74$ км/с, значительная часть которой обусловлена вириальными движениями галактик в группах и ошибками расстояния. Для галактик поля, расположенных в слое $1 < D < 3$ Мпк вокруг Местной группы, дисперсия лучевых скоростей не превышает 25 км/с. Зависимость скорость-расстояние, построенная по 20 наиболее близким галактикам вокруг Местной группы с $D < 3$ Мпк и ошибками $\sigma(D) < 0.2$ Мпк, показывает ожидаемый эффект гравитационного торможения. Используя наблюдаемую оценку радиуса сферы нулевой скорости, $R_0 = (0.96 \pm 0.05)$ Мпк, мы определили полную массу Местной группы $(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{12} M_\odot$, которая хорошо согласуется с суммой вириальных масс подгрупп галактик вокруг Млечного пути и М31. Отношение полной (в пределах R_0) массы Местной группы к ее светимости составляет $M/L = (23 \pm 4) M_\odot/L_\odot$, что не требует наличия сверхмассивного темного гало вокруг нашей Галактики и М31.

1. *Введение.* В 1977г. Талли и Фишер [1] обнаружили существование тесной корреляции между интегральной светимостью спиральных галактик и амплитудой внутреннего движения в них, определяемой по ширине эмиссионной линии нейтрального водорода 21 см. С тех пор соотношение Талли-Фишера стало эффективным инструментом для массового определения расстояний до спиральных галактик независимо от их лучевых скоростей. Позднее аналогичное соотношение между глобальными параметрами было установлено Фабер и Джексоном для эллиптических и линзовидных галактик. Применение этих зависимостей позволило оценивать пекулярные скорости S и E галактик и тем самым исследовать поле нехаббловских движений галактик. Усилиями многих авторов [2-4] было установлено наличие в Местном сверхскоплении крупномасштабного потока галактик с характерной амплитудой ~ 300 км/с, направленного к центру скопления в Virgo. За пределами Местного сверхскопления на масштабах 50-200 Мпк были обнаружены упорядоченные (коллективные) движения галактик в направлении "Великого аттрактора" в созвездии Centaurus с амплитудой $\sim 200 - 600$ км/с [5-7]. Однако вплоть до недавнего времени характер коллективных движений у самых близких галактик в окрестностях Местной группы оставался неизвестным. Причина такого

пробела вызвана тем, что выборка галактик, ограниченная фиксированным объемом, состоит на 90% из карликовых галактик, для которых модули расстояния по зависимости Талли-Фишера определяются с большой погрешностью, $\sigma(m - M) \geq 1^m.0$.

В 90-е годы в Специальной астрофизической обсерватории РАН осуществлялась программа получения изображений в разных фильтрах близких галактик из выборки Краан-Кортевег и Тамманна [8] с лучевыми скоростями $V < 500$ км/с. В результате около 100 карликовых галактик были впервые разрешены на звезды. Для большинства из них впервые были определены фотометрические модули расстояния с погрешностью $\sigma(m - M) = 0^m.4$, основываясь на светимости ярчайших голубых и красных сверхгигантов [9-16]. Караченцев и Макаров [17] использовали эти данные для анализа поля пекулярных скоростей в Местном объеме.

Авторами было показано, что движение Солнца относительно центроида Местной группы характеризуется скоростью $V_s = 316$ км/с в направлении апекса $l_s = 93^\circ$, $b_s = -4^\circ$ в галактических координатах; остаточные лучевые скорости галактик по отношению к однородному хаббловскому расширению, $V = HD$, имеют дисперсию ~ 72 км/с, а само поле пекулярных скоростей показывает отчетливые признаки анизотропии на масштабе ~ 5 Мпк. В этом анализе были использованы оценки расстояния для 75 галактик за пределами Местной группы (преимущественно в северном полушарии). За последние пять лет число галактик с измеренными фотометрическими расстояниями в интервале $1 < D < 8$ Мпк увеличено в два раза. Для части из них появились высокоточные оценки расстояния, сделанные по светимости звезд ветви красных гигантов (RGB). Типичная погрешность RGB-метода составляет всего $\sim 0^m.15$ или $\sim 7\%$ [18], что позволяет исследовать местное поле скоростей галактик с приемлемой точностью. Быстрый количественный и качественный рост данных о расстояниях близких галактик дает нам основание вернуться к анализу поля пекулярных скоростей.

2. *Хаббловская зависимость "скорость-расстояние" в Местном объеме.* Целенаправленные поиски близких карликовых галактик, предпринятые различными наблюдательными группами в оптическом и радиодиапазонах, привели к существенному увеличению числа галактик Местного объема [19-21]. За два последних десятилетия выборка галактик с лучевыми скоростями $V < 500$ км/с выросла более чем в два раза. По состоянию на 1999г. сводка таких галактик была представлена в [22]. Ниже в табл.1 мы приводим дополненный список галактик Местного объема. В него включены 167 галактик с лучевыми скоростями, исправленными за движение Солнца относительно центроида Местной группы, $V_{LG} < 500$ км/с, и расстояниями $D < 10$ Мпк. Первый столбец табл.1 указывает имя галактики, второй и третий - экваториальные координаты на эпоху (1950.0), четвертый

Таблица 1

СПИСОК БЛИЗКИХ ГАЛАКТИК С РАССТОЯНИЯМИ И ЛУЧЕВЫМИ СКОРОСТЯМИ

Галактика	RA (1950.0)	DEC	D	V_{LG}	Галактика	RA (1950.0)	DEC	D	V_{LG}
PGC 621	00 05 41.0	- 34 51 24	1.55	216	kk 69	08 49 44.1	+33 59 13	9.20	420
NGC 55	00 12 38.0	- 39 29 54	1.34	106	F 565-v1	09 16 38.4	+21 48 54	7.90	379
NGC 59	00 12 53.0	- 21 43 18	4.39	431	NGC 2915	09 26 31.0	- 76 24 30	5.30	184
ESO 294-10	00 24 06.2	- 42 07 56	1.71	81	NGC 2903	09 29 19.9	+21 43 19	8.90	443
UGC 288	00 26 22.6	+43 09 39	6.73	464	Holmberg I	09 36 00.0	+71 24 47	6.66	288
NGC 247	00 44 40.0	- 21 02 00	2.53	215	NGC 2976	09 43 10.0	+68 08 43	4.57	139
NGC 253	00 45 05.7	- 25 33 40	2.58	281	UGC 5272	09 47 25.2	+31 43 17	7.10	460
NGC 300	00 52 32.0	- 37 57 12	2.15	114	UGC 5288	09 48 38.5	+08 03 43	6.85	376
UGC 685	01 04 43.0	+16 25 01	5.95	350	BK 3N	09 49 42.0	+69 12 17	2.79	101
NGC 404	01 06 39.2	+35 27 06	2.30	195	NGC 3031	09 51 27.6	+69 18 13	3.63	106
UGC 1281	01 46 39.3	+32 20 40	5.44	367	NGC 3034	09 51 45.3	+69 55 11	3.90	360
NGC 784	01 58 24.9	+28 36 09	5.01	389	K 61	09 53 00.8	+68 49 47	3.80	4
Cas I	02 02 00.0	+68 45 40	3.60	284	Holmberg IX	09 53 28.0	+69 16 53	3.41	189
Maffei I	02 32 51.5	+59 26 19	2.10	242	UGC 5340	09 53 52.9	+29 03 50	5.89	429
Maffei II	02 38 07.9	+59 23 24	2.67	225	Sex B	09 57 22.9	+05 34 22	1.29	111
UGC 2684	03 17 34.2	+17 06 54	6.49	438	NGC 3077	09 59 21.9	+68 58 33	3.49	153
IC 342	03 41 58.6	+67 56 26	2.87	237	PGC 29086	10 00 05.9	- 05 46 12	9.16	426
UGC 2905	03 54 10.0	+16 22 50	5.83	344	NGC 3109	10 00 49.0	- 25 55 00	1.26	110
UGCA 86	03 55 00.0	+66 59 00	3.90	277	K 63	10 01 18.0	+66 47 53	3.80	3
Cam A	04 19 26.7	+72 41 27	3.50	84	UGC 5423	10 01 25.3	+70 36 27	5.27	493
NGC 1569	04 26 05.8	+64 44 18	1.73	105	Antlia	10 01 47.0	- 27 05 27	1.32	65
NGC 1560	04 27 08.2	+71 46 29	2.98	169	UGC 5427	10 01 48.1	+29 36 34	7.14	424
UGCA 92	04 27 24.0	+63 30 24	1.78	88	NGC 3115	10 02 44.7	- 07 28 31	9.16	417
NGC 1705	04 53 06.0	- 53 26 30	7.10	401	PGC 29300	10 03 12.4	- 07 44 16	9.16	474
UGCA 105	05 09 36.0	+62 31 00	3.22	280	UGC 5456	10 04 40.0	+10 36 25	2.74	355
UGC 3303	05 22 19.2	+04 27 24	7.16	447	Sex A	10 08 30.0	- 04 28 00	1.41	94
Orion	05 42 22.0	+05 02 30	6.40	276	IC 2574	10 24 41.3	+68 40 18	3.78	186
A 0554+07	05 54 51.0	+07 28 40	5.50	323	UGC 5672	10 25 36.0	+22 49 40	6.25	428
UGC 3476	06 27 11.9	+33 20 13	7.01	477	DDO 82	10 26 48.0	+70 52 33	4.48	191
UGC 3600	06 52 12.0	+39 09 18	7.30	426	NGC 3274	10 29 29.5	+27 55 40	6.55	461
UGC 3698	07 05 41.4	+44 27 42	7.20	466	NGC 3377A	10 44 43.4	+14 20 07	9.33	431
NGC 2337	07 06 37.1	+44 32 20	7.88	477	UGC 5918	10 46 17.0	+65 47 40	7.44	466
UGC 3755	07 11 06.3	+10 36 18	4.14	198	K 73	10 49 28.0	+69 48 44	4.04	15
UGC 3817	07 19 06.0	+45 12 00	8.55	479	NGC 3621	11 15 51.0	- 32 32 24	6.20	437
NGC 2366	07 23 34.2	+69 18 27	3.45	254	UGC 6456	11 24 36.0	+79 16 00	3.03	99
UGC 3860	07 24 49.9	+40 52 23	5.73	371	UGC 6541	11 30 45.2	+49 30 43	3.52	303
NGC 2403	07 32 05.5	+65 42 40	3.18	267	NGC 3738	11 33 04.5	+54 47 58	3.52	310
UGC 3966	07 38 01.0	+40 13 47	6.85	370	NGC 3741	11 33 25.2	+45 33 43	3.47	263
UGC 3974	07 39 02.7	+16 55 17	4.27	161	UGC 6817	11 48 16.8	+39 09 31	3.92	251
kk 65	07 39 40.2	+16 40 47	4.27	168	NGC 4068	12 01 29.7	+52 52 01	5.25	290
UGC 4115	07 54 13.6	+14 31 17	5.27	211	NGC 4144	12 07 28.3	+46 44 07	9.77	319
NGC 2537	08 09 43.1	+46 08 33	6.88	477	NGC 4163	12 09 37.6	+36 26 51	3.55	165
Holmberg II	08 13 53.5	+70 52 13	3.60	312	NGC 4190	12 11 13.6	+36 54 40	3.47	234
K 52	08 18 43.0	+71 11 25	2.95	269	K 90	12 12 26.9	+36 29 47	4.09	286
UGC 4426	08 25 07.0	+42 01 13	5.65	399	NGC 4214	12 13 08.8	+36 36 19	4.09	295
DDO 53	08 29 33.0	+66 21 01	2.50	150	UGC 7298	12 14 00.6	+52 30 18	8.59	253
UGC 4483	08 32 07.0	+69 57 16	3.63	304	NGC 4236	12 14 21.8	+69 44 36	3.24	160
NGC 2683	08 49 34.8	+33 36 23	9.20	364	NGC 4244	12 14 59.9	+38 05 06	4.53	255

Таблица (окончание)

Галактика	RA (1950.0)	DEC	D	V_{lg}	Галактика	RA (1950.0)	DEC	D	V_{lg}
NGC 4395	12 23 20.9	+33 49 22	4.22	315	PGC 48111	13 34 32.0	- 27 47 30	4.20	380
UGCA 281	12 23 50.6	+48 46 07	5.73	350	NGC 5237	13 34 40.0	- 42 35 36	3.35	82
UGC 7559	12 24 37.1	+37 25 09	5.10	231	UGC 8638	13 36 59.0	+25 01 34	2.30	273
UGC 7577	12 25 15.4	+43 46 13	4.84	240	NGC 5253	13 37 05.0	- 31 23 30	3.90	189
NGC 4449	12 25 45.2	+44 22 15	4.51	251	IC 4316	13 37 29.0	- 28 38 30	4.20	374
UGC 7599	12 26 00.9	+37 30 35	6.90	292	UGC 8651	13 37 44.2	+40 59 32	3.40	273
UGC 7605	12 26 11.0	+35 59 40	4.40	315	NGC 5264	13 38 47.0	- 29 39 42	4.20	269
UGC 7639	12 27 28.5	+47 48 22	8.00	447	PGC 48738	13 42 01.0	- 41 36 30	3.35	307
UGC 7698	12 30 26.2	+31 49 02	6.10	322	UGC 8760	13 48 41.5	+38 16 05	5.10	258
Аrp 211	12 34 56.4	+39 01 12	6.70	481	UGC 8833	13 52 38.2	+36 04 58	3.20	287
UGCA 292	12 36 17.9	+33 01 30	3.10	306	UGC 8837	13 52 55.2	+54 08 58	8.32	274
NGC 4605	12 37 47.5	+61 53 00	5.18	278	ESO 384-16	13 54 05.0	- 35 05 24	4.23	350
IC 3687	12 39 50.9	+38 46 33	3.00	386	NGC 5408	14 00 18.0	- 41 08 11	3.35	290
NGC 4736	12 48 32.4	+41 23 28	4.95	353	NGC 5457	14 01 26.6	+54 35 25	7.40	378
UGC 8024	12 51 39.4	+27 25 28	4.30	355	NGC 5474	14 03 15.3	+53 54 05	6.80	412
GR 8	12 56 10.4	+14 29 09	2.10	136	NGC 5477	14 03 47.9	+54 42 00	7.73	445
Cent 6	13 02 12.8	- 39 48 54	3.35	360	kk 230	14 05 01.5	+35 18 09	1.90	125
NGC 4945	13 02 31.0	- 49 12 12	3.35	297	DDO 187	14 13 38.1	+23 17 07	2.50	174
IC 4182	13 03 30.0	+37 52 23	4.95	352	NGC 5585	14 18 12.9	+56 57 32	8.70	459
UGC 8201	13 04 39.4	+67 58 16	4.88	199	DDO 190	14 22 48.8	+44 45 06	2.90	263
UGC 8215	13 05 50.1	+47 05 43	5.60	297	UGC 9405	14 33 56.0	+57 28 26	8.02	384
NGC 5023	13 09 58.0	+44 18 13	5.40	476	kk 25	16 12 37.3	+54 29 46	1.53	72
UGC 8308	13 11 11.9	+46 34 57	3.72	244	NGC 6503	17 49 58.7	+70 09 26	5.20	294
UGC 8320	13 12 16.6	+46 11 01	4.01	273	NGC 6789	19 16 17.0	+63 52 54	2.15	144
UGC 8331	13 13 20.3	+47 45 37	8.23	346	Sag DIG	19 27 06.0	- 17 47 00	1.06	22
NGC 5102	13 19 07.0	- 36 22 06	3.10	231	UGC 11583	20 29 12.0	+60 17 00	8.20	430
kk 200	13 21 48.1	- 30 42 43	4.20	262	kk 251	20 29 31.9	+60 11 03	5.30	429
NGC 5128	13 22 33.0	- 42 45 24	3.60	302	kk 252	20 30 33.5	+60 38 34	5.30	435
PGC 47171	13 24 42.0	- 41 13 18	3.35	272	NGC 6946	20 33 48.8	+59 58 50	6.03	343
NGC 5204	13 27 43.8	+58 40 32	4.10	341	kk 55	20 44 15.2	+60 13 40	5.40	328
UGC 8508	13 28 46.8	+55 10 03	3.68	187	kk 56	20 47 11.5	+58 25 56	6.40	172
NGC 5206	13 30 41.0	- 47 53 42	3.35	331	Cepheus I	20 49 51.9	+56 42 06	6.00	367
NGC 5229	13 31 58.5	+48 10 16	5.13	461	kk 59	21 02 02.8	+57 05 17	4.70	327
NGC 5238	13 32 42.7	+51 52 09	5.18	346	IC 5152	21 59 25.9	- 51 32 18	1.70	75
PGC 48029	13 33 42.0	- 28 58 54	4.20	360	UGCA 438	23 23 48.0	- 32 39 48	2.08	99
NGC 5236	13 34 11.0	- 29 36 48	4.50	301					

- расстояние в Мпк, пятый - лучевую скорость относительно центроида Местной группы ($V_g = 316$ км/с, $l_g = 93^\circ$, $b_g = -4^\circ$) в км/с. В табл.1 не представлены 33 галактики Местной группы с расстояниями $D < 1$ Мпк, а также вероятные члены скопления Virgo.

Распределение этих галактик по расстояниям и лучевым скоростям приведено на рис.1. Одиннадцать наиболее массивных галактик типа Млечного пути, чья светимость превышает $10^{10} L_\odot$, отмечены черными кружками. Галактики, принадлежащие известным группам, указаны крестами, а изолированные объекты изображены открытыми кружками. Для выделения галактик последней категории (галактик поля) мы использовали т.н. "приливный индекс" [23], который показывал, что "время

пересечения" данной галактики с ее значимой соседкой превышает космологическое время $1/H$.

Линия регрессии $V=HD$, проведенная на рис.1 через начало координат, соответствует локальному значению "постоянной" Хаббла $H = (64 \pm 2)$ км/с/Мпк. Формальная погрешность величины H невелика ($\pm 3\%$), однако

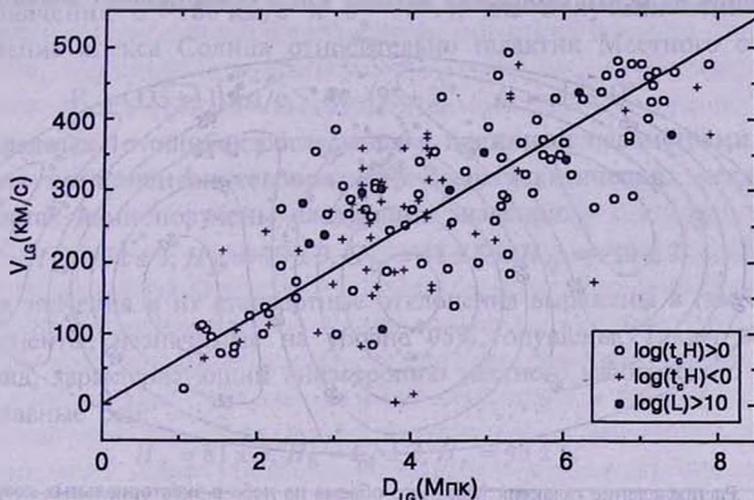


Рис.1. Зависимость скорость-расстояние для 145 галактик Местного объема. Гигантские галактики со светимостью более $10^{10} L_{\odot}$ отмечены черными кружками, карликовые галактики в группах показаны крестами, а изолированные галактики поля - открытыми кружками. Линия регрессии соответствует $H = 64 \pm 2$ км/с/Мпк.

систематическая ошибка, вызванная обрезанием выборки по условию $V_{LG} < 500$ км/с, может быть в несколько раз больше случайной.

Стандартное отклонение галактик относительно линии регрессии составляет 74 км/с (с учетом обсуждаемого ниже эффекта анизотропии). Лишь незначительная часть этой величины обусловлена ошибками измерения лучевых скоростей, которые, как правило, не превышают 5 км/с. Тримя другими источниками рассеяния галактик на хаббловской диаграмме являются: а) ошибки определения расстояния, которые в большинстве случаев составляют $\sim 20\%$; б) вириальные движения у членов групп галактик; с) возможные коллективные движения галактик или эффекты анизотропного расширения Местного объема. Сравнение среднего квадратичного отклонения у членов групп (73 км/с) и изолированных галактик (74 км/с) показывает, что роль вириальных движений в группах не является определяющей. Наиболее массивные галактики, являющиеся обычно динамическими центрами групп, имеют приблизительно такой же разброс на рис.1. (63 км/с), что и карликовые галактики.

3. Местное поле скоростей и анизотропия хаббловского потока. Отношение лучевой скорости галактики, исправленной за

движение к апексу, к ее расстоянию можно рассматривать как индивидуальную оценку параметра Хаббла, $H_i = V_i/D_i$. Распределение величин H_i по небу в экваториальных координатах представлено на рис.2. Галактики с величинами H_i больше или меньше среднего показаны, соответственно, пустыми и черными кружками. Звездой отмечено направление на центр скопления в Virgo. Рис.2 обнаруживает значительные

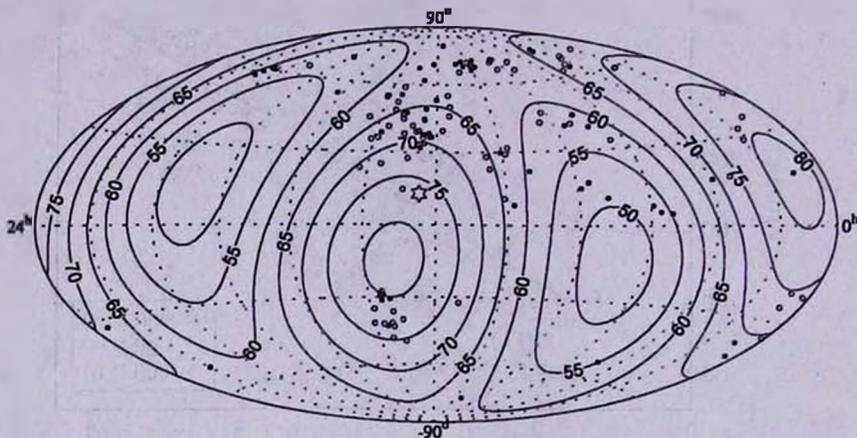


Рис.2. Распределение галактик Местного объема на небе в экваториальных координатах. Галактики с отрицательными и положительными пекулярными скоростями обозначены, соответственно, черными и открытыми кружками. Квадрупольный эффект анизотропии показан линиями постоянной величины параметра H от 50 до 80 км/с/Мпк.

вариации H_i от одной области неба к другой, которые указывают на анизотропный характер Местного поля скоростей.

Для описания анизотропного поля скоростей у близких галактик мы использовали следующую модель. Радиальная скорость галактики V представлялась соотношением

$$V = \text{dex}[0.2(\mu - 25)] \cdot n^T \cdot H \cdot n - n^T \cdot V_{\odot}, \quad (1)$$

где μ - модуль расстояния галактики, H - симметричный ($H_{ij} = H_{ji}$) тензор локальной величины параметра Хаббла, n - единичный вектор, указывающий направление на галактику, а V_{\odot} - вектор скорости Солнца относительно центра Местной группы. Наблюдаемая (гелиоцентрическая) скорость галактики V_h и измеряемый модуль расстояния μ_0 выражались как

$$V_h = V + \epsilon_v, \quad \mu_0 = \mu + \epsilon_{\mu}, \quad (2)$$

где случайные ошибки измерения скорости (включая вириальные движения) и модуля расстояния считались взаимно независимыми с параметрами:

$$E(\epsilon_v) = 0, E(\epsilon_{\mu}^2) = \sigma_v^2, E(\epsilon_{\mu}) = 0, E(\epsilon_{\mu}^2) = \sigma_{\mu}^2, E(\epsilon_v \cdot \epsilon_{\mu}) = 0. \quad (3)$$

Значения тензора H_{ij} и компоненты вектора движения Солнца определялись методом наименьших квадратов из условия:

$$\min \left\{ \sum (\epsilon_V / \sigma_V)^2 + \sum (\epsilon_\mu / \sigma_\mu)^2 \right\}. \quad (4)$$

При этом мы игнорировали отклонения, превышающие 4σ , и исключали несущественные предикторы на уровне значимости 95%. (Всего было отброшено четыре галактики: K61, K63, K73 и NGC 5237, входящие в близкие группы вокруг M81 и Cep A). Принимая для двух параметров в (4) значения $\sigma_V = 80$ км/с и $\sigma_\mu = 0.4$, мы получили величину и направление апекса Солнца относительно галактик Местного объема:

$$V_a = (325 \pm 11) \text{ км/с}, \quad l_a = (95 \pm 2)^\circ, \quad b_a = -(4 \pm 1)^\circ, \quad (5)$$

что в пределах 1σ -ошибок согласуется с прежними параметрами апекса [17]. Для компонентов тензора H_g в сверхгалактических декартовых координатах нами получены следующие значения:

$$H_{xx} = 71 \pm 3, \quad H_{yy} = 73 \pm 3, \quad H_{zz} = 48 \pm 5 \text{ и } H_{xy} = -10 \pm 3, \quad (6)$$

где сами значения и их стандартные отклонения выражены в (км/с/Мпк), а компоненты, незначимые на уровне 95%, опущены. Таким образом, эллипсоид, характеризующий анизотропию местного хаббловского потока, имеет главные оси:

$$H_\alpha = 81 \pm 3, \quad H_\beta = 62 \pm 3, \quad H_\gamma = 48 \pm 5, \quad (7)$$

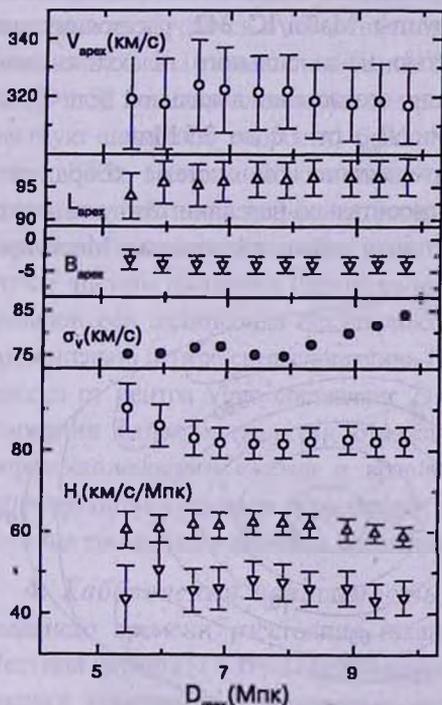


Рис.3. Зависимость параметров апекса Солнца (три верхних панели), дисперсии лучевых скоростей σ_V и главных значений тензора H_i (три нижних панели) от внешнего радиуса Местного объема.

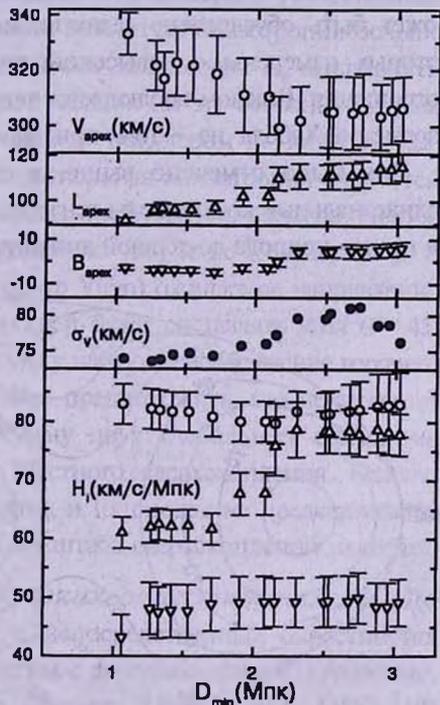


Рис.4. Зависимость тех же параметров, что и на рис.3, от внутреннего радиуса Местного объема.

с направлением большой оси ($l_\alpha = 310^\circ$, $b_\alpha = 49^\circ$) в галактических координатах. Построенные для этого решения "изохабблы" показаны на рис.2. Один из "горячих" полюсов располагается в созвездии Pisces, другой - в южной части созвездия Virgo на расстоянии 29° от направления на центр Местного сверхскопления.

Чтобы проверить устойчивость полученного решения, мы повторили вычисления, варьируя положение радиуса внешней границы Местного объема при одинаковом $D_{\min} = 1.5$ Мпк. Результаты представлены на рис.3. Как следует из этих данных, параметры апекса Солнца (5) мало зависят от изменения D_{\max} в диапазоне от 5 до 10 Мпк. Соотношение осей эллипсоида $H_\alpha : H_\beta : H_\gamma$ также остается приблизительно постоянным, хотя и наблюдается слабая тенденция к вытягиванию "фасолины" анизотропии с ростом D_{\max} . Дисперсия пекулярных лучевых скоростей галактик σ обнаруживает плавный подъем от 75 до 85 км/с при $D_{\max} > 8$ Мпк, что, вероятно, вызвано ограничением галактик выборки по максимальной лучевой скорости $V_{L0} < 500$ км/с. Аналогичным образом рис.4 показывает вариацию основных параметров решения с изменением радиуса внутренней границы объема D_{\min} при постоянном $D_{\max} = 8.0$ Мпк. Эти данные показывают, что на рубеже $D_{\min} = 2.1$ Мпк зависимости у большинства параметров испытывают заметный скачок. Такое поведение может быть обусловлено галактиками группы Maffei/IC 342, расстояния до которых измерены с невысокой точностью из-за сильного галактического поглощения. В целом наблюдается тенденция возрастания локальной величины параметра Хаббла на $\sim 10\%$ при вариации D_{\min} от 1.0 до 2.5 Мпк.

Как было отмечено выше, в сверхгалактической системе координат недиагональные компоненты тензора H_i относительно невелики. Это указывает на то, что природа локальной анизотропии поля скоростей связана с Местным

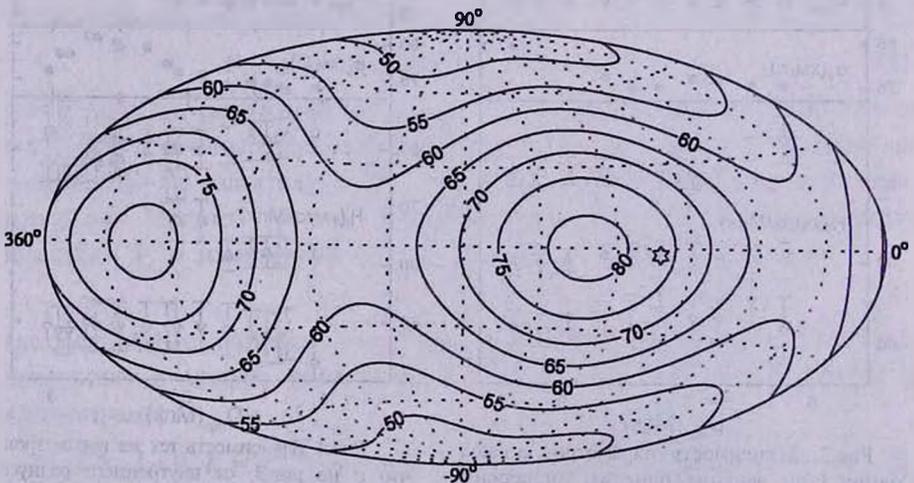


Рис.5. Эффект анизотропии местного поля скоростей в сверхгалактических координатах. Линии постоянной величины параметра Хаббла такие же, как и на рис.2. Положение центра скопления Virgo отмечено звездочкой.

сверхскоплением. Карта квадрупольной анизотропии в сверхгалактических координатах, обрисованная "изохабблами", представлена на рис.5. Положение центра скопления Virgo указано звездочкой. Как видно из этих данных, "горячие" полюса с $H > 80$ км/с/Мпк располагаются вдоль экватора сверхскопления с той точностью ($\sim 2^\circ$), с которой известно положение на небе сверхгалактической плоскости.

В моделях нелинейного сферически-симметричного торможения галактик скоплением Virgo [4,24] картина отклонения лучевых скоростей галактик от идеального хаббловского потока должна зависеть симметричным образом от углового расстояния галактики Θ относительно направления на центр Virgo. Согласно Краан-Кортевег [4], для галактик с идеальной хаббловской скоростью $V = 500$ км/с, расположенных в двух конусах: $\Theta < 28^\circ$ и $\Theta > 132^\circ$ (на Virgo и анти-Virgo), должны наблюдаться избыточные лучевые скорости. В промежуточной зоне ($28^\circ < \Theta < 132^\circ$), охватывающей области сверхгалактических полюсов, наблюдаемые скорости ожидаются меньше идеальных хаббловских. Максимальная амплитуда анизотропии параметра H при $V = 500$ км/с составляет $\pm 16\%$, а средняя амплитуда по всему Местному объему - менее 10%.

В самых грубых чертах наблюдаемый эффект квадрупольной анизотропии у близких галактик сходит с ожидаемым в модели Virgocentric flow [4]. Основные различия заключаются в том, что наблюдаемая амплитуда анизотропии больше ожидаемой в 2-3 раза, а положение большой оси эллипсоида H , отклоняется на $(29 \pm 5)^\circ$ от направления на центр Virgo. Указания на эту особенность (как местную аномалию скорости) были получены де Вокулером и Петерсом [25] еще в 1985г. Необходимо отметить, что квадрупольная анизотропия скоростей может возникать при дифференциальном вращении Местного сверхскопления. Эту идею высказывали в 50-е годы Огородников [26] и де Вокулер [27]. В случае чистого вращения (без падения на центр Virgo) ожидаемое направление большой оси эллипсоида пекулярных скоростей будет составлять угол $\Theta = 45^\circ$ относительно центра сверхскопления. Поскольку наблюдаемое удаление горячего полюса от центра Virgo составляет 29° , можно предположить, что пекулярные движения близких галактик отражают сумму двух глобальных эффектов: дифференциального сжатия и вращения Местного сверхскопления. Однако существующие сценарии образования галактик и их систем не предсказывают наличия громадного момента вращения на масштабе сверхскоплений галактик.

4. Хаббловская зависимость в близких окрестностях МГ. До недавнего времени расстояния галактик в непосредственных окрестностях Местной группы, $1 < D < 3$ Мпк, были известны с довольно низкой точностью. Оценки расстояния у некоторых из них (Pegasus, Leo A, GR 8, DDO 210) претерпели изменение в 2 и более раза! С применением высокоточных методов (светимости цефеид, RGB-звезд) построение надежной карты окрестностей МГ приближается к завершению. Однако и сейчас происходит обнаружение

СПИСОК ГАЛАКТИК ЗА ПРЕДЕЛАМИ МЕСТНОЙ ГРУППЫ С ВЫСОКОТОЧНЫМИ ОЦЕНКАМИ РАССТОЯНИЙ И СКОРОСТЕЙ

Галактика	l	b	$D \pm \sigma(D)$	$V_h \pm \sigma(V)$	D_{LG}	V_{LG}	Ссылка
WLM	75.8	-73.6	$0.92 \pm .04$	-116 ± 2	0.78	-10	D(2000), [28]
Leo A	196.9	52.4	$0.69 \pm .06$	20 ± 4	0.87	-44	TGC(1998), [29]
DDO 210	34.0	-31.4	$0.95 \pm .05$	-137 ± 5	0.95	13	LAT(1999), [30]
Tucana	322.9	-47.4	$0.88 \pm .04$	130 ± 2	1.10	9	ODS(1996), [31]
Sag Irr	21.1	-16.3	$1.06 \pm .10$	-77 ± 4	1.17	23	KAM(1999), [32]
kk r 25	83.8	44.4	$1.53 \pm .15$	-135 ± 2	1.48	72	KS(2001), [33]
SexB	233.2	43.8	$1.29 \pm .07$	301 ± 4	1.56	111	SMF(1997), [34]
N 3109	262.1	23.1	$1.26 \pm .10$	403 ± 1	1.64	110	CPB(1992), [35]
Antlia	263.1	22.3	$1.32 \pm .06$	361 ± 10	1.70	65	ADGM(1997), [36]
ESO 294-10	320.4	-74.4	$1.71 \pm .07$	117 ± 5	1.71	81	JFB(1998), [37]
SexA	246.1	39.9	$1.42 \pm .08$	324 ± 1	1.74	94	SMF(1996), [38]
IC 5152	343.9	-50.2	$1.70 \pm .17$	124 ± 3	1.82	75	ZM(1999), [39]
N 6789	95.0	21.5	$2.15 \pm .15$	-141 ± 9	1.90	144	DT(2000), [40]
UA 438	11.9	-70.8	$2.08 \pm .12$	62 ± 5	2.02	99	LB(1999), [41]
kk 230	63.7	72.0	$1.90 \pm .20$	61 ± 1	2.03	125	GG(2001), [42]
N 300	299.2	-79.4	$2.10 \pm .20$	144 ± 1	2.06	114	FMH(1992), [43]
DDO 053	149.3	35.0	$2.50 \pm .20$	19 ± 10	2.33	150	T(2001), [44]
GR 8	310.8	77.0	$2.10 \pm .20$	214 ± 3	2.38	136	DSG(1998), [45]
DDO 187	25.6	70.5	$2.50 \pm .20$	154 ± 4	2.70	174	ATK(2000), [46]
DDO 190	82.0	64.5	$2.90 \pm .20$	150 ± 4	2.95	263	AT(2000), [47]

новых карликовых галактик с расстояниями $D < 3$ Мпк.

Текущая сводка галактик за пределами МГ, чьи расстояния измерены с точностью не хуже 10% и не превышают 3 Мпк, представлены в табл.2. В ее столбцах содержатся следующие данные: 1 - имя галактики; 2-3 - галактические координаты; 4 - расстояние от наблюдателя с указанием стандартной ошибки; 5 - гелиоцентрическая скорость по данным NED с указанием стандартной

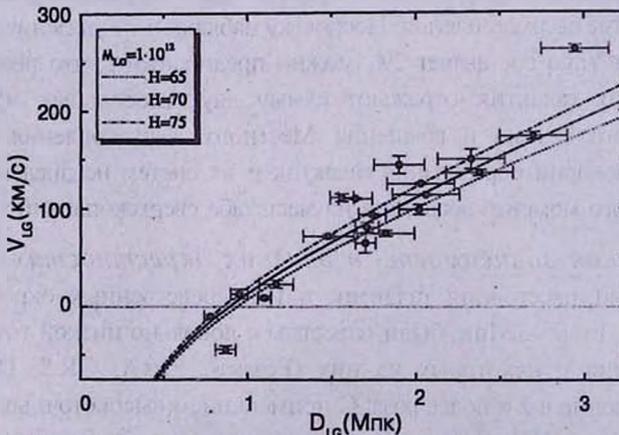


Рис.6. Зависимость скорость-расстояние относительно центра Местной группы для 20 галактик с высокоточными оценками расстояний. Три линии соответствуют различным значениям параметра Хаббла: 65, 70 и 75 км/с/Мпк.

ошибки; 6 - расстояние от барицентра МГ, расположенного на 0.44 Мпк от нашей Галактики в направлении к М31; 7 - лучевая скорость, приведенная к центроиду МГ, согласно [17]; 8 - источник данных о расстоянии галактики. Большинство расстояний было измерено методом RGB, в нескольких случаях оценки D сделаны по светимости цефеид и по флуктуациям поверхностной яркости галактики. Из данных последнего столбца видно, что у 70% галактик оценки расстояния получены в последние три года. Распределение этих 20 галактик по скоростям и расстояниям относительно центроида МГ приведено на рис.6 с указанием ошибок наблюдаемых величин.

Особенности поля пекулярных скоростей в непосредственном окружении МГ были рассмотрены Сэндиджем [48,49]. В сферически-симметричном приближении торможение космологического расширения галактик в окрестностях МГ приводит к искривлению хаббловской зависимости, которая пересекает линию $V=0$ на некотором расстоянии R_0 от центроида МГ. Величина R_0 характеризует радиус поверхности нулевой скорости, которая обособляет Местную группу от общего космологического расширения. Согласно Линден-Беллу [50] масса МГ, радиус R_0 и глобальная величина постоянной Хаббла H_0 связаны простым соотношением

$$M_{LG} = (\pi^2/8G)H_0^2 \cdot R_0^3, \quad (8)$$

где G - постоянная гравитации. При значениях суммарной массы Местной группы: $3 \cdot 10^{11}$, $1 \cdot 10^{12}$, $3 \cdot 10^{12} M_\odot$ и $H_0 = 70$ км/с/Мпк ожидаемая величина радиуса R_0 составляет: 0.60, 0.90 и 1.30 Мпк. Предсказываемая зависимость скорость-расстояние для трех указанных значений M_{LG} при $H_0 = 70$ км/с/Мпк показана семейством линий на рис.7. Наилучшей оценкой наблюдаемой величины R_0 из приведенных данных является $R_0 = 0.96 \pm 0.05$ Мпк, чему соответствует масса Местной группы $M_{LG} = 1.2 \cdot 10^{12} M_\odot$ со стандартной ошибкой $0.2 \cdot 10^{12} M_\odot$.

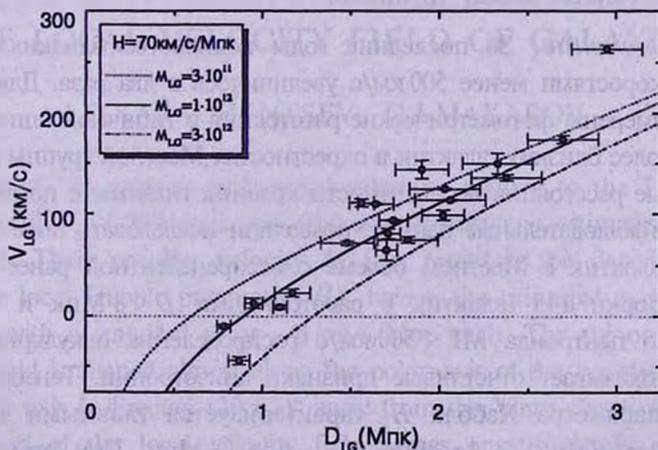


Рис.7. Хаббловская зависимость для галактик в окрестностях Местной группы. Нелинейный эффект на малых расстояниях обусловлен гравитационным торможением, производимым массой Местной группы. Пересечение трех линий регрессии с осью V_{LG} соответствует радиусу сферы нулевой скорости для массы Местной группы: $3 \cdot 10^{11}$, $1 \cdot 10^{12}$ и $3 \cdot 10^{12} M_\odot$.

Считается общепринятым, что основная масса МГ заключена в галактиках Андромеды (М 31) и Млечном пути. Иванс и Уилкинсон [51] определили полную массу М 31 по лучевым скоростям 10 ее спутников. С учетом лучевых скоростей еще 5 сфероидальных спутников, недавно измеренных на 10-м Кеск-телескопе [52], оценка полной массы М 31 на шкале ~ 200 кпк составляет $(0.8 \pm 0.4) \cdot 10^{12} M_{\odot}$. Приблизительно такая же оценка полной массы $(0.86 \pm 0.4) \cdot 10^{12} M_{\odot}$ была получена Зарицким [53] для нашей Галактики по кинематике ее спутников. Таким образом, суммарная вириальная масса обеих подсистем Местной группы достигает $(1.6 \pm 0.6) \cdot 10^{12} M_{\odot}$, что в пределах ошибок хорошо согласуется с оценкой полной массы МГ, $(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{12} M_{\odot}$, полученной исходя из положения сферы нулевой скорости R_0 . Поскольку полная светимость Местной группы равна $5.2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ [54], то отношение ее полной массы (в пределах R_0) к полной светимости составляет $M/L_v = 23 \pm 4 M_{\odot}/L_{\odot}$. Для сравнения укажем, что медианное значение M/L для 839 групп галактик, расположенных в Местном сверхскоплении, составляет 29 со стандартной ошибкой $[+20, -10] M_{\odot}/L_{\odot}$ [56]. Следовательно, Местная группа может рассматриваться как типичный представитель малонаселенных систем галактик.

В заключение отметим, что почти все галактики, приведенные на рис.7, за исключением Antlia (спутник NGC 3109), Leo A и WLM (вероятные периферийные члены МГ), являются хорошо изолированными объектами. Дисперсия лучевых скоростей у них относительно зависимости скорость-расстояние составляет 25 км/с. Поскольку характерный ожидаемый разброс этих галактик из-за ошибок определения индивидуальных расстояний и скоростей не превышает 15 км/с, то величину $\sigma_v = 20 - 25$ км/с для них можно рассматривать как первую надежную оценку хаотических движений галактик поля в пространстве между группами.

5. *Заключение.* За последние годы количество близких галактик с лучевыми скоростями менее 500 км/с увеличилось в два раза. Для многих из них были измерены фотометрические расстояния с типичной ошибкой $\sim 20\%$. У ряда наиболее близких галактик в окрестностях Местной группы определены высокоточные расстояния по светимости красных гигантов с погрешностью $\sim 7\%$. Новые наблюдательные данные позволили исследовать поле пекулярных скоростей галактик в Местном объеме с беспрецедентной ранее точностью.

Для выборки 145 галактик с расстояниями $D < 8$ Мпк и скоростями относительно центра МГ < 500 км/с распределение пекулярных лучевых скоростей показывает отчетливые признаки анизотропии. Тензор локальной величины параметра Хаббла H_0 характеризуется главными значениями 81 : 62 : 48 (км/с/Мпк) с 1 σ -ошибкой ~ 4 км/с/Мпк. При этом малая ось эллипсоида ориентирована приблизительно вдоль малой оси Местного сверхскопления, а большая ось имеет угол 29° относительно направления на

центр скопления Virgo. В целом картина пекулярных скоростей галактик Местного объема неудовлетворительно соответствует сферически-симметричной модели Virgocentric flow [4,24]. Одной из причин этого различия может быть эффект дифференциального вращения Местного сверхскопления.

В пределах расстояния $D < 8$ Мпк, включающего дощину известных групп галактик, дисперсия лучевых скоростей галактик относительно хаббловской зависимости составляет ~ 75 км/с. Основной вклад в нее дают вириальные движения в группах и ошибки измерения расстояний. В непосредственных окрестностях Местной группы дисперсия лучевых скоростей галактик поля не превышает 25 км/с, другими словами "газ" галактик между группами имеет необычайно низкую температуру. Наблюдаемое поведение зависимости скорость-расстояние в окрестностях Местной группы показывает ожидаемый эффект гравитационного торможения галактик. Наблюдаемому радиусу сферы нулевой скорости $R_0 = 0.96 \pm 0.05$ Мпк соответствует масса $M_{LG} = (1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{12} M_\odot$, которая хорошо согласуется с суммой вириальных масс подгрупп галактик вокруг М 31 и Млечного пути. Отношение полной (в пределах R_0) массы МГ к ее светимости, $M/L = (23 \pm 4) M_\odot / L_\odot$, указывает на отсутствие сверхмассивного темного гало вокруг нашей Галактики и М 31.

Работа частично поддержана фондом федеральной научной программы "Астрономия" (проект 1.2.2.1). Авторы благодарят М. Stone и E. Grebel за предоставление данных о расстоянии Agr 211 и kк 230.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

THE LOCAL VELOCITY FIELD OF GALAXIES

I.D.KARACHENTSEV, D.I.MAKAROV

A sample of 145 galaxies with radial velocities relative to the Local Group (= LG) centroid $V_{LG} < 500$ km/s and photometric distance estimates $D < 8$ Mpc is considered. Their peculiar velocity field is found to be described with a tensor of the local Hubble parameter H_p , having the principal axes 81:62:48 (km/s/Mpc) with a standard error ~ 4 km/s/Mpc each. The minor axis of the Hubble ellipsoid is aligned almost along the polar axis of the Local Supercluster, and the major axis is directed $(29 \pm 5)^\circ$ away from the Virgo cluster center. Such a configuration of the local velocity field agrees unsatisfactorily with known models of spherically symmetric Virgocentric flow. This disagreement may be caused by a possible differential rotation of the Local Supercluster. The observed radial velocity dispersion within $D = 8$ Mpc is 74 km/s. Its significant part is

related apparently with virial motions as well as with distance measurement errors of the Local volume galaxies. For the "field" galaxies situated in a shell of $1 < D < 3$ Mpc around the LG, the radial velocity dispersion does not exceed 25 km/s. For 20 most nearby galaxies around the LG with distances $D < 3$ Mpc and distance errors $\sigma_D < 0.2$ Mpc their radial velocity - distance relation shows the expected effect of gravitational deceleration. Adopting the observed radius of the zero-velocity surface of the LG, $R_0 = (0.96 \pm 0.05)$ Mpc, yields a total LG mass of $(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{12} M_\odot$, which fits well the sum of virial mass estimates for the Andromeda and the Milky Way subgroups. The total (within R_0) LG mass-to-luminosity ratio is $(23 \pm 4) M_\odot/L_\odot$, requiring no supermassive dark halo around the Galaxy and M 31.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.B.Tully, J.R.Risher, *Astron. Astrophys.*, **54**, 661, 1977.
2. J.M.Tonry, M.Davies, *Astrophys. J.*, **246**, 680, 1981.
3. M.Aaronson, J.Huchra, J.Mould et al., *Astrophys. J.*, **258**, 64, 1982.
4. R.C.Kraan-Korteweg, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **66**, 255, 1986.
5. A.Dressler, S.M.Faber, D.Burstein et al., *Astrophys. J.*, **313**, L37, 1987.
6. D.Lynden-Bell, S.M.Faber, D.Burstein et al., *Astrophys. J.*, **326**, 19, 1988.
7. D.S.Mathewson, V.L.Ford, M.Buchorn, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **81**, 413, 1992.
8. R.C.Kraan-Korteweg, G.A.Tammann, *Astron. Nachr.*, **300**, 181, 1979.
9. I.Karachentsev, N.Tikhonov, *Astron. Astrophys.*, **286**, 718, 1994.
10. Л.Н.Макарова, И.Д.Караченцев, Ц.Б.Георгиев, *Пис'ма Astron. Zh.*, **23**, 435, 1997.
11. Ц.Б.Георгиев, И.Д.Караченцев, Н.А.Тухонов, *Пис'ма Astron. Zh.*, **23**, 586, 1997.
12. I.Karachentsev, I.Drozovsky, S.Kajsin, et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **124**, 559, 1997.
13. L.Makarova, I.Karachentsev, L.Takalo et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **128**, 459, 1998.
14. L.N.Makarova, I.D.Karachentsev, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **133**, 181, 1998.
15. М.Е.Шарина, И.Д.Караченцев, Н.А.Тухонов, *Пис'ма Astron. Zh.*, **25**, 380, 1999.
16. I.O.Drazdovsky, I.D.Karachentsev, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **143**, 421, 2000.
17. I.Karachentsev, D.Makarov, *Astron. J.*, **111**, 535, 1996.
18. G.S.Da Costa, T.E.Armandroff, *Astron. J.*, **100**, 162, 1990.
19. V.E.Karachentseva, I.D.Karachentsev, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **127**,

- 409, 1998.
20. *V.E.Karachentseva, I.D.Karachentsev, G.M.Richter*, *Astron, Astrophys, Suppl. Ser.*, 135, 221, 1999.
 21. *V.Kilborn, R.Webster, L.Stavely-Smith*, *PASA*, 16, 8, 1999.
 22. *I.D.Karachentsev, D.I.Makarov, W.K.Huchtmeier*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 139, 97, 1999.
 23. *I.Karachentsev, D.Makarov*, in *Proceedings of IAU Symp. 186, Kyoto*, 1998, p.109.
 24. *E.L.Shaya, R.B.Tully, M.J.Pierce*, *Astrophys. J.*, 391, 16, 1992.
 25. *G.de Vaucouleurs, W.L.Peters*, *Astrophys. J.*, 297, 27, 1985.
 26. *К.Ф.Огородников*, в "Проблемы космогонии", 1, Наука, М., 1952, с.150.
 27. *G.de Vaucouleurs*, *Astron. J.*, 63, 253, 1958.
 28. *A.Dolphin*, *Astrophys. J.*, 531, 804, 2000.
 29. *E.Tolstoy, J.S.Gallagher, A.A.Cole et al.*, *Astron. J.*, 116, 1244, 1998.
 30. *M.G.Lee, A.Aparicio, N.Tikhonov et al.*, *Astron. J.*, 118, 853, 1999.
 31. *T.Oosterloo, G.S.Da Costa, L.Stevely-Smith*, *Astron. J.*, 112, 1969, 1996.
 32. *I.D.Karachentsev, A.Aparicio, L.N.Makarova*, *Astron, Astrophys.*, 352, 363, 1999.
 33. *I.Karachentsev, M.Sharina*, (in preparation), 2001.
 34. *S.Sakai, B.F.Madore, W.L.Freedman*, *Astrophys. J.*, 480, 589, 1997.
 35. *M.Capaccioli, G.Piotto, F.Bresolin*, *Astron. J.*, 103, 1157, 1992.
 36. *A.Aparicio, J.J.Dalcanton, C.Gallart, D.Martinez-Delgado*, *Astron. J.*, 114, 1447, 1997.
 37. *H.Jergen, K.C.Freeman, B.Binggeli*, *Astron. J.*, 116, 2873, 1998.
 38. *S.Sakai, B.F.Madore, W.L.Freedman*, *Astrophys. J.*, 461, 713, 1996.
 39. *A.A.Zijlstra, D.Minniti*, *Astron. J.*, 117, 1743, 1999.
 40. *I.O.Drozdovsky, N.A.Tikhonov*, *Astron, Astrophys. Suppl. Ser.*, 142, 347, 2000.
 41. *M.G.Lee, Y.Byun*, *Astron. J.*, 118, 817, 1999.
 42. *E.K.Grebel, P.Guhathakurta*, (private communication), 2000.
 43. *W.L.Freedman, B.F.Madore, S.L.Hawley et al.*, *Astrophys. J.*, 396, 80, 1992.
 44. *Н.А.Тухонов*, (частное сообщение), 2000.
 45. *R.C.Dohm-Palmer, E.D.Skillman, J.Gallagher et al.*, *Astron. J.*, 116, 1227, 1998.
 46. *A.Aparicio, N.Tikhonov, I.Karachentsev*, *Astron. J.*, 119, 177, 2000.
 47. *A.Aparicio, N.Tikhonov*, *Astron. J.*, 119, 2183, 2000.
 48. *A.Sandage*, *Astrophys. J.*, 307, 1, 1986.
 49. *A.Sandage*, *Astrophys. J.*, 317, 557, 1987.
 50. *D.Lynden-Bell, S.M.Faber, D.Burstein et al.*, *Astrophys. J.*, 326, 19, 1988.
 51. *N.W.Evans, M.I.Wilkinson*, *Mon. Notic. Roy., Astron. Soc.*, 316, 929, 2000.
 52. *P.Guhathakurta, D.B.Reitzel, E.K.Grebel*, *Astron. J.*, (in press), 2000.
 53. *D.Zaritsky, R.Smith, C.S.Frenk et al.*, *Astrophys. J.*, 478, 39, 1997.
 54. *S.Courteau, S.van den Berg*, *Astron. J.*, 118, 337, 1999.
 55. *I.Karachentsev, D.Makarov*, in *Proceeding of IAU Colloq. 174, Turku* (in press), 1999.