

УДК 524.74:524.72

## КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

© 2019 И. Д. Караченцев\*, Е. И. Кайсина

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 января 2019 года; после доработки 4 февраля 2019 года; принята к публикации 4 февраля 2019 года

Мы представляем обзор наблюдательных данных о выборке Местного объема (МО), которая содержит около 1000 галактик в пределах 11 Мпк вокруг Млечного Пути. Карликовые галактики со звездными массами  $M_*/M_\odot < 9$  dex составляют 5/6 этой выборки. Почти для 40% из них расстояния измерены с высокой точностью с помощью космического телескопа им. Хаббла. В настоящее время МО является наиболее представительной и наименее искаженной селекцией выборкой карликовых галактик, которая пригодна для проверки стандартной парадигмы  $\Lambda$ CDM на самых малых космологических масштабах. Мы обсуждаем НП-свойства карликовых галактик в различном окружении, а также темпы звездообразования в них, полученные по данным *FUV*- и *H $\alpha$* -обзоров. Некоторое внимание уделено барионной зависимости Талли–Фишера для карликовых галактик малых масс. Мы также отмечаем, что карлики МО являются важными «пробными частицами» при определении полной массы близких групп и самого близкого скопления Virgo.

Ключевые слова: галактики: формирование — галактики: карликовые — галактики: звездообразование — галактики: скрытая масса — обзоры

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создавая каталоги галактик, астрономы обычно ограничивают выборку предельной видимой величиной или угловым диаметром объектов. Теоретики, моделирующие эволюцию крупномасштабной структуры Вселенной, нуждаются для сравнения расчетов с наблюдениями в каталогах, ограниченных фиксированным объемом. Из-за громадного различия галактик по размерам (в тысячу раз) и светимостям (в миллион раз), выборки галактик до предельной видимой величины или же до предельного расстояния имеют очень мало общих объектов.

Выборка галактик, ограниченная расстоянием, содержит гораздо большую долю объектов низкой светимости (карликов), чем обычные каталоги. Однако для ее создания нужны аккуратные данные об индивидуальных расстояниях до галактик. Для далеких галактик красное смещение  $z$  является вполне подходящим индикатором расстояния. В то же время в близком объеме, где различимы карликовые системы, хаббловские расстояния  $D = cz/H_0$  оказываются малонадежными из-за наличия пекулярных скоростей. Первая попытка создания каталога близких галактик была предпринята Краан-Кортевег и Тамманом [1]. Они составили список 179 галактик по всему небу, за исключением вириальной зоны скопления Virgo,

с лучевыми скоростями относительно центра Местной группы  $V_{LG} < 500$  км с<sup>-1</sup>.

Реальная возможность построить представительную выборку близких галактик появилась после запуска космического телескопа им. Хаббла (HST). Благодаря разрешению галактик на звезды, полученные на HST в двух цветовых полосах снимки позволяют определить положение вершины ветви звезд-красных гигантов (TRGB) и по ней измерить расстояние галактики с точностью 5–10%. Этот метод применим практически ко всем галактикам, имеющим звездное население старше 2 миллиардов лет. При экспозициях, укладываемых в один орбитальный период спутника, TRGB-расстояния галактик могут быть измерены на HST вплоть до границы в 11 Мпк. Объем области этого радиуса принято называть Местным объемом (МО). Основные свойства галактик низкой светимости в пределах  $D = 11$  Мпк являются предметом нашего краткого обзора.

Рассматривая дискообразные галактики все меньшей звездной массы, мы видим, что признаки спиральной структуры в них начинают размываться при массах  $M_* \leq 1 \times 10^9 M_\odot$ . Такая масса является промежуточной между массами Большого и Малого Магеллановых Облаков, спутников Млечного Пути. Одновременно при массе меньше этой критической у галактики пропадают признаки центрального звездообразного ядра, которое часто связывают с массивной черной дырой. Галактики

\*E-mail: [ikar@sao.ru](mailto:ikar@sao.ru)

с массами менее  $10^9 M_{\odot}$  обычно называют карликовыми звездными системами. Максимальная амплитуда вращения у них,  $V_m \leq 50 \text{ км с}^{-1}$ , лишь ненамного превышает характерную скорость турбулентных движений газовых облаков. Другими словами, случайные хаотичные явления играют значительную роль в мире карликовых галактик.

Систематический поиск карликовых галактик был предпринят ван ден Бергом [2] на снимках первого Паломарского обзора неба (POSS-I). Общее число карликов, получивших название DDO-объектов, составило 243. Позднее Караченцева [3] обнаружила на том же материале POSS-I еще 318 карликовых галактик (KDG), светимость и поверхностная яркость которых оказались на  $2^m-3^m$  слабее объектов DDO. Учитывая поиски карликов другими авторами, в том числе на снимках южного неба (ESO/SERC), Караченцева и Шарина [4] составили «Каталог карликовых галактик низкой поверхностной яркости», который насчитывал 1500 объектов, распределенных по всему небу.

С появлением второго Паломарского обзора неба (POSS-II), выполненного на мелкозернистых фотографических эмульсиях, Караченцева и ее коллеги провели систематические поиски и обнаружили еще более 600 карликовых галактик с типичной поверхностной яркостью слабее  $25^m/\square''$  [5–9]. Последующие измерения лучевых скоростей этих объектов в линии 21 см показали, что большинство из них являются близкими карликовыми системами [10–12].

Многие новые карликовые галактики были разрешены на звезды на снимках, полученных на 6-м телескопе БТА САО РАН, что позволило оценить расстояния до галактик по светимости ярчайших голубых и красных сверхгигантов [13–16]. Среди многих близких объектов сотрудники САО РАН обнаружили три новых члена Местной группы: LGS-3 [17, 18], Cas dSph и Peg dSph [19]. В качестве курьеза отметим, что десятки карликовых галактик, обнаруженных Караченцевой, впоследствии переоткрывались и переименовывались другими авторами. Наиболее свежий пример — диффузная карликовая система KKSG4 [8], заново найденная ван Доккумом и др. [20] и названная ими NGC 1052-DF2.

Современные обзоры больших участков неба, выполненные на ПЗС-приемниках: SDSS [21], Pan-STARRS1 [22], а также «слепые» обзоры в линии 21 см: HIPASS [23, 24], ALFALFA [25, 26] — привели к обнаружению множества богатых газом карликовых галактик. Очень продуктивными оказались специализированные ПЗС-обзоры окрестностей соседней галактики M31 в Андромеде [27] и Магеллановых Облаков [28], а также окрестностей

других близких массивных галактик: M81, Cep A, M101, M106 [29–32].

В непосредственных окрестностях нашей Галактики и Андромеды были обнаружены десятки ультраслабых карликовых систем, разрешаемых на звезды, размеры (порядка 10 пк) и звездные массы (порядка  $10^5 M_{\odot}$ ) которых сравнимы с размерами и массами шаровых звездных скоплений. Цвикки [33] предлагал называть их галактиками-«пигмеями», однако этот термин не прижился в современной литературе.

Необходимо отметить, что, помимо больших телескопов, в поисках слабых спутников вокруг массивных близких галактик успешно используются также малые телескопы с апертурой, равной или менее 1 м [34–36]. При экспозициях в десятки часов на малых телескопах были обнаружены карликовые спутники с поверхностной яркостью слабее  $26^m/\square''$ .

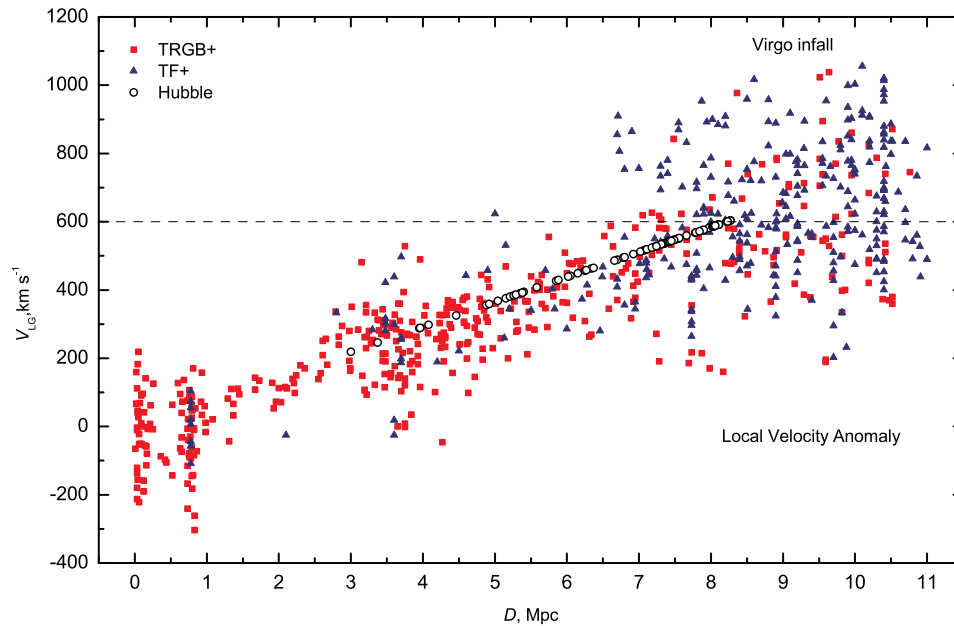
Благодаря целенаправленным усилиям различных наблюдательных команд, число известных карликовых галактик в Местном объеме быстро росло и продолжает расти. В 2004 г. «A Catalog of Neighboring Galaxies» насчитывал 450 объектов в пределах 10 Мпк [37]. Десятилетие спустя «Updated Nearby Galaxy Catalog» [38] содержал уже 869 галактик с оценками расстояния  $D < 11$  Мпк. К настоящему времени регулярно пополняемая база данных о галактиках МО [39] насчитывает 1170 кандидатов в члены выборки МО. Разнообразные данные об этих галактиках доступны по адресу: <http://www.sao.ru/lv/lvgdb>. Около 85% этой выборки составляют карликовые галактики с  $M_* < 9 \text{ dex}$ .

## 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВЫБОРКИ ГАЛАКТИК В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

Галактика включалась в МО, если оценка расстояния до нее тем или другим способом не превышала 11 Мпк. В тех случаях, когда была известна только лучевая скорость галактики, условием включения галактики в выборку МО служило значение лучевой скорости  $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$ . Картина хаббловского потока галактик в МО представлена на рис. 1.

Расстояния галактик  $D$  измерены относительно наблюдателя, а лучевая скорость  $V_{LG}$  исправлена за движение наблюдателя относительно центроида Местной группы [40].

Галактики с оценками расстояния, полученными разными методами, показаны разными символами. В пределах  $D < 6$  Мпк около 90% галактик имеют высокоточные фотометрические оценки расстояния, сделанные по TRGB, сверхно-



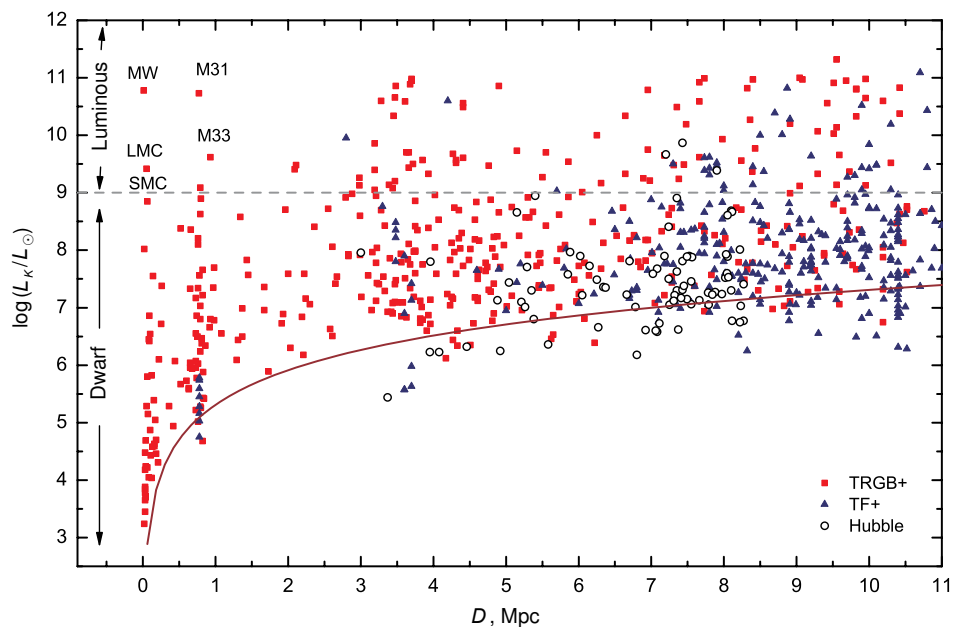
**Рис. 1.** Соотношение «лучевая скорость—расстояние» для галактик Местного объема. Оценки расстояния методами высокой точности (TRGB и др.) показаны квадратами. Оценки менее точными методами (TF и др.) изображены треугольниками. Кинематические расстояния при параметре Хаббла  $73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  показаны открытыми кружками. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

вым (SN), цефеидам (Cep) или флуктуациям поверхностной яркости (SBF) с погрешностью не хуже 10%. Более половины всех измерений TRGB-методом выполнены на HST по программам сотрудников САО РАН. Вблизи дальней границы МО большинство расстояний оценено методом Талли—Фишера (TF), по «фундаментальной плоскости» (FP) или по светимости планетарных туманностей (PNLF) и ярчайших звезд (BS). Точность этих методов не превышает 20%. Для некоторой части галактик с  $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$  приняты кинематические хаббловские расстояния. На малых расстояниях  $D$  дисперсия скоростей галактик обусловлена их вириальными движениями в группах. При  $D > 7 \text{ Мпк}$  начинают проявляться эффекты когерентных течений: падение галактик к ближайшему массивному аттрактору в скоплении Virgo и разлет галактик от центра Местного космического войда (так называемый феномен «местной аномалии скоростей»). Из этих данных следует, что отбор галактик в МО только по условию  $V_{LG} < 600 \text{ км с}^{-1}$  привнес бы значительные искажения в картину местного хаббловского потока. В среднем наклон зависимости «скорость—расстояние» на рис. 1 хорошо представляется параметром Хаббла  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

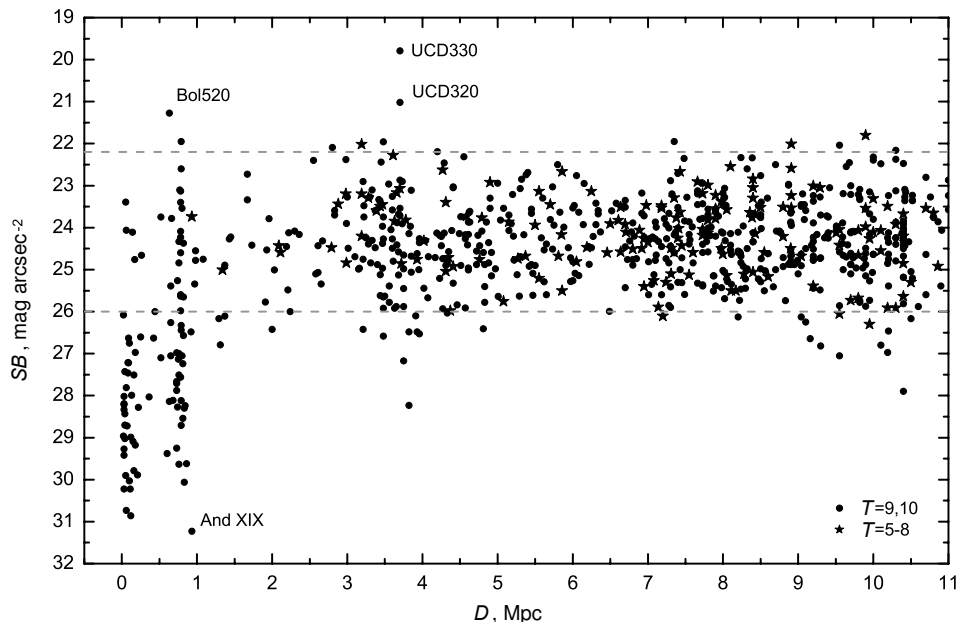
На рис. 2 показано распределение галактик МО по светимости в  $K$ -полосе и расстоянию  $D$ . Обозначения галактик разными символами те же, что на рис. 1. При отношении

$M_*/L_K = 1.0 \times M_\odot/L_\odot$  [41] светимость  $L_K$  равнозначна звездной массе галактики. Штриховая горизонталь отделяет карликовые галактики ( $M_* < 1 \times 10^9 M_\odot$ ) от галактик высокой светимости. Сплошная линия соответствует видимой величине  $m_K = 15^m$ , которая отражает приблизительный фотометрический предел поиска галактик МО по всему небу. Распределение галактик относительно этой кривой свидетельствует о том, что на окраине МО происходит потеря значительного количества ультраслабых объектов с массами  $\lg(M_*/M_\odot) < 6$ . Так, если население Местной группы ( $D < 1.0 \text{ Мпк}$ ) репрезентативно относительно населения всего МО, то наш каталог [38] имеет приблизительную полноту на уровне 50%.

Распределение галактик нашей выборки по средним поверхностным яркостям в  $B$ -полосе представлено на рис. 3. Карликовые галактики поздних типов,  $T = 9$  и 10, обозначены кружками, а спиральные галактики поздних типов,  $T = 5, 6, 7$  и 8, изображены звездочками. У основной массы галактик средние поверхностные яркости заключены в интервале  $SB = [22; 26] \text{ зв.вел./}\square''$ , который соответствует 100% и 3% яркости безлунного ночного неба. Наибольший диапазон,  $SB = [21; 30] \text{ зв.вел./}\square''$ , имеет место для спутников Млечного Пути и Андромеды. Большинство их было обнаружено только благодаря разрешению этих систем на отдельные звезды. Экстраполируя



**Рис. 2.** Распределение галактик МО по расстоянию и светимости в  $K$ -полосе. Обозначения символов те же, что и на рис. 1. Сплошная линия соответствует видимой величине  $m_K = 15^m$ . Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.



**Рис. 3.** Распределение галактик МО по расстоянию и средней поверхностной яркости в  $B$ -полосе. Карликовые и спиральные галактики поздних типов изображены разными символами.

ситуацию в Местной группе на весь Местный объем, можно предполагать, что в удаленных областях МО теряется около половины карликовых галактик, имеющих очень низкую поверхностную яркость. Некоторые ультракомпактные карлики типа UCD 320, UCD 330 также могут быть пропущены из-за их почти звездообразного вида.

### 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЛИЗКИХ КАРЛИКОВ

Около 52% карликовых галактик располагается в зонах гравитационного влияния галактик высокой светимости типа Млечного Пути и М 31, образуя вокруг них группы с характерным размером порядка 200–300 кпк. Остальная часть близ-

**Таблица 1.** Яркие галактики Местного объема

Galaxy	$D$ , Mpc	$V_{LG}$ , km s <sup>-1</sup>	$\lg M_*$ , [ $M_\odot$ ]	$\lg M_{tot}$ , [ $M_\odot$ ]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Milky Way	0.01	-65	10.70	12.07
M 31	0.77	-29	10.79	12.23
NGC 5 128	3.68	310	10.89	12.89
M 81	3.70	104	10.95	12.69
NGC 253	3.70	276	10.98	12.18
NGC 4826	4.41	365	10.49	10.78
NGC 4736	4.41	352	10.56	12.43
NGC 5236	4.90	307	10.86	12.02
M 101	6.95	378	10.79	12.17
NGC 4258	7.66	506	10.92	12.50
NGC 3627	8.32	579	10.82	12.16
M 51	8.40	538	10.97	11.78
NGC 2903	8.87	443	10.82	11.68
NGC 5055	9.04	562	11.00	12.49
NGC 4594	9.55	894	11.30	13.45
NGC 6744	9.51	706	10.91	11.72
NGC 3115	9.68	439	10.95	12.54
NGC 2683	9.82	334	10.81	12.13
NGC 891	9.95	736	10.98	11.90
NGC 628	10.2	827	10.60	11.66
NGC 3379	11.0	774	10.92	13.23
IC 342	3.28	244	10.60	12.26
Maffei 2	5.73	214	10.92	12.41
NGC 6946	7.73	355	10.99	11.94

ких карликов распределена в пространстве между группами, скучиваясь в диффузные филаментарные и плоские структуры. В целом карликовые и нормальные галактики концентрируются к плоскости Местного сверхскопления, центром которого является скопление в созвездии Virgo.

Распределение галактик в ближней части МО с радиусом  $D = 8$  Мпк представлено на двух панелях рис. 4а. Верхняя панель показывает распределение галактик в плоскости Местного сверхскопления, где объекты на высоких широтах  $|SGZ| > 2$  Мпк

были исключены. Массивные и карликовые галактики изображены кружками разного размера. Помимо отчетливых компактных групп вокруг M 81, Cep A, вверху рисунка имеется рассеянное облако Canes Venatici, состоящее преимущественно из карликовых галактик. Как видим, группы галактик распределены не случайно, показывая ассоциирование в филаменты. Внутри самих групп карликовые галактики часто располагаются в виде плоских структур с признаками когерентных движений [42, 43].

При взгляде на Местную «стенку» с ребра (рис. 4b) заметна обширная пустая область в направлении северного полюса сверхскопления при  $|SGZ| > 2$  Мпк, в которой присутствуют лишь несколько карликовых галактик. Согласно Талли [44], эта Местная космическая пустота простирается на расстояние более 20 Мпк. Как показывает анализ лучевых скоростей галактик, вся плоская структура при  $|SGZ| < 2$  Мпк движется в сторону «-SGZ» от центра Местного войда со скоростью порядка 280 км с<sup>-1</sup> [45].

Рассматривая карликовые галактики как «пробные частицы», мы можем определить массу центральной галактики высокой светимости. В предположении случайной ориентации орбит спутников со средним эксцентриситетом орбиты  $\langle e^2 \rangle = 1/2$ , мы получаем оценку полной массы

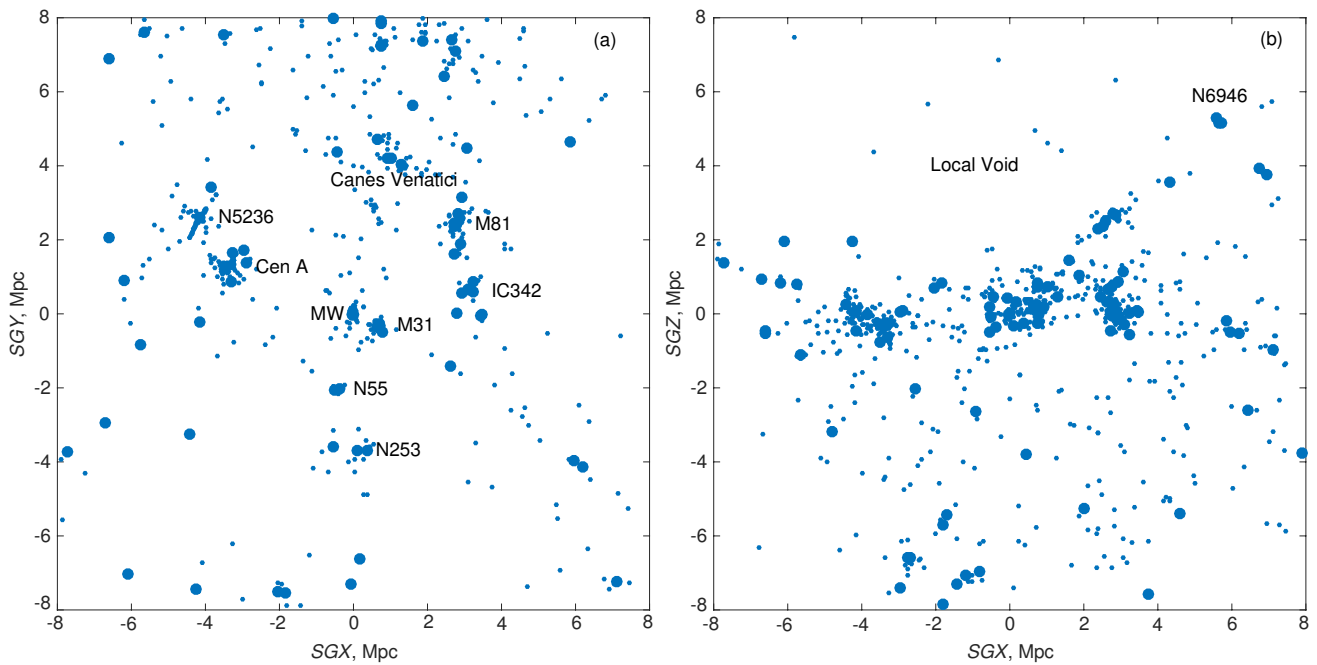
$$M_T = 16\pi G^{-1} \langle \Delta V^2 R_p \rangle, \quad (1)$$

где  $\Delta V$  и  $R_p$  — разность лучевой скорости спутника и его проекционное расстояние относительно главной галактики, а  $G$  — постоянная тяготения.

В пределах Местного объема на галактических широтах  $|b| > 15^\circ$  имеется 21 галактика со звездными массами  $\lg(M_*/M_\odot) \geq 10.5$ . Данные о них приведены в таблице 1: первый столбец указывает имя галактики, второй и третий — расстояние и лучевую скорость, четвертый и пятый — звездную и полную (орбитальную) массы галактики<sup>1</sup>. В зоне гравитационного влияния этих гигантов находится около половины населения карликов МО. Из представленных данных следует, что типичное отношение полной массы к звездной массе составляет величину  $M_T/M_* \simeq 32$ . Статистика  $M_T/M_*$  для галактик различных морфологических типов детально рассмотрена в работах [46, 47].

Необходимо отметить, что в группах (свитях) вокруг массивных галактик встречаются карлики преимущественно типа dSph, в которых практически отсутствуют газ и молодое звездное население. Среди карликовых галактик общего поля,

<sup>1</sup>В конце таблицы 1 для полноты приведены параметры еще трех массивных галактик на низких галактических широтах, данные о которых не вполне надежны из-за сильного поглощения света.



**Рис. 4.** Распределение близких галактик с расстояниями  $D < 8$  Мпк в сверхгалактических координатах: (а) — вид галактик в плоскости Местного сверхскопления с отклонениями менее 2 Мпк от плоскости, (б) — вид Местного «блина» с ребра.

наоборот, доминируют иррегулярные (dIr) и голубые компактные карлики (BCD), пребывающие в фазе активного звездообразования. Принято считать, что карликовые галактики с их «мелкой» потенциальной ямой легко теряют газ при движении через гало массивного соседа, тем самым исчерпывая возможности для дальнейшего звездообразования. Однако недавно были обнаружены «потухшие» сфероидальные карлики ККР 25 [48, 49], Apples 1 [50], ККs 3 [51] и КК 258 [52], весьма удаленные от своих ближайших соседей. Причина их подавленной активности остается пока неясной.

#### 4. НI-СВОЙСТВА КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК В РАЗНОМ ОКРУЖЕНИИ

Морфология карликовых галактик в значительной степени определяется наличием у них больших запасов газа, от которых зависит дальнейшее звездообразование, детектируемое по потоку в эмиссионной линии  $H\alpha$  или в далеком ультрафиолете.

Таблица 2 дает представление о том, насколько исследованы карлики МО в эмиссионной линии нейтрального водорода 21 см, а также в других спектральных диапазонах. Верхняя строка таблицы показывает полное число галактик в МО и отдельно число карликовых галактик типов dIr ( $T = 10$ ), Im+BCD ( $T = 9$ ) и dSph+dE ( $T < 0$ ). Объекты в зоне сильного галактического поглощения ( $A_B > 3^m0$ ), а также оказавшиеся за пределами  $D = 11.0$  Мпк, были исключены. Во второй

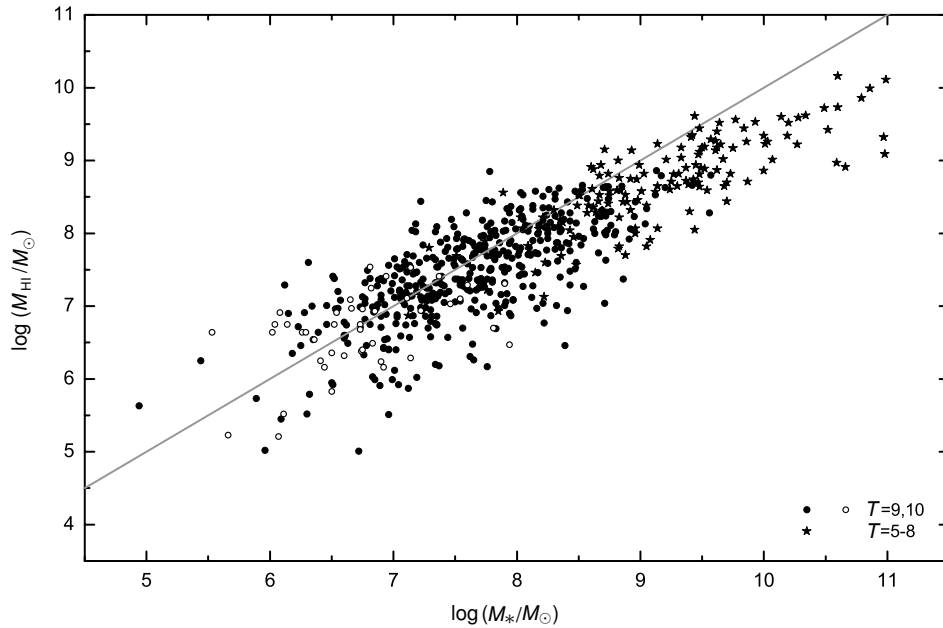
и третьей строках таблицы представлены числа галактик указанных типов, которые наблюдались и были детектированы в линии НI. Как видим, всего НI-обзорами охвачено 75% галактик Местного объема. Среди них уровень детектирования составил: 90% для dIr, 94% для Im+BCD и только 16% для dSph+dE. Малое наблюдаемое число недетектированных иррегулярных карликов, а также небольшое количество детектированных сфероидальных карликов обусловлено наличием популяции карликовых «транзиентных» систем (Tr), промежуточных по морфологии между dIr и dSph. Близким примером таких объектов, не поддающихся четкой классификации, является периферийный спутник Андромеды — LGS-3.

Водородная масса галактики позднего типа, определяемая соотношением

$$(M_{\text{HI}}/M_{\odot}) = 2.36 \times 10^5 D^2 F_{\text{HI}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{HI}}$  — поток в линии НI в Ян км с<sup>-1</sup> довольно тесно коррелирует со звездной массой галактики.

Рисунок 5 воспроизводит распределение числа карликовых (кружки) и спиральных (звездочки) галактик МО поздних типов по звездным и водородным массам. Прямая линия соответствует условию  $M_{\text{HI}} = M_*$ . Галактики с верхним пределом потока  $F_{\text{HI}}$  обозначены пустыми кружками. Как следует из этих данных, имеется множество карликовых систем, основная водородная масса которых еще не успела трансформироваться в звездную массу.



**Рис. 5.** Распределение галактик МО поздних типов ( $T = 5-10$ ) по водородной и звездной массам. Галактики с верхним пределом HI-потока отмечены пустыми кружками. Прямая линия соответствует равенству водородной и звездной масс.

**Таблица 2.** Число LV-галактик, наблюдаемых и детектируемых в HI, FUV, H $\alpha$

Sample numbers	All types	dIr	Im+BCD	dSph+dE
All LV galaxies	1072	404	152	346
Observed in HI	806	335	132	180
Detected in HI	596	300	124	13
Observed in FUV	914	351	123	294
Detected in FUV	657	308	122	81
Observed in H $\alpha$	654	261	118	122
Detected in H $\alpha$	532	221	112	50

Такие случаи наиболее часты среди галактик наименьшей светимости. Наоборот, диски спиралей высокой светимости состоят преимущественно из звездной компоненты, т.е. показывают более продвинутую стадию эволюции.

Выше было отмечено, что чем ближе карликовая галактика к массивному соседу, тем меньше в ней содержание газа. Влияние плотности окружения на относительное содержание водородной массы галактик МО детально рассмотрено в работе [53]. Для оценки плотности окружения авторы использовали три разных безразмерных параметра:  $\Theta_1$  — относительную локальную плотность, которую создает самый значимый по массе и расстоянию сосед,  $\Theta_5$  — относительную плотность, производимую пятью самыми значимыми соседями,

и  $\Theta_j$  — относительную плотность  $K$ -светимости в сфере радиусом 1 Мпк в единицах глобальной средней плотности светимости. Все три параметра выражены в логарифмической шкале.

Поведение отношения  $M_{HI}/M_*$  для карликовых и спиральных галактик поздних типов в зависимости от приливного индекса  $\Theta_1$  приведено на рис. 6. Объекты, где измерен только верхний предел потока  $F_{HI}$ , показаны пустыми кружками. Область отрицательных значений  $\Theta_1$  соответствует изолированным галактикам, а в правой стороне при  $\Theta_1 > 0$  располагаются спутники главных галактик в группах. Разброс значений  $M_{HI}/M_*$  довольно велик, достигая трех порядков. В экстремальных случаях — BST 1047+1156, And-IV и ESO 215-009 — водородная масса карликовой галактики на порядок превышает ее звездную массу. Среднее отношение  $M_{HI}/M_*$  слабо уменьшается от изолированных галактик к членам групп. Эта тенденция становится более выраженной, если учесть, что в области  $\Theta_1 > 0$  имеется много сфероидальных карликов, недетектированных в линии HI. Детальный анализ этих данных затруднен из-за низкого углового разрешения радиотелескопов: у многих карликов в группах их HI-поток теряется на фоне потока от массивного соседа.

Малая величина дрейфа  $M_{HI}/M_*$  от  $\Theta_1$  свидетельствует о том, что соотношение водородной и звездной масс у галактик поздних типов определяется в основном их внутренними процессами и лишь во вторую очередь — влиянием плотности окружения.

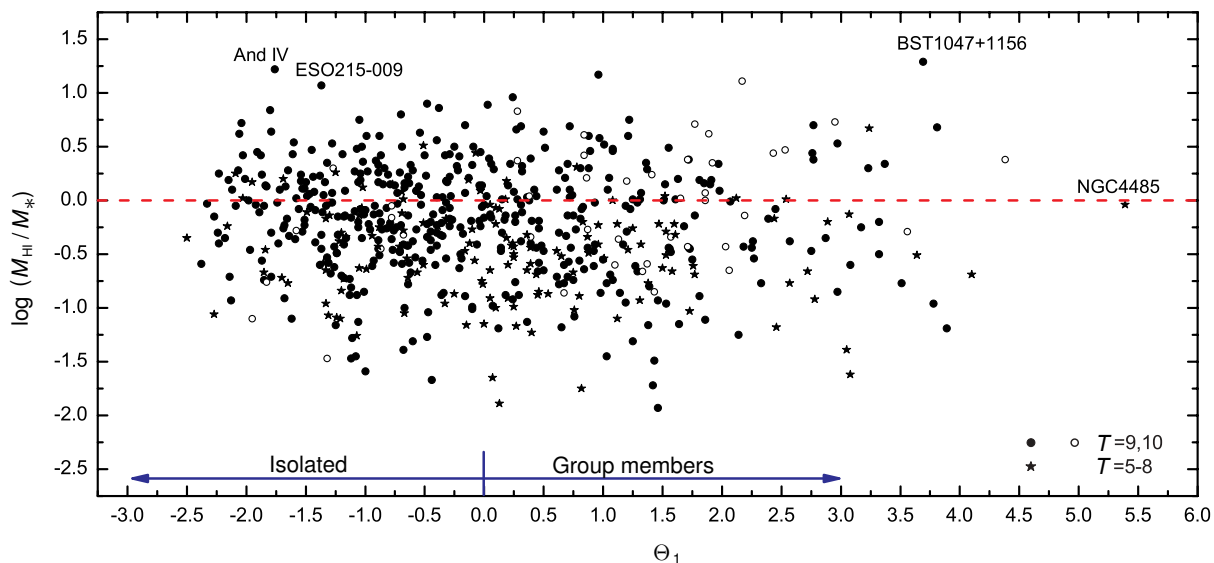


Рис. 6. Отношение водородной массы к звездной массе у карликовых ( $T = 9, 10$ ) и спиральных ( $T = 5-8$ ) галактик поздних типов в разном окружении. Галактики с верхним пределом HI-потока отмечены пустыми кружками.

## 5. ТЕМП ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ У КАРЛИКОВ В ГРУППАХ И В ПОЛЕ

Обзор галактик в далеком ультрафиолете на орбитальном телескопе GALEX [54] привел к обнаружению  $FUV$ -потоков у большого числа галактик, расположенных вне зоны Млечного Пути. Согласно [55, 56], интегральный темп звездообразования галактики в единицах ( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) выражается как

$$\lg(SFR) = 2.78 + 2 \lg D - 0.4 m_{FUV}^c, \quad (3)$$

где  $m_{FUV}^c$  — видимая величина галактики в  $FUV$ -полосе, исправленная за галактическое и внутреннее поглощение. Основной вклад в  $FUV$ -поток дают молодые звезды с характерным возрастом порядка 100 млн лет.

Как следует из данных таблицы 2, в зону обзора GALEX попадает 85% галактик Местного объема, причем 72% из них оказались детектированными в  $FUV$ -полосе. Среди карликов типа dIrg и Im+BCD относительное число детектированных составило соответственно 88% и 99%, тогда как среди dSph+dE ощутимый  $FUV$ -поток показали только 28% объектов. Заметим, что у некоторых сфероидальных карликов большого углового размера их  $FUV$ -потоки могут быть ложными из-за проекции фоновых источников.

Распределение карликовых ( $T = 9, 10$ ) и спиральных ( $T = 5-8$ ) галактик поздних типов по темпу звездообразования и звездной массе приведено на рис. 7а. Карликовые галактики показаны кружками, а спиральные — звездочками. Случаи, где

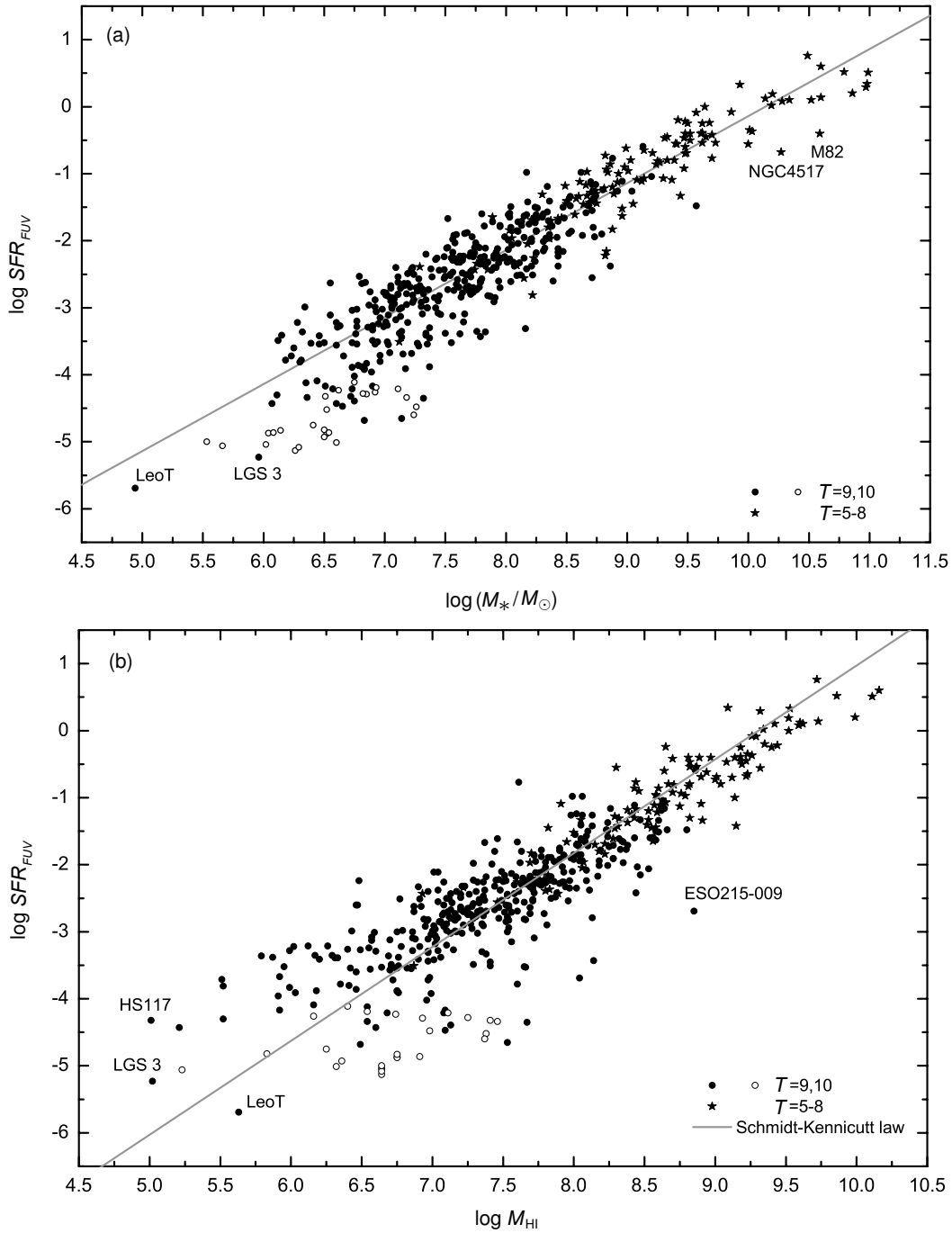
измерено только верхнее значение потока, отмечены пустыми кружками. Штриховая линия фиксирует космологическое время 13.7 Gyr, за которое галактика воспроизводит наблюдаемую звездную массу с наблюдаемым темпом звездообразования. Как видим, карликовые и спиральные галактики поздних типов подчиняются единой зависимости, причем современный темп звездообразования у большинства галактик вполне достаточен для воспроизводства их звездной массы.

Рисунок 7b представляет распределение галактик МО поздних типов по темпу звездообразования и водородной массе. Обозначения галактик разных типов те же, что на верхней панели. Прямая линия соответствует наклону 1.4, известному как соотношение Schmidt–Kennicutt для отдельных очагов звездообразования в галактиках. Приведенные данные показывают, что интегральная водородная масса и интегральный темп звездообразования галактик поздних типов хорошо подчиняются зависимости, установленной для областей звездообразования внутри них.

Поскольку у галактик поздних типов интегральный темп звездообразования тесно коррелирует со звездной массой, то для характеристики активности звездообразования обычно используют удельный темп звездообразования  $sSFR = SFR/M_*$ , отнесенный к единице звездной массы.

Распределение галактик МО поздних типов по величине  $sSFR$  и приливному индексу  $\Theta_1$  представлено на рис. 8. Галактики с верхним пределом  $FUV$ -потока обозначены пустыми кружками. Отметим, что параметр  $sSFR$  имеет размерность  $\text{yr}^{-1}$ , одинаковую с размерностью параметра





**Рис. 7.** (а) — распределение галактик поздних типов по интегральному темпу звездообразования и звездной массе. Прямая линия соответствует хаббловскому времени 13.7 Гуг, за которое наблюдаемая звездная масса галактики воспроизводится при наблюдаемом темпе звездообразования. (б) — распределение галактик поздних типов по интегральному темпу звездообразования и водородной массе. Прямая линия соответствует соотношению Schmidt–Kennicutt с наклоном 1.4.

Хаббла  $H_0 = 13.7 \text{ Гуг}^{-1}$ . Галактики с  $sSFR = H_0$  (штриховая линия) способны воспроизвести свою звездную массу с наблюдаемым темпом звездообразования за космологическое время  $H_0^{-1}$ . Как следует из этих данных, разброс величины  $sSFR$  растет от изолированных карликов к членам групп.

Это происходит за счет увеличения доли объектов в группах с пониженным темпом звездообразования из-за вероятного «выветривания» газа карликовой галактики при ее движении в плотной межгалактической среде. В отличие от размытой нижней границы распределения галактик по  $sSFR$ ,

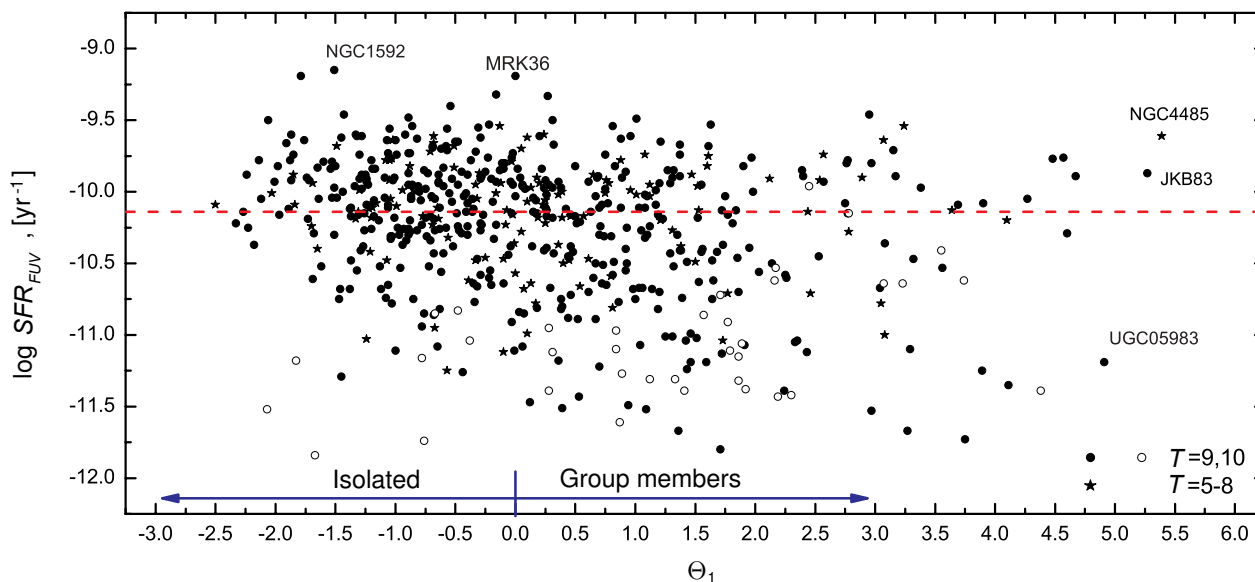


Рис. 8. Удельный темп звездообразования и приливной индекс у галактик МО поздних типов. Горизонтальная линия соответствует значению  $sSFR = H_0 = 13.7 \text{ Gyr}^{-1}$ . Обозначения галактик те же, что на рис. 7.

его верхняя граница выглядит довольно резкой с пределом  $sSFR_{\text{max}} \simeq -9.4 \text{ dex}$ , который мало зависит от плотности окружения [53, 57]. Немного выше этого предела располагается всего лишь несколько карликовых галактик Местного объема (Mrk 36, NGC 1592), пребывающих в стадии вспышки звездообразования. Наличие этого предела, подобного эддингтоновскому пределу звездной светимости, указывает на жесткую обратную связь процесса: чем сильнее «эпидемия» звездообразования в галактике, тем меньше ресурсов газа остается для его поддержания. Само значение предела  $sSFR_{\text{max}} \simeq 5.5 \times H_0$  может служить важной характеристикой процесса звездообразования в современную эпоху ( $z = 0$ ).

На рис. 8 видно, что амплитуда падения средней величины  $sSFR$  от изолированных карликов к членам групп все же невелика по сравнению с дисперсией удельного темпа звездообразования. Это свидетельствует о том, что разнообразие наблюдаемых темпов звездообразования у карликовых галактик поздних типов определяется в основном их внутренними параметрами, а не воздействием окружения.

Измерение интегрального потока галактики в эмиссионной линии  $\text{H}\alpha$  позволяет определить темп звездообразования на характерной шкале порядка 10 млн лет. Согласно [58],

$$\lg SFR = 8.98 + 2 \lg D + \lg F_c(\text{H}\alpha), \quad (4)$$

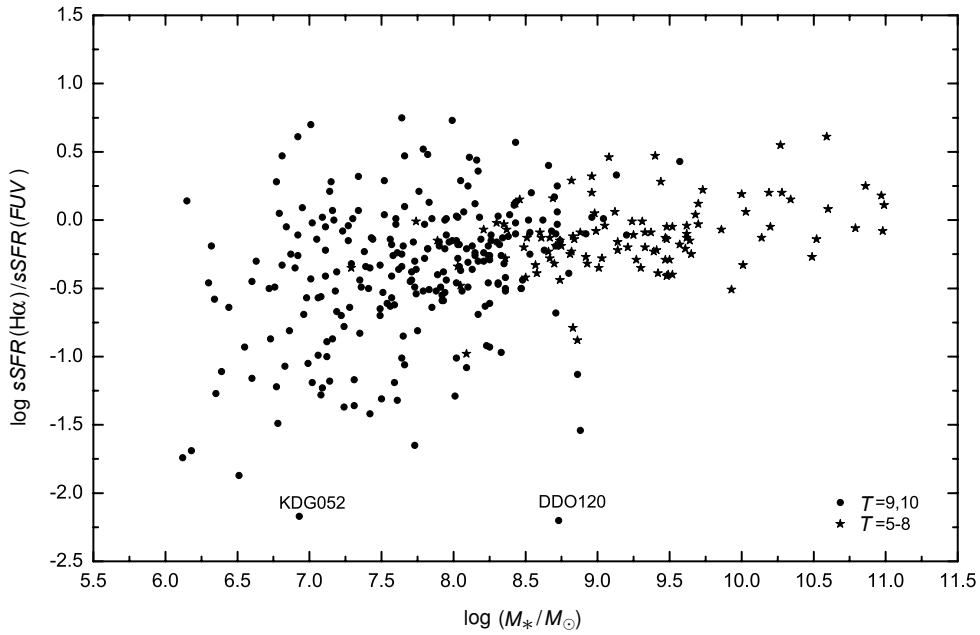
где  $SFR$  выражен в единицах ( $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ), а поток (в  $\text{эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) исправлен за Галактическое и

внутреннее поглощение. Наиболее обширный обзор галактик МО в линии  $\text{H}\alpha$  был выполнен на 6-м телескопе БТА САО РАН. За последние десять лет в единообразной манере были получены  $\text{H}\alpha$ -снимки более 400 галактик (см. [59] и ссылки там). С учетом данных других авторов в настоящее время  $\text{H}\alpha$ -изображения имеются для 61% галактик МО. Из них  $\text{H}\alpha$ -эмиссия была детектирована у 85% иррегулярных карликов, у 95% объектов типа  $\text{Im}+\text{BCD}$  и у 41% сфероидальных ( $\text{dSph}+\text{dE}$ ) систем. Любопытно, что некоторые классические  $\text{dSph}$ -карлики, например DDO 44, содержат в себе мелкие очаги звездообразования, заметные в  $\text{H}\alpha$  [60].

Сравнение значений  $SFR$ , полученных по  $\text{H}\alpha$ - и  $FUV$ -потокам, дает возможность судить о вариациях темпа звездообразования в карликовых галактиках на временной шкале порядка 10–100 млн лет. рис. 9 воспроизводит распределение отношения  $SFR(\text{H}\alpha)/SFR(FUV)$  для галактик поздних типов в зависимости от звездной массы. Из приведенных данных можно сделать следующие заключения:

а) Взаимная калибровка эмпирических значений  $SFR(\text{H}\alpha)$  и  $SFR(FUV)$  по соотношениям (3) и (4) хорошо выполняется для спиральных галактик поздних типов, где доминируют диски.

б) Отношение  $SFR(\text{H}\alpha)/SFR(FUV)$  в среднем падает при переходе от спиралей ко все менее массивным карликам. Различные причины этого обсуждались в работах [61–63], однако природа



**Рис. 9.** Отношение темпов звездообразования, определенных по потоку в линии  $H\alpha$  и по потоку в  $FUV$ -полосе для галактик МО поздних типов. В отличие от карликовых галактик (кружки), спиральные галактики типов Sc–Sm выделены звездочками.

недооценки  $SFR$  у карликов по  $H\alpha$ -потоку остаются не вполне ясной.

с) Дисперсия отношения  $SFR(H\alpha)/SFR(FUV)$  значительно растет с уменьшением массы галактики. Естественным объяснением этого является вспышечная активность звездообразования, которая становится относительно более заметной у объектов наименьшей массы.

Зависимости отношения  $SFR(H\alpha)/SFR(FUV)$  от других параметров: видимого отношения осей галактики, ее морфологического типа и плотности окружения — были рассмотрены в работе [53].

Для характеристики эволюционного состояния ансамбля карликовых галактик Местного объема удобно использовать диагностическую диаграмму «Past–Future» (PF), где безразмерные параметры

$$\begin{aligned} P &= \lg(SFR \times T_0/M_*), \\ F &= \lg(1.85M_{HI}/SFR \times T_0) \end{aligned} \quad (5)$$

не зависят от ошибок определения расстояния галактики [57, 64].

Здесь параметр  $P$  есть удельный темп звездообразования, нормированный на космологическое время  $T_0 = 13.7$  Гуг. Параметр  $F$  характеризует время (в единицах  $T_0$ ), за которое галактика исчерпает наличные запасы газа при наблюдаемом темпе  $SFR$ . Коэффициент 1.85 введен для учета вклада He и  $H_2$  в полную массу газа [65]. При этом галактика с координатами  $P = 0$ ,  $F = 0$  успевает

воспроизвести свою наблюдаемую звездную массу за время  $T_0$  и имеет запасы газа для поддержания наблюдаемого темпа звездообразования на еще одном интервале  $T_0$ .

Диаграмма PF для карликовых галактик МО поздних типов ( $T = 9, 10$ ) представлена на рис. 10. Центроид распределения карликов располагается вблизи начала координат. Следовательно, типичный наблюдаемый темп звездообразования у карликов вполне достаточен для воспроизводства их наблюдаемых звездных масс, а в целом популяция карликовых галактик пребывает на полпути процесса преобразования газа в звезды.

Другая важная особенность PF-диаграммы проявляется в диагональной вытянутости распределения карликов по параметрам  $P$  и  $F$ . Очевидной причиной этого является вспышечная активность звездообразования. При вспышке карлики типа Mrk 36, Mrk 475 попадают в правую нижнюю часть PF-диаграммы и по мере затухания вспышки перемещаются в левый верхний квадрант, где находятся пассивные карлики типа DDO 120 и KDG 52. Пропорция числа карликов в квадрантах  $[P > 0, F < 0]$  и  $[P < 0, F > 0]$  составляет примерно 3:1 и указывает на более длительное пребывание карликовых галактик в спокойной фазе по сравнению с фазой вспышки. Наличие в МО «потухших» карликов типа dSph, dE, не представленных на рис. 10, еще больше увеличивает это отношение.

Важно отметить однако, что такая трактовка основана на предположении, что галактика эволюци-

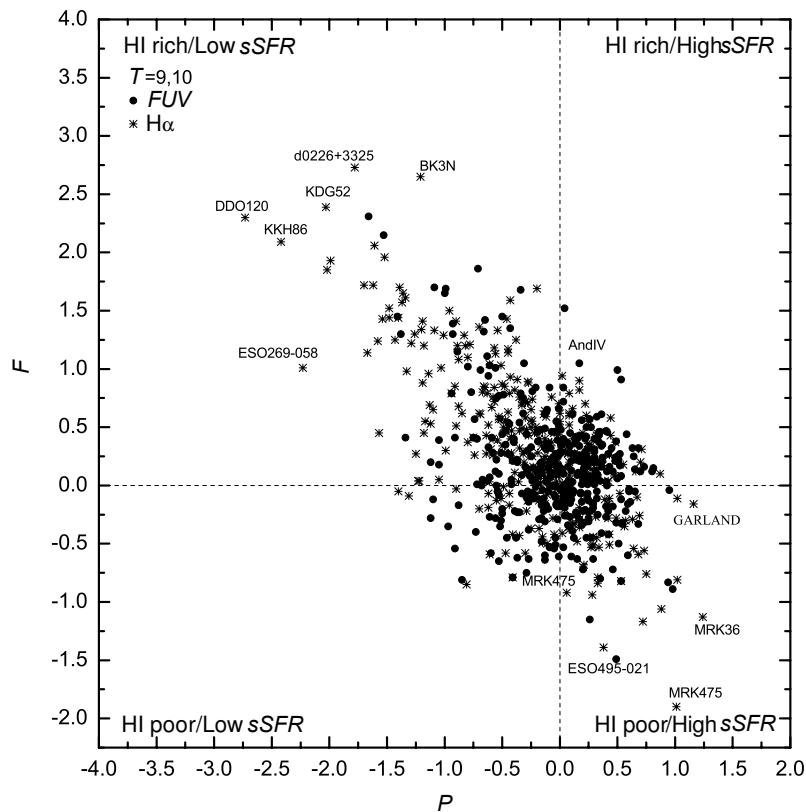


Рис. 10. Диагностическая диаграмма «Past–Future» для карликовых галактик типов  $T = 9, 10$ .

онирует в режиме «closed box». Приток внешнего межгалактического газа, наблюдаемый у некоторых галактик, может заметно влиять на эволюционные треки галактик на PF-диаграмме.

## 6. БАРИОННОЕ СООТНОШЕНИЕ ТАЛЛИ–ФИШЕРА

Как следует из данных рис. 5 и 6, около 40% карликовых галактик поздних типов в МО обладают водородной массой, которая превышает их звездную массу. С учетом наличия He и  $H_2$  богатые газом карлики оказываются доминирующим населением МО.

Классическое соотношение Талли–Фишера [66] выражает линейную связь между логарифмом ширины H I-линии,  $W_{50}$ , и абсолютной величиной (или логарифмом звездной массы) галактики. В области карликовых галактик линейность TF-соотношения систематически нарушается из-за недооценки вклада газовой компоненты в полную барионную массу галактики. Первым обратил на это внимание МакГаук [67, 68].

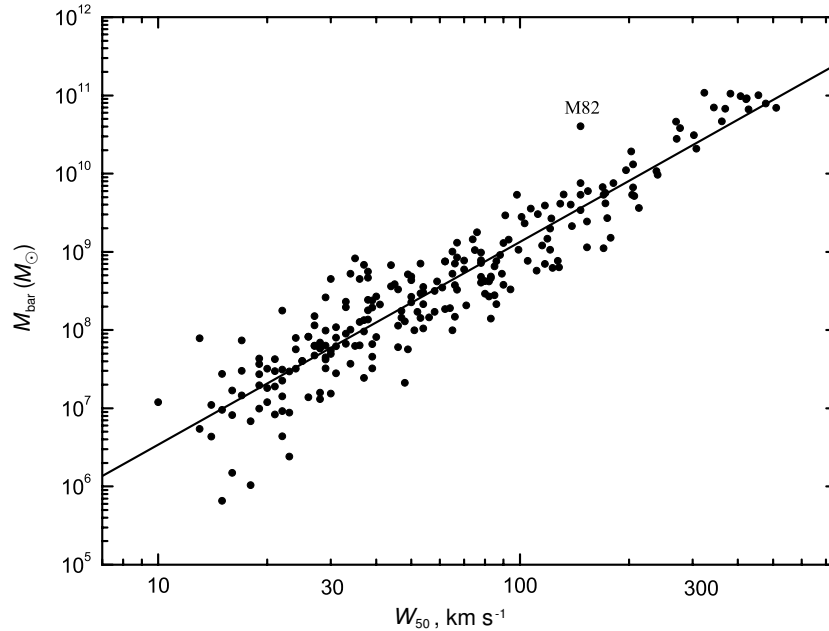
Обилие галактик МО с аккуратно измеренными расстояниями предоставило возможность продлить барионную зависимость Талли–Фишера (bTF) в область малых масс вплоть до

$\lg(M_{\text{bar}}/M_{\odot}) \simeq 6$ . Согласно [69], bTF-зависимость в Местном объеме для 330 галактик имеет вид, представленный на рис. 11. Линия регрессии на нем описывается соотношением

$$\lg(M_{\text{bar}}) = 2.59 \lg(W_{50}) + 3.84, \quad (6)$$

где барионная масса выражена в  $M_{\odot}$ , а ширина линии H I на уровне 50% от максимума — в  $\text{km s}^{-1}$ . Помимо галактик с аккуратно измеренными расстояниями, на рис. 11 представлены объекты с оценками расстояния по членству в известных группах.

Стандартное отклонение на bTF-диаграмме составляет 0.39 dex, что позволяет оценивать расстояния других богатых газом карликовых галактик с погрешностью 0.195 dex. Наибольший вклад в эту погрешность привносят ошибки измерения  $W_{50}$  и фотометрические ошибки. Для галактик с аккуратно измеренными расстояниями погрешность оценки bTF-расстояния может быть понижена до 0.10 dex. Дополнительный анализ показывает [69], что учет второго параметра в уравнении (6), такого, как поверхностная яркость галактики или отношения  $M_{\text{HI}}/M_*$ , мало снижает дисперсию на диаграмме.



**Рис. 11.** Барионная зависимость Талли–Фишера для галактик МО с аккуратными оценками расстояния и углом наклона более  $45^\circ$ .

### 7. КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ И ЛОКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Наличие вокруг близких массивных галактик карликовых спутников с аккуратно измеренными лучевыми скоростями и расстояниями дало возможность определить полные (орбитальные) массы на масштабе вириального радиуса  $R_{\text{vir}} \simeq 250$  кпк. Эти оценки для 21 самой значимой галактики МО были представлены выше в таблице 1.

Независимый метод определения полной массы группы (скопления) был предложен Линден-Беллом [70].

Группа галактик как зона повышенной плотности искажает хаббловский поток окружающих группу галактик, замедляя их скорости. В результате вокруг группы имеется поверхность нулевой скорости, которая отделяет коллапсирующую область от остальной зоны космического расширения. В сферически-симметричном случае радиус сферы нулевой скорости  $R_0$  связан с полной массой группы  $M_T$  соотношением

$$M_T = (\pi^2/8G)R_0^3 H_0^2 / f^2(\Omega_m), \quad (7)$$

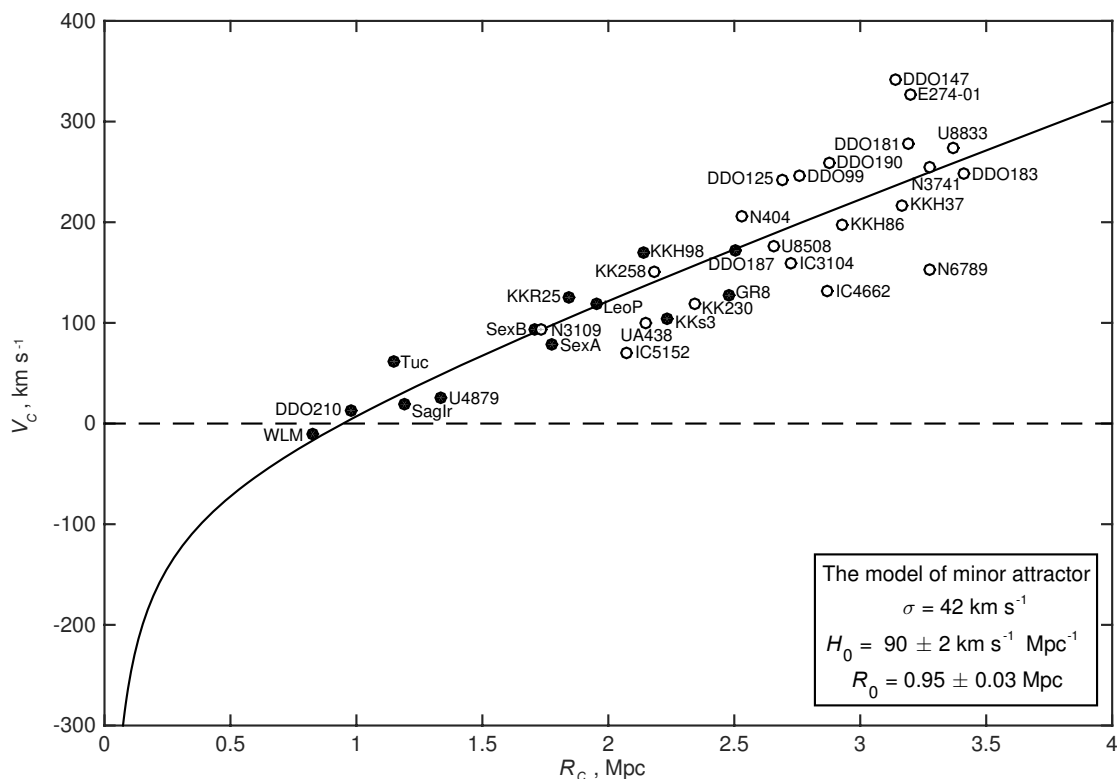
где безразмерный фактор  $f$  зависит от средней плотности материи, меняясь от 1 до  $2/3$  при изменении  $\Omega_m$  от 0 до 1. В стандартной модели  $\Lambda$ CDM с  $\Omega_m = 0.24$ ,  $\Omega_\lambda = 0.76$  и  $H_0 = 73$  км с $^{-1}$  Мпк $^{-1}$  [71] соотношение  $M_T(R_0)$  приобретает вид

$$(M_T/M_\odot) = 2.12 \times 10^{12} (R_0/\text{Mpc})^3. \quad (8)$$

Распределение скоростей и расстояний карликовых галактик в сфере радиусом 3.0 Мпк вокруг центроида Местной группы рассматривалось неоднократно [72–74]. Наиболее полная версия этой диаграммы (рис. 4а из работы [75]) приведена на рис. 12. Неизолированные ( $\Theta_1 > 0$ ) галактики, отягощенные вириальными скоростями, были исключены. Линия хаббловской регрессии пересекает линию нулевой скорости на уровне  $R_0 = (0.95 \pm 0.03)$  Мпк [75], чему соответствует полная масса Местной группы  $M_T = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{12} M_\odot$ . Эта оценка получилась несколько ниже суммарной массы Млечного Пути и Андромеды:  $M(\text{MW} + \text{M31}) = 2.87 \times 10^{12} M_\odot$ .

Довольно высокая точность определения величины  $R_0$  и полной массы Местной группы по внешним движениям галактик оказалась возможной из-за «холодности» локального хаббловского потока, дисперсия лучевых скоростей в котором составляет всего  $\sigma_V = 42$  км с $^{-1}$  [75].

Объединяя свиты карликов вокруг других доминирующих галактик Местного объема: М81, Сеп А, NGC 4736, М101 и др., Кашибадзе и Караченцев [75] оценили радиус  $R_0$  для «синтетической» группы МО. Значение  $R_0 = (0.92 \pm 0.02)$  Мпк, полученное по объединению 14 групп, соответствует полной массе синтетической группы порядка  $1.7 \times 10^{12} M_\odot$ , что составляет около 60% от типичной вириальной массы близких групп. Поскольку оценка полной массы по внешним движениям галактик сделана на масштабе в 3–4 раза



**Рис. 12.** Скорости и расстояния близких изолированных карликовых галактик относительно центра Местной группы (рис. 4а [75]).

большим, чем вириальный радиус, в работе [75] был сделан вывод об отсутствии значительного количества темной материи на окраинах Местной группы и других соседних групп галактик.

Аналогичный подход к определению полной массы был применен к ближайшему скоплению Virgo, расположенному на расстоянии 16.5 Мпк. Между Местной группой и скоплением Virgo имеется около 30 карликовых галактик, расстояния до которых были измерены с помощью космического телескопа им. Хаббла [76, 77].

Радиус МО составляет 2/3 расстояния до скопления Virgo. Такая протяженность МО позволяет проследить эффект падения галактик на скопление и определить радиус  $R_0$  с высокой точностью. Рисунок 13 показывает картину хаббловского потока галактик относительно центра скопления Virgo. Галактики с аккуратно измеренными скоростями изображены кружками. Область вириальных движений в самом скоплении отмечена серым. Отсутствие наблюдательных данных о тангенциальной компоненте скоростей галактик вынуждает делать некие предположения об их преобладающем характере движения. Две панели рисунка соответствуют крайним предположениям о характере движений галактик возле скопления:

случай малого аттрактора, когда преобладает хаотический разлет, и случай большого аттрактора, когда доминируют радиальные движения к центру скопления. По этим данным с учетом неопределенности характера движений галактик радиус сферы нулевой скорости вокруг Virgo составляет  $R_0 = (7.32 \pm 0.28)$  Мпк, что соответствует полной массе скопления  $M_T = (8.3 \pm 0.9) \times 10^{14} M_\odot$ . В пределах погрешности эта величина хорошо согласуется с вириальной массой скопления Virgo,  $7.5 \times 10^{14} M_\odot$ , по данным [79]. Практически такое же значение полной массы Virgo было получено в работе [80] при моделировании траекторий галактик методом численного моделирования.

Располагая наиболее полными данными о расстояниях и массах гало близких галактик, Караченцев и Теликова [81] построили распределение светлой и темной материи в Местном объеме. Рисунок 14а представляет интегральный профиль звездной массы, выраженный в единицах критической плотности. Нижняя линия соответствует вкладу главных галактик МО, перечисленных в таблице 1, верхняя линия означает вклад в плотность светимости всего населения МО. Горизонтальная линия фиксирует среднюю космическую плотность звездной массы, согласно [65]. Как видим, Местный объем на всех масштабах до рассто-

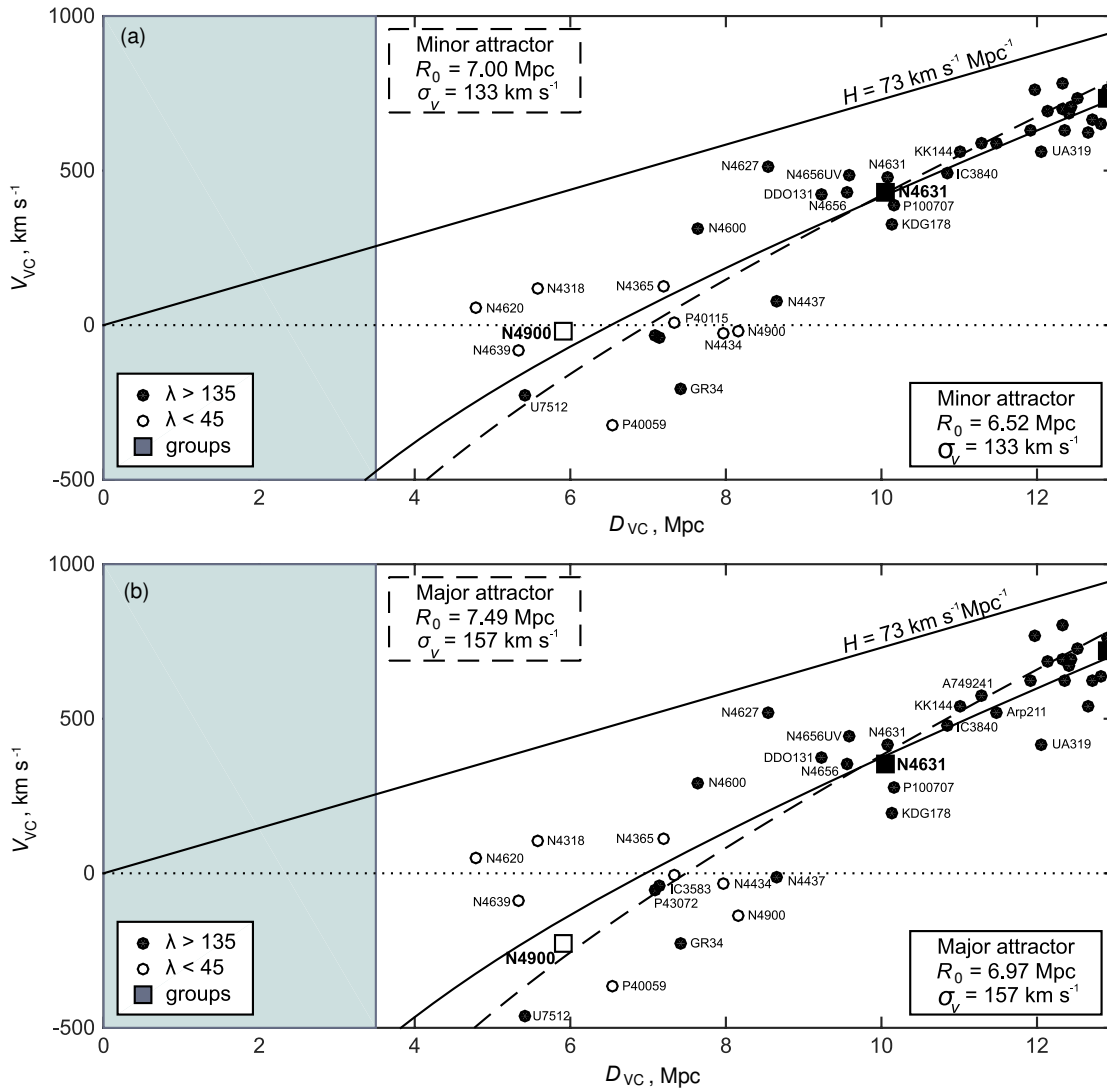


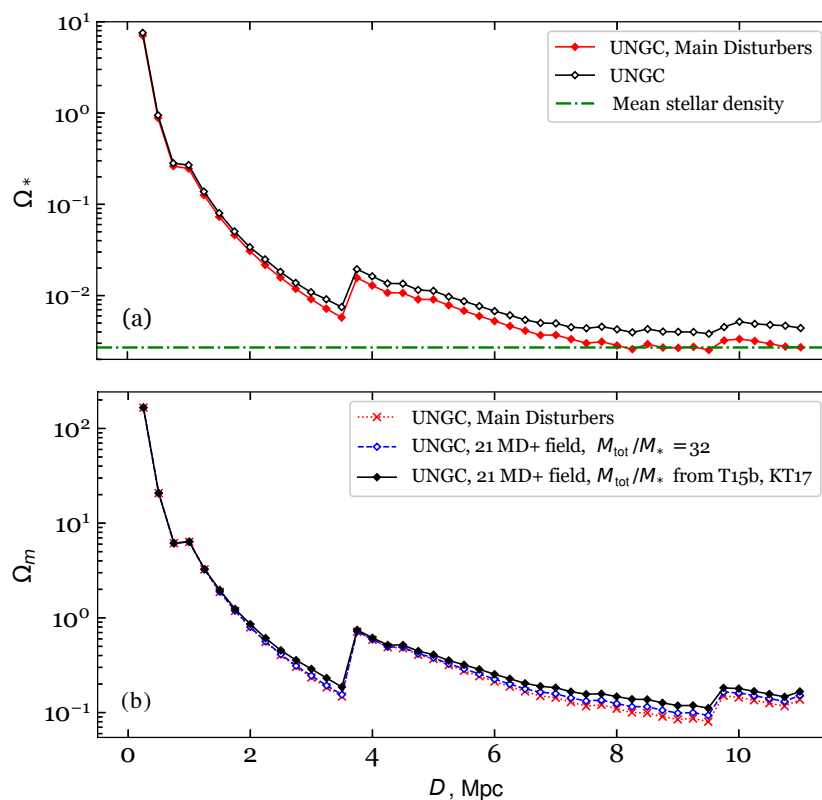
Рис. 13. Скорости и расстояния галактик, расположенных перед скоплением Virgo, относительно центра скопления при двух разных предположениях о преобладающем характере движений (рис. 13 [78]).

яния 11 Мпк показывает избыток средней звездной плотности над ее глобальным значением.

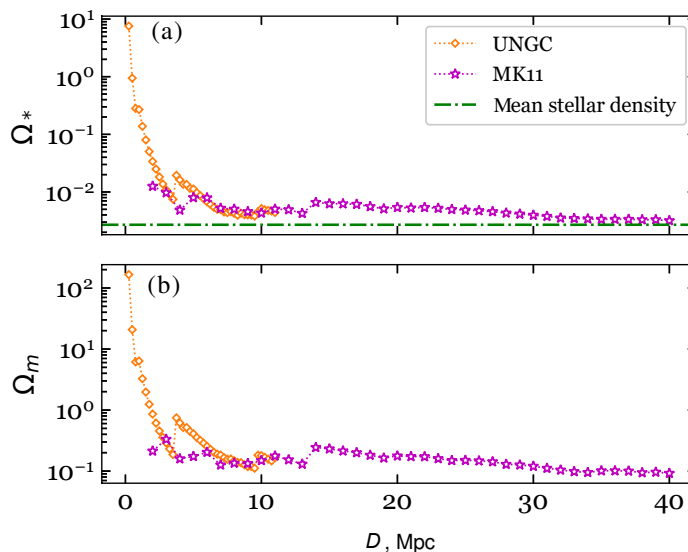
Иная ситуация имеет место на рис. 14b, где показано распределение плотности темной материи. Здесь нижняя линия обозначает вклад гало главных галактик из таблицы 1, а средняя и верхняя линии соответствуют суммарному вкладу всех галактик в предположении как одинакового отношения  $M_T/M_* = 32$  [47], так и с учетом роста  $M_T/M_*$  у галактик поля в сторону групп и в сторону карликовых галактик [82]. Различия между тремя линиями оказываются небольшими, поскольку основной вклад в полную плотность материи в МО привносят две дюжины самых массивных галактик. Примечательно, что средняя плотность темной материи в пределах 11 Мпк составляет всего

$\Omega_m = 0.17$ , т.е. по этому параметру МО выглядит как область пониженной плотности.

Этот странный результат проявляет себя и в гораздо большем объеме. Макаров и Караченцев [83] исследовали локальное распределение светлой и темной (вириальной) массы на основе своего каталога групп. Профили плотности звездной и вириальной массы по их данным показаны последовательностями звездочек на панелях рис. 15. Значения средней плотности в МО обозначены ромбами. Из данных верхней панели следует, что средняя локальная плотность светлой материи обнаруживает слабый избыток по отношению к глобальному значению вплоть до расстояния 40 Мпк. Однако плотность темной материи оказывается довольно низкой, плавно убывая до значения  $\Omega_m = 0.09 \pm 0.03$  при расстоянии 40 Мпк. Близкое значение,  $\Omega_m = 0.12-0.14$ , было



**Рис. 14.** Интегральные профили плотности звездной и полной (вириальной) массы в Местном объеме, выраженные в единицах критической плотности (рис. 1 и 2 [81].) Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.



**Рис. 15.** Интегральные профили плотности звездной и темной материи в пределах 40 Мпк от Млечного Пути (рис. 3 [81].) Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

недавно получено в работе [84] на основе каталога групп, организованного на ином алгоритме. Малое значение локальной средней плотности темной материи по сравнению с ее глобальным значением ( $\Omega_m = 0.24-0.31$ ) приводит к выводу, что основная

масса космической темной материи заключена не в группах и скоплениях, а рассредоточена в межгалактическом пространстве между ними.



## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разностороннее изучение галактик близкой Вселенной сформировалось за последние годы в самостоятельную ветвь наблюдательной космологии. Численное моделирование динамической эволюции галактик в рамках стандартной  $\Lambda$ CDM-модели достигло пространственного разрешения, которому оказываются доступны размеры и массы карликовых галактик. При этом, космология на малых масштабах столкнулась с известными проблемами: наблюдаемым дефицитом галактик малой и очень малой массы, наблюдаемым отсутствием центральных «клювов» на кривых вращения карликовых галактик, обилием тонких плоских структур из карликовых спутников вокруг массивных галактик. Обзор этих и других проблем стандартной парадигмы представлен в работе [85]. Трудности стандартных моделей, обнаружившиеся при рассмотрении карликовых галактик, являются мощным стимулом для рафинирования теоретических сценариев формирования и эволюции галактик.

Измерения лучевых скоростей и расстояний галактик с высокой точностью дают возможность определить пекулярные скорости галактик и по ним восстановить расположение и массы окружающих аттракторов. Многочисленные высокоточные измерения расстояний на космическом телескопе Хаббла сделали Местный объем уникальной лабораторией для проверки космологических моделей, как это предвидел Пиблс [86].

Где локализована основная масса темной материи: в системах галактик или в пространстве между ними? Мы не имеем пока четкого ответа на этот вопрос. Неуклонно возрастающая плотность данных о поле пекулярных скоростей в МО послужит наиболее подходящим наблюдательным материалом для решения этой проблемы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников лаборатории внегалактической астрономии и космологии САО РАН С. С. Кайсина, О. Г. Кашибадзе, Г. Г. Короткову, Д. И. Макарова, Л. Н. Макарову и М. Е. Шарину, а также В. Е. Караченцеву за многолетнее содействие в выполнении данной работы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Эта работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18–02–00005.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. C. Kraan-Korteweg and G. A. Tammann, *Astronomische Nachrichten* **300**, 181 (1979).
2. S. van den Bergh, *Publ. David Dunlap Obs.* **2**, 147 (1959).
3. V. E. Karachentseva, *Soobshch. Byurakan. Obs.* **39**, 62 (1968).
4. V. E. Karachentseva and M. E. Sharina, *Soobshch. Spec. Astrofiz. Obs.*, **57**, 5 (1988).
5. V. E. Karachentseva and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **127**, 409 (1998).
6. V. E. Karachentseva, I. D. Karachentsev, and G. M. Richter, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **135**, 221 (1999).
7. V. E. Karachentseva and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **146**, 359 (2000).
8. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, A. A. Suchkov, and E. K. Grebel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **145**, 415 (2000).
9. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, *Astron. and Astrophys.* **366**, 428 (2001).
10. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and M. Ehle, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 469 (2000).
11. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **377**, 801 (2001).
12. W. K. Huchtmeier, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, *Astron. and Astrophys.* **401**, 483 (2003).
13. L. N. Makarova, I. D. Karachentsev, and T. B. Georgiev, *Astronomy Letters* **23**, 378 (1997).
14. T. B. Georgiev, I. D. Karachentsev, and N. A. Tikhonov, *Astronomy Letters* **23**, 514 (1997).
15. N. A. Tikhonov and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **128**, 325 (1998).
16. M. E. Sharina, I. D. Karachentsev, and N. A. Tikhonov, *Astronomy Letters* **25**, 322 (1999).
17. V. E. Karachentseva, *Commun. Spec. Astrophys. Obs.*, **18**, 42 (1976).
18. B. W. Miller, A. E. Dolphin A.E., M. G. Lee, et al., *Astrophys. J.* **562**, 713 (2001).
19. N. A. Tikhonov and I. D. Karachentsev, *Astronomy Letters* **25**, 391 (1999).
20. P. van Dokkum, Sh. Danieli, J. Cohen, et al., *Nature* **555**, 629 (2018).
21. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 54 (2009).
22. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, et al. *arXiv:1612.05560* (2016).
23. M. A. Zwaan, L. Staveley-Smith, B. S. Koribalski, et al., *Astron. J.* **125**, 2842 (2003).
24. B. S. Koribalski, L. Staveley-Smith, V. A. Kilborn, et al., *Astron. J.* **128**, 16 (2004).
25. R. Giovanelli, M. P. Haynes, B. R. Kent, et al., *Astron. J.* **130**, 2598 (2005).
26. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astron. J.* **142**, 170 (2011).

27. R. Ibata, N. F. Martin, M. Irwin, et al., *Astrophys. J.* **671**, 1591 (2007).
28. A. Drlica-Wagner, K. Bechtol, E. S. Rykoff, et al., *Astrophys. J.* **813**, 109 (2015).
29. K. Chiboucas, I. D. Karachentsev, and R. B. Tully, *Astron. J.* **137**, 3009 (2009).
30. O. Muller, H. Jerjen, and B. Binggeli, *Astron. and Astrophys.* **597**, 7 (2017).
31. P. G. van Dokkum, R. Abraham, and A. Merritt, *Astrophys. J.* **782**, 24 (2014).
32. E. Kim, M. Kim, N. Hwang, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 1881 (2011).
33. F. Zwicky, *Morphological Astronomy* (Springer, Berlin, 1957).
34. D. Martinez-Delgado, E. D'Onghia, T. S. Chonis, et al., arXiv:1410.6368 (2014).
35. I. D. Karachentsev, P. Riepe, T. Zilch, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 379 (2015).
36. B. Javanmardi, D. Martinez-Delgado, P. Kroupa, et al., *Astron. and Astrophys.* **588A**, 89 (2016).
37. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, and D. I. Makarov, *Astron. J.* **127**, 2031 (2004).
38. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **145**, 101 (2013).
39. E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin, *Astrophysical Bulletin* **67**, 115 (2012).
40. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astron. J.* **111**, 794 (1996).
41. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz, and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 289 (2003).
42. R. A. Ibata, G. F. Lewis, A. R. Conn, et al., *Nature* **493**, 62 (2013).
43. O. Müller, M. Pawlowski, H. Jerjen, and F. Lelli, *Science* **359**, 534 (2018).
44. R. B. Tully, *Nearby Galaxies Catalog* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1988).
45. R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophys. J.* **676**, 184 (2008).
46. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and D. I. Makarov, *Astron. J.* **147**, 13 (2014).
47. I. D. Karachentsev and Y. N. Kudrya, *Astron. J.* **148**, 50 (2014).
48. I. D. Karachentsev, M. E. Sharina, A. E. Dolphin, et al., *Astron. and Astrophys.* **379**, 407 (2001).
49. D. I. Makarov, L. N. Makarova, M. E. Sharina, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425**, 709 (2012).
50. A. Pasquali, S. Larsen, I. Ferreras, et al., *Astron. J.* **129**, 148 (2005).
51. I. D. Karachentsev, L. N. Makarova, D. I. Makarov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, L85 (2015).
52. I. D. Karachentsev, L. N. Makarova, R. B. Tully, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443**, 1281 (2014).
53. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and D. I. Makarov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 4136 (2018).
54. A. Gil de Paz, S. Businer, B. Madore, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **173**, 185 (2007).
55. J. C. Lee, R. C. Kennicutt, J. G. Funes, et al., *Astrophys. J.* **692**, 1305 (2009).
56. J. C. Lee, A. Gil de Paz, R. C. Kennicutt, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 6L (2011).
57. I. D. Karachentsev and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **146**, 46 (2013).
58. R. C. Kennicutt, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
59. S. S. Kaisin and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **74**, 1 (2019).
60. I. Karachentsev, E. Kaisina, S. Kaisin, and L. Makarova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415L**, 31 (2011).
61. J. Pflamm-Altenburg, C. Weidner, and P. Kroupa, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **395**, 394 (2009).
62. D. R. Weisz, B. D. Johnson, L. C. Johnson, et al., *Astrophys. J.* **744**, 44 (2012).
63. M. Fumagalli, R. L. Da Silva, and M. R. Krumholz, *Astrophys. J.* **741**, L25 (2011).
64. I. D. Karachentsev and S. S. Kaisin, *Astron. J.* **133**, 1883 (2007).
65. M. Fukugita and P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **616**, 643 (2004).
66. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Astron. and Astrophys.* **54**, 661 (1977).
67. S. S. McGaugh, *Astrophys. J.* **632**, 859 (2005).
68. S. S. McGaugh, *Astron. J.* **143**, 40 (2012).
69. I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, and O. G. Kashibadze, *Astron. J.* **153**, 6 (2017).
70. D. Lynden-Bell, *Observatory* **101**, 111 (1981).
71. D. N. Spergel, *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 377 (2007).
72. T. Ekholm, Y. Baryshev, P. Teerikorpi, et al., *Astron. and Astrophys.* **368**, L17 (2001).
73. I. D. Karachentsev, M. E. Sharina, D. I. Makarov, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 812 (2002).
74. I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov, and R. B. Tully, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **393**, 1265 (2009).
75. O. G. Kashibadze and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys.* **609A**, 11 (2018).
76. I. D. Karachentsev, R. B. Tully, P.-F. Wu, et al., *Astrophys. J.* **782**, 4 (2014).
77. I. D. Karachentsev, L. N. Makarova, R. B. Tully, et al., *Astrophys. J.* **858**, 62 (2018).
78. O. G. Kashibadze, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, *Astrophysical Bulletin* **73**, 124 (2018).
79. R. B. Tully and E. J. Shaya, *Astrophys. J.* **281**, 31 (1984).
80. E. J. Shaya, R. B. Tully, Y. Hoffman, and D. Pomarède, *Astrophys. J.* **850**, 207 (2017).
81. I. D. Karachentsev and K. N. Telikova, arXiv:1810.06326 (2018).
82. R. B. Tully, *Astron. J.* **149**, 171 (2015).
83. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
84. E. Kourkchi and R. B. Tully, *Astrophys. J.* **843**, 16 (2017).
85. P. Kroupa, arXiv:161003854 (2016).
86. P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1993).

## Dwarf Galaxies in the Local Volume

I. D. Karachentsev and E. I. Kaisina

We review observational data about a sample of Local Volume objects containing about 1000 galaxies within 11 Mpc of the Milky Way. Dwarf galaxies with stellar masses  $M_*/M_\odot < 9$  dex make up 5/6 of the sample. Almost 40% of them have their distances measured with high precision using the Hubble Space Telescope. Currently, the LV is the most representative and least selection-affected sample of dwarf galaxies suitable for testing the standard  $\Lambda$ CDM paradigm at the shortest cosmological scales. We discuss the H II properties of dwarf galaxies in different environments and the star formation rates in these systems as determined from  $FUV$ - and  $H\alpha$ -survey data. We also pay certain attention to the baryonic Tully–Fisher relation for low-mass dwarf galaxies. We also point out that LV dwarfs are important tracers for determining the total masses of nearby groups and the nearest Virgo cluster.

Keywords: *galaxies: formation—galaxies: dwarf—galaxies: star formation—galaxies: dark matter—surveys*