

сигнала из-под шумов различной природы выбор между моделями сделать невозможно. Однако даже при повышении точности ситуация может измениться слабо, так как, например, подавление уровня флюктуаций на малых углах за счет "красного" наклона спектра  $n_s = 0,95$  и ослабление флюктуаций за счет вторичной ионизации оказываются чрезвычайно близкими по уровню. Отмеченная выше проблема "вырождения" имеет два принципиально важных пути решения. Во-первых, в любом случае необходимо повышать точность определения спектра анизотропии как за счет увеличения процента покрытия неба наблюдениями (так называемая "cosmic variance problem"), так и за счет понижения собственных шумов приемной аппаратуры. Во-вторых, принципиально важно наряду с измерениями анизотропии РИ одновременно осуществлять измерения флюктуаций поляризации. Собственно, эти два направления и будут реализовываться как в рамках следующих запусков коллaborации MAXI–BOOM, так и в наиболее многообещающих космических проектах MAP и PLANCK. Заметим, что в отличие от анизотропии РИ, которая уже зарегистрирована, поляризация излучения будет исследоваться впервые на уровне обнаружения сигнала. Однако для поляризационных экспериментов, где отношение сигнал/шум не превышает нескольких единиц (в отличие от анизотропии, где отношение сигнал/шум ожидается на уровне 10–30) чрезвычайно важными оказываются методы фильтрации галактических и внегалактических помех, обусловленных поляризационными свойствами синхротронной и free-free эмиссий, излучением пыли, вкладом точечных источников и др. Особое значение для будущих поляризационных экспериментов имеет учет анизотропии, которая вносится приемной системой и зависит от частоты приема в силу аппаратурных особенностей эксперимента. В этой связи важнейшую роль в выделении сигнала призваны сыграть методы обработки, максимально удаляющие шумы из карт (а не "размазывающие" их по спектру мощности). К числу таких методов можно отнести амплитудно-фазовый анализ [10], базирующийся на устранении помех не в амплитудном, а в фазовом пространстве, где проявление различного рода негауссовых помех оказывается наиболее значимым. Важную роль в отождествлении шумов призван сыграть метод особых точек поля поляризации [11–13], учитывающий, что структура сигнала в зонах, где первичная поляризация отсутствует ("особые точки"), определяется шумами. Фазовый анализ карт анизотропии и поляризации особенно важен для детектирования вклада пекулярности приемного тракта (антенна + aberrации). В целом перечисленные выше методы очистки карт анизотропии и поляризации будут являться важным дополнением к таким традиционным методам, как MEM (maximum entropy method), RC (radical compression) и вейвлет-анализ.

В заключение подчеркнем, что в следующие 10 лет, несомненно, будут получены выдающиеся результаты в экспериментальном изучении анизотропии и поляризации реликтового электромагнитного излучения, которые подведут закономерный итог почти полувековых исследований микроволнового фона. Заглядывая в будущее, можно уверенно сказать, что эпоха проектов MAP и PLANCK ознаменуется целым рядом важнейших открытий, продвигающих нас в понимании общих закономерностей (и деталей!) строения и эволюции Вселенной.

## Список литературы

1. Сахаров А Д *ЖЭТФ* **49** 345 (1965)
2. Silk J *Astrophys. J.* **151** 459 (1968)
3. Peebles P J E, Yu J T *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
4. Zel'dovich Ya B, Syunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **7** (1) 1 (1970)
5. Зельдович Я Б, Курт В Г, Сюняев Р А *ЖЭТФ* **55** 278 (1968)
6. Bennet C L et al. *Astrophys. J. Lett.* **464** L1 (1996)
7. Hu W, <http://www.sns.ias.edu>
8. de Bernardis P et al. *Nature* **404** 955 (2000); Hanany S et al. *Astrophys. J.* **545** L5 (2000)
9. Naselsky P D et al., astro-ph/0102378
10. Naselsky P D, Novikov D I, Silk J, in *Proc. IA Symp. 201. Manchester, August 7–14, 2000*; astro-ph/0007133
11. Naselsky P D, Novikov D I *Astrophys. J.* **507** 31 (1998)
12. Dolgov A D et al. *Int. J. Mod. Phys. D* **8** 189 (1999)
13. Naselsky P et al., in *Proc. IA Symp. 201. Manchester, August 7–14, 2000*; astro-ph/0012319

PACS numbers: 95.35.+d, 98.65.-r

## Скрытая масса в Местной вселенной

И.Д. Карабенцев

### 1. Краткая история

Проблема существования во Вселенной скрытой (темной, невидимой) материи ведет свое начало с 1933 г., когда Ф. Цвики обнаружил [1], что для объяснения наблюдаемых скоростей галактик в богатых скоплениях необходимы массы в десятки раз больше суммы индивидуальных масс галактик. Позднее было показано [2], что несоответствие между "вириальными" (определенными из теоремы о вириале) и индивидуальными массами является типичным для систем галактик разного масштаба: от пар и групп галактик до скоплений и сверхскоплений. В 70-е годы Фриман, Санчиши и Рубин обнаружили, что у многих галактик кривые вращения на больших расстояниях от центра не выходят на кеплеровскую асимптотику, а остаются "плоскими", требуя наличия на внешних окраинах галактик значительной массы [3]. У некоторых авторов сложилось убеждение, что массивные темные "короны" простираются в десятки раз дальше видимых границ галактик, а их суммарная масса способна объяснить "вириальный парадокс" в скоплениях [4, 5]. В 80-е годы было обнаружено рентгеновское излучение горячего газа в скоплениях галактик с температурой, как раз соответствующей вириальным движениям галактик [6]. Наконец, наиболее прямые измерения массы скоплений по эффектам гравитационного линзирования или искажения изображений более далеких галактик [7] подтвердили наличие больших невидимых масс в богатых скоплениях. Можно считать вполне установленным фактом, что оценки масс богатых скоплений как по вириальным движениям, так и по свойствам рентгеновского излучения газа и по эффектам гравитационного линзирования согласуются друг с другом в пределах 50 %.

Однако, пока такое соответствие имеет место не на всех этажах структурной иерархии Вселенной. В таблице представлены основные средние характеристики систем галактик разного масштаба от одиночных галактик до скоплений: радиус системы, средняя квадратичная скорость внутренних движений, относительное число галактик, входящих в систему данного уровня, отношение полной массы к светимости  $M_\odot/L_\odot$ , среднее отношение

скрытой массы к видимой (DM/LM) и относительный вклад системы галактик в общую плотность материи во Вселенной. Здесь для параметра Хаббла принято значение  $H = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ , чему соответствует критическая плотность  $\Omega_0 = 1,0 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$ . В пределах стандартного оптического радиуса средняя галактика имеет отношение видимой массы к светимости около  $7M_\odot/L_\odot$ . При средней плотности светимости во Вселенной  $1,4 \times 10^8 L_\odot \text{ Мпк}^{-3}$  [5] средняя плотность скрытой массы составляет  $0,048 - 0,125$  в долях критической плотности.

**Таблица.** Распределение скрытой массы

Свойства	Галактики	Пары	Группы	Скопления
Радиус, Мпк	0,03	0,09	0,25	1,7
Ср.кв.скорость, $\text{км с}^{-1}$	(25)	35	70	600
Доля галактик в системе $M_\odot/L_\odot$	0,35	0,15	0,40	0,10
Метод оценки	Кривые вращения	Орбитальные движения	Вироильные движения, сфера	Рентген, гравлинзирование
DM/LM	2	2	3-(27)	35
Удельный вклад в общую массу	15 % (6 %)	6 % (2 %)	27 % (72 %)	52 % (20 %)

Приведенные данные показывают, что наибольшее различие в оценках скрытой массы приходится на промежуточное звено — группы галактик. Многие авторы приводят для групп среднее отношение вироильной массы к светимости  $\sim 200M_\odot/L_\odot$  [8], тогда как по нашим данным [9] это отношение составляет всего  $\sim 30M_\odot/L_\odot$ . В первом случае группы галактик дают основной вклад (72 %) в общую плотность Вселенной, во втором основной вклад (52 %) приходится на богатые скопления. Этим обстоятельством обусловлена и неопределенность оценок средней плотности скрытой массы во Вселенной (от 0,048 до 0,125 $\Omega_0$ ). Для прояснения ситуации потребовалось детальное систематическое исследование структуры и динамики самых близких групп галактик.

## 2. Топография Местной вселенной

Как неоднократно подчеркивал Дж. Пиблс [10], знание точных расстояний и скоростей у близких галактик позволяет рассчитывать их взаимные положения в различные эпохи  $Z$  и, тем самым, определять величину  $\Omega_m$  на масштабах  $\sim (1-10)$  Мпк. К сожалению, до последних лет ситуация с лучевыми скоростями и, особенно, расстояниями галактик в Местной вселенной выглядела удручающе бедной. Так, в выборке  $N = 179$  соседних с нами галактик с лучевыми скоростями  $V < 500 \text{ км с}^{-1}$  [11] только 8 % галактик имели надежные оценки расстояния. Более того, недавно были высказаны веские соображения, согласно которым ожидаемая плотность числа галактик во Вселенной на порядок (!) выше наблюдаемой [12, 13]. Предполагается, что не обнаруженные пока галактики являются карликовыми системами с очень низкой поверхностной яркостью, и их вклад в общую массу может быть сравним с вкладом нормальных галактик.

В последние годы в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН совместно с Институтом

Макса Планка (Германия), а также с другими обсерваториями Испании, США, Украины и Финляндии была осуществлена программа поиска и исследования новых близких галактик. Программа состоит из следующих этапов.

1. Поиски новых близких карликовых галактик наrepidукциях фотографических обзоров неба POSS-II и ESO/SERC. В результате было обнаружено более 600 кандидатов в близкие галактики.

2. Измерение лучевых скоростей у новых галактик по наблюдениям их в линии нейтрального водорода (21 см) на радиотелескопах Германии, Франции и Австралии, а также по оптическим эмиссионным линиям на 6-метровом телескопе САО РАН.

3. Получение крупномасштабных изображений всех близких галактик на 6-метровом телескопе и других телескопах с ПЗС-приемниками, разрешение галактик на звезды, измерение расстояний галактик с точностью  $\sim 20\%$  по светимости ярчайших звезд.

4. Обзор 200 наиболее близких галактик на космическом телескопе Хаббла, измерение их расстояний с точностью  $\sim 5\%$  по светимости звезд ветви красных гигантов.

К настоящему времени основные этапы этого проекта завершены. Количество галактик в Местном объеме, ограниченном расстоянием  $D = 7$  Мпк, или лучевой скоростью  $V < 500 \text{ км с}^{-1}$ , выросло в два раза. Число близких галактик с измеренными (фотометрическими) расстояниями увеличено нами более чем на порядок [14–16]. Получен уникальный пласт новых наблюдательных данных, которые позволили впервые построить трехмерную карту Местного объема Вселенной и исследовать в нем поле пекулярных скоростей.

Рельеф Местной вселенной имеет четко выраженную фрактальную структуру с наличием пустых объемов разного масштаба. Галактики скучиваются в волокнистые и плоские образования, обрамляющие пустоты. Из всего населения Местного объема (340 галактик) более половины сосредоточено в зоне гравитационного влияния всего семи самых массивных галактик. В число этих галактик-“олигархов” входит и наш Млечный Путь. Пространственное скучивание галактик характеризуется степенной двухточечной корреляционной функцией со стандартным показателем  $\gamma = -1,8$ . При этом стандартная корреляционная функция Пиблса описывает скучивание галактик вплоть до масштаба, сравнимого с диаметром отдельной галактики (30 кпк).

## 3. Анизотропия поля скоростей галактик

Новые данные о лучевых скоростях и расстояниях 180 галактик Местного объема обнаруживают значительные отклонения от изотропного хаббловского расширения [16]. Наблюденное распределение локальной величины параметра Хаббла на небе может быть представлено трехосным эллипсоидом, имеющим отношение осей  $H_a : H_b : H_c = 81 : 62 : 48 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  с погрешностью  $\sim 8\%$ . Минимальные значения параметра Хаббла наблюдаются вдоль полярной оси Местного сверхскопления, а область наибольших значений находится на экваторе Сверхскопления, образуя угол  $\Theta = 29^\circ \pm 5^\circ$  относительно центра скопления Virgo. В целом локальная картина нехаббловских движений галактик мало соответствует известной модели сферически симметричного потока галактик к центру Virgo [17]. Одной из

причин этого различия может быть эффект дифференциального вращения Местного сверхскопления. Однако существование большого момента вращения на масштабе  $\sim 10$  Мпк трудно совместить с выводами современных космологических моделей.

#### 4. Местная группа и хаббловская зависимость в ее окрестностях

Наша Галактика (Млечный Путь) и галактика в Андромеде (M31) совместно с 30 их спутниками образуют Местную группу. Объемное распределение 70 ближайших галактик внутри и вокруг Местной группы в кубе с ребром  $\pm 3$  Мпк показано на рис. 1. Для большинства этих галактик точные расстояния были измерены в последние два года. Темные точки — два новых спутника Андромеды, открытых в CAO в 1999 г. [18]. Зависимость между лучевыми скоростями  $V_{LG}$  и расстояниями  $D_{LG}$  ближайших галактик за пределами Местной группы представлена на рис. 2. Хаббловская зависимость  $V = HR$  относительно центроида Местной группы показывает ожидаемый нелинейный эффект, обусловленный гравитационным торможением хаббловского потока массой Местной группы. Радиус сферы нулевой скорости  $R_0$  и полная масса группы  $M_{LG}$  связаны простым соотношением  $M_{LG} = (\pi^2/8G)H^2R_0^3$  [19], где  $G$  — постоянная тяготения. При  $H = 70 \text{ км с}^{-1} \text{Мпк}^{-1}$  и наблюдаемом значении  $R_0 = 0,96 \pm 0,05$  Мпк полная масса Местной группы составляет  $(1,2 \pm 0,2) \times 10^{12} M_\odot$ , а отношение массы к светимости  $M/L = (23 \pm 4) M_\odot/L_\odot$ . Отметим, что полученное значение полной массы хорошо согла-

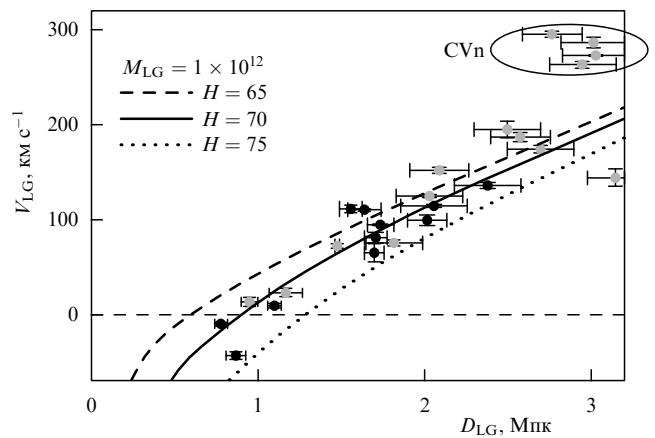


Рис. 2. Скорости и расстояния близких галактик относительно центроида Местной группы. Три линии (слева направо) отвечают ожидаемой хаббловской зависимости при  $H = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  и значениях полной массы Местной группы  $3 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^{12}$  и  $3 \times 10^{12} M_\odot$ . Овалом отмечены 4 галактики из "облака" Canes Venatici.

суется с суммой оценок массы M31 ( $0,8 \pm 0,4) \times 10^{12} M_\odot$  и Млечного Пути ( $0,9 \pm 0,4) \times 10^{12} M_\odot$ , сделанных по орбитальным движениям их спутников на масштабе  $\sim 200$  кпк [20, 21].

Большинство галактик на рис. 2 являются хорошо изолированными объектами. Дисперсия их лучевых скоростей относительно хаббловской зависимости составляет всего  $25 \text{ км с}^{-1}$ , что можно рассматривать

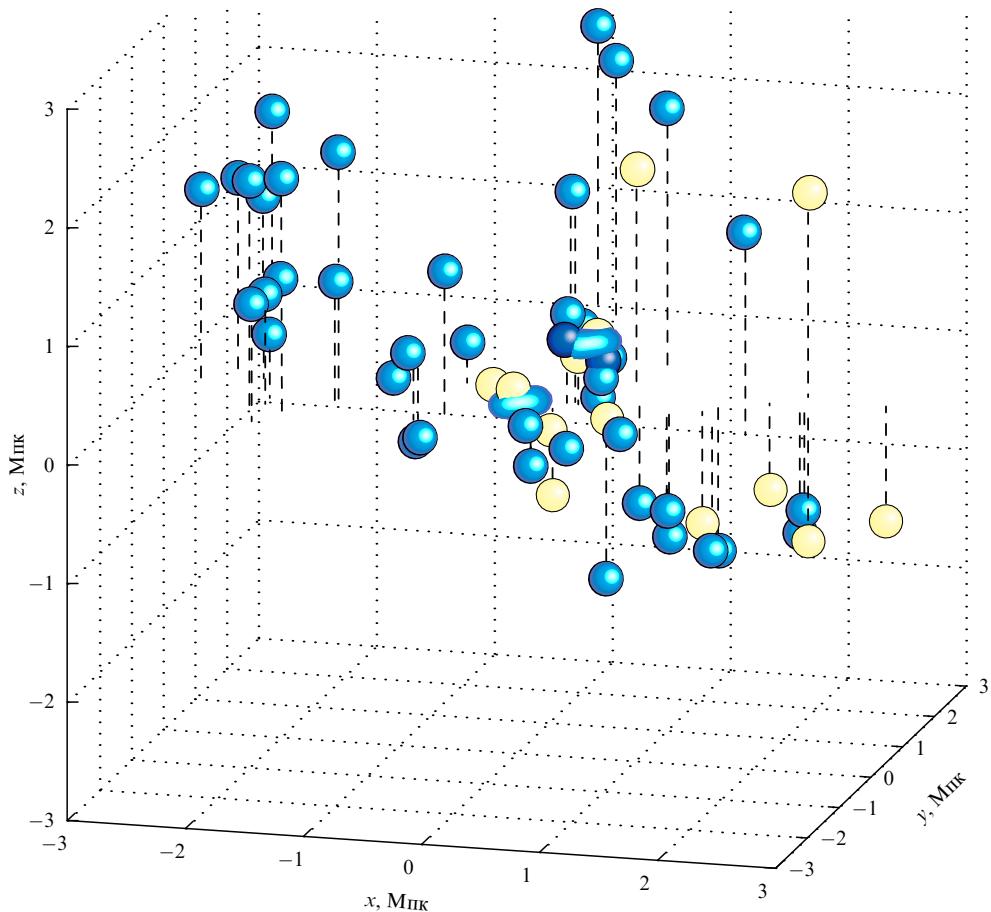


Рис. 1. Местная группа и ее окрестности

как первую надежную оценку тепловых (хаотических) движений галактик в пространстве между группами. С учетом вириальных движений средняя дисперсия лучевых скоростей в Местном объеме равна  $72 \text{ км с}^{-1}$ . Согласно [22], такое "холодное" поле пекулярных скоростей ограничивает среднюю локальную плотность материи величиной  $\Omega_m < 0,08$ .

## 5. Соседний комплекс галактик M81

Ближайшая к нам группировка галактик включает спирали M81, NGC 2403, NGC 4236 и простирается в виде волокна на  $\sim 30^\circ$ . С учетом 12 обнаруженных недавно карликовых систем население комплекса составляет 34 галактики. Для 23 из них измерены лучевые скорости, а для 28 определены расстояния на космическом телескопе Хаббла с точностью  $\sim 200$  кпк [23]. Из анализа объемной структуры и кинематики этого комплекса следует, что радиус сферы нулевой скорости группы M81 равен 1,1 Мпк, чему соответствует полная масса  $1.8 \times 10^{12} M_\odot$  или отношение полной массы к светимости  $30 M_\odot / L_\odot$ . При этом массы галактик M81 ( $1.4 \times 10^{12} M_\odot$ ) и NGC 2403 ( $0.4 \times 10^{12} M_\odot$ ), полученные по орбитальным движениям их спутников, хорошо согласуются с оценкой полной массы группы. Таким образом, в случаях как Местной группы, так и группы M81, наблюдается взаимное соответствие полной массы группы (масштаб  $\sim 1$  Мпк) и суммы орбитальных (вириальных) масс у главных галактик в подгруппах (масштаб 100–200 кпк). Отсюда следует, что основная часть объема у этих групп, очевидно, не заполнена скрытой массой.

## 6. Группы в Местном сверхскоплении

Для выделения групп галактик обычно использовались упрощенные критерии [8, 24], которые игнорировали индивидуальные свойства галактик. Это приводило к засорению групп ложными членами и к значительному переоцениванию вириальных масс. Использование более рафинированных условий кластеризации [9, 25] существенно понизило оценки масс. Новый критерий был применен к выборке 6300 близких галактик с лучевыми скоростями  $< 3000 \text{ км с}^{-1}$ , сосредоточенных в объеме Местного сверхскопления. В результате было выделено 840 групп, население которых составляет 55 % общего числа галактик. Типичные характеристики этих групп указаны в таблице. Среднее время пересечения у групп не превышает 10 % от хаббловского времени  $1/H$ . Среднее отношение вириальной массы к светимости мало зависит от размера группы и составляет  $\sim 30 M_\odot / L_\odot$ . Последняя величина находится в согласии с приведенными выше оценками полной массы для Местной группы и группы M81, что делает нашу систему типичным представителем групп галактик.

## 7. Заключение

Для объяснения природы невидимой материи было выдвинуто множество предположений с кандидатами в виде карликовых звезд, черных дыр, молекулярных газовых облаков, нейтрино, аксионов, гравитино и т.д. Обзоры различных гипотез и их проверка наблюдательными данными приведены в [26, 27]. Как видно из двух последних строк таблицы, отношение темной массы к массе видимой составляет для одиночных галактик, пар и групп величину  $DM/LM = 2 - 3$ , и только в богатых скоп-

лениях, как плотных "узлах" крупномасштабной структуры, это отношение возрастает более чем на порядок. При этом суммарный вклад в общую плотность материи у галактик, пар и групп ( $15\% + 6\% + 27\%$ ) примерно такой же, как и у богатых скоплений (52 %). Возможно, мы наблюдаем два типа скрытой материи, имеющих существенно различное пространственное распределение: компактные темные оболочки отдельных галактик и обширные резервуары, заполняющие объемы богатых скоплений.

Здесь необходимо подчеркнуть, что между светимостью галактики и амплитудой ее внутренних движений имеет место четкая зависимость (соотношение Талли–Фишера для спиралей и Фабер–Джексона для E, S0 галактик), разброс на которой составляет всего 15–20 %. Это означает, что невидимые массы галактик "пришли" к их видимым массам в удивительно постоянной пропорции в диапазоне светимостей, превышающем три порядка.

В последние годы появились наблюдательные свидетельства [28] в пользу космологической роли вакуума, проявляющейся в виде универсальной силы отталкивания (знаменитый  $\lambda$ -член в уравнении Эйнштейна). Возможно, что на языке вакуумной космологии описание проблемы скрытой массы во Вселенной будет выглядеть существенно иначе.

## Список литературы

1. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
2. Каракащев И Д *Астрофизика* **2** 81 (1966)
3. Freeman K C *Astrophys. J.* **160** 811 (1970)
4. Zaritsky D, White S D M *Astrophys. J.* **435** 599 (1994)
5. Bahcall N A, Lubin L M, Dorman V *Astrophys. J.* **447** L81 (1995)
6. Fabian A C et al. *Astrophys. J.* **248** 47 (1981)
7. Tyson J A et al. *Astrophys. J.* **281** L59 (1984)
8. Huchra J P, Geller M J *Astrophys. J.* **257** 423 (1982)
9. Makarov D I, Karachentsev I D *ASP Conf. Ser.* **209** 11 (2000)
10. Peebles P J E *Astrophys. J.* **449** 52 (1995)
11. Kraan-Korteweg R, Tammann G *Astron. Nachr.* **300** 181 (1979)
12. Klypin A A, Kravtsov A V, Valenzuela O *Astrophys. J.* **522** 82 (1999)
13. Bothun G, Impey C, McGaugh S *Publ. Astron. Soc. Pacific* **109** 745 (1997)
14. Karachentsev I D, Makarov D I *Astron. J.* **111** 535 (1996)
15. Karachentsev I D, Makarov D I, Huchtmeier W K *Astron. Astrophys. Suppl.* **139** 97 (1999)
16. Каракащев И Д Макаров Д И *Астрофизика* **44** 11 (2001)
17. Kraan-Korteweg R C *Astron. Astrophys. Suppl.* **66** 255 (1986)
18. Karachentsev I D, Karachentseva V E *Astron. Astrophys.* **341** 355 (1999)
19. Sandage A R *Astrophys. J.* **317** 557 (1987)
20. Evans N W, Wilkinson M I *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **316** 929 (2000)
21. Zaritsky D et al. *Astrophys. J.* **478** 39 (1997)
22. Governato F et al. *New Astron.* **2** 91 (1997)
23. Karachentsev I D et al. *Astron. Astrophys.* **363** 117 (2000)
24. Maia M A G, Da Costa L N, Latham D W *Astrophys. J. Suppl.* **69** 809 (1989)
25. Karachentsev I *Astron. Astrophys. Trans.* **6** 1 (1994)
26. Trimble V *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25** 425 (1987)
27. Weinberg D *ASP Conf. Ser.* **117** 578 (1997)
28. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)