

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Проблемы космологии на малых масштабах Вселенной*

И.Д. Караченцев

Перечислены шесть вызовов для стандартной космологической модели Λ CDM, которые возникают при сравнении её выводов с наблюдательными данными на масштабах ~ 1 Мпк. Представлены различные параметры массивных и карликовых галактик в местной сфере радиусом 12 Мпк. Определены средние плотности звёздной массы и тёмной материи в зависимости от расстояния в местном объёме. Рассмотрены наблюдательные данные о величине и ориентации углового момента у близких галактик. Приведено сравнение оценок массы у системы галактик по движениям её внутренних (вириализованных) членов и окрестных галактик. Обсуждаются причины низкого значения плотности материи, $\Omega_m = 0,08 \pm 0,02$, в местной Вселенной по сравнению с глобальным значением $\Omega_m = 0,30 \pm 0,02$.

Ключевые слова: галактики, тёмная материя, системы галактик

PACS numbers: 95.35. + d, 95.36. + x, 98.65. – r

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039964>

Содержание

1. Введение (239).
 2. Вызовы для стандартной космологической модели (240).
 - 2.1. Недостаток числа карликовых спутников у массивных галактик.
 - 2.2. Избыток тонких компланарных структур среди спутников.
 - 2.3. Расхождение между оценками параметра Хаббла.
 - 2.4. Проблема потерянных барионов.
 - 2.5. Проблема потерянной тёмной материи.
 - 2.6. Несоответствие ожидаемой и наблюдаемой ориентации спинов галактик.
 3. Образцовая выборка галактик местного объёма (241).
 4. Ориентация спинов галактик в местном объёме (243).
 5. Местный хаббловский поток галактик, тёмная материя и тёмная энергия (244).
 6. Заключение (246).
- Список литературы (247).

1. Введение

Стандартная космологическая модель Λ CDM с относительной плотностью барионного вещества $\Omega_b = 0,04$, холодной тёмной материей с плотностью $\Omega_{DM} = 0,26$ и преобладающей компонентой тёмной энергии $\Omega_\Lambda = 0,70$ успешно описывает наблюдаемую структуру Вселенной на больших масштабах. Результаты численного (N-body) моделирования образования и эволюции крупномасштабной структуры убедительно показывают, что она представляет собой космическую "паутину", где галактики сосредоточены в "стенках", на пересечении которых

возникают протяжённые волокна (цепочки галактик). В свою очередь, на пересечении космических волокон формируются массивные узлы — скопления галактик, население которых пополняется за счёт притока новых галактик вдоль волокон. При взаимном движении галактик в плотных областях скоплений происходит обдиранье и коллективизация их лёгкой газовой компоненты, что приводит к образованию в скоплениях горячей газовой среды, ярко светящейся в рентгеновских лучах. Основной же объём Вселенной занимают космические пустоты, войды, обрамлённые стенками и волокнами. В войдах изредка встречаются карликовые галактики богатые газом и с активным звездообразованием.

Все эти элементы крупномасштабной структуры видны на рис. 1, где показано распределение на небе в экваториальных координатах 5000 близких галактик с лучевыми скоростями менее 1500 км с^{-1} . В центре этой карты находится скопление галактик Virgo, вириальная зона которого обозначена чёрным кругом. К скоплению Virgo, удалённому от нас на расстояние 16 Мегапарсек (Мпк), примыкают космические волокна, образуя контур морской звезды. На левой стороне рисунка заметна обширная пустота (местный войд), угловой размер которой достигает одного радиана. Местный войд начинается от границы местной группы галактик и простирается до расстояния около 20 Мпк. Галактики с активным и потухшим звездообразованием обозначены разным цветом в зависимости от их морфологического типа на цифровой шкале de Vaucouleurs в верхнем левом углу рисунка. Отчетливо видно, что галактики, богатые газом и с молодым звёздным населением, преобладают в областях низкой плотности, а в скоплениях Virgo и Fornax (расположено в правой нижней части рисунка) домини-

И.Д. Караченцев

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Зеленчукский район,
Карачаево-Черкесская республика, Российская Федерация
E-mail: idkarach@gmail.com

Статья поступила 2 апреля 2025 г.

* Статья написана на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук, 19 марта 2025 г. (см. УФН 196 (3) 238 (2026))

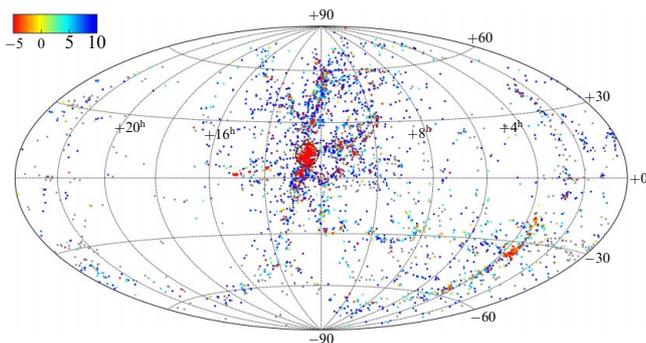


Рис. 1. Распределение на небе в экваториальных координатах 5000 близких галактик с лучевыми скоростями менее 1500 км с^{-1} . Галактики разных морфологических типов по цифровой шкале (вверху слева) показаны разным цветом. Вириальная область скопления Virgo отмечена окружностью.

ругие галактики со старым звёздным населением, погружённые в массивную горячую газовую среду. Через рентгеновские "очки" на этой карте были бы видны только два отмеченных скопления на общем тёмном фоне. Различные свойства скоплений галактик и их роль в космологии подробно изложены в обзоре Вихлинина и др. [1].

2. Вызовы для стандартной космологической модели

С ростом вычислительных ресурсов, используемых для N-body моделирования динамической эволюции Вселенной, пространственное разрешение космических структур достигло масштаба $\sim 1 \text{ Мпк}$ или разрешения по массам галактик порядка 10^7 масс Солнца [2–4]. При этом стали возникать значительные расхождения между результатами расчётов и наблюдательными данными. Преодоление их является важным стимулом для совершенствования стандартной космологической модели. Перечислим шесть основных противоречий, обсуждавшихся в литературе.

2.1. Недостаток числа карликовых спутников у массивных галактик

Модельные расчёты дают довольно крутой степенной спектр масс для сгустков тёмной материи, где скапливаются барионы, из которых затем формируются галактики [5, 6]. Наблюдаемое же число мелких спутников вокруг массивных галактик типа Млечного Пути и туманности Андромеды оказалось в десятки раз меньше ожидаемого в моделях ΛCDM . Астрономы-наблюдатели занялись систематическими поисками новых карликовых спутников, используя современные глубокие обзоры неба в различных спектральных диапазонах, что несколько уменьшило это расхождение. С другой стороны, теоретики приняли во внимание, что в процессе эволюции значительная часть спутников исчезала, поглощаясь большими галактиками из-за эффекта динамического трения [7]. В настоящий момент это противоречие пока сохраняется, хотя и не в прежнем остром виде.

2.2. Избыток тонких компланарных структур среди спутников

За последнюю декаду появилось множество публикаций, авторы которых указывали на то, что спутники массив-

ных галактик распределены в пространстве не хаотичным образом, а сгруппированы в тонкие плоские структуры с когерентным движением спутников [8–11]. В частности, такие компланарные подсистемы были обнаружены у спутников Млечного Пути, галактики Андромеды (M31), и у других ближайших массивных галактик. Характерная толщина плоских спутниковых систем оказалась порядка 20 кпк при общих размерах около 200 кпк . Вероятность обнаружения таких образований по результатам численного моделирования оказалась весьма низкой. Эта проблема остаётся пока далёкой от разрешения, хотя вновь обнаруживаемые спутники не всегда встраиваются в уже известные плоские структуры. Одним из объяснений наличия тонких компланарных структур среди спутников может быть анизотропная аккреция на массивную галактику окрестных карликов, которые сосредоточены в космических филаментах [12].

2.3. Расхождение между оценками параметра Хаббла

По данным космической миссии Planck, глобальное значение параметра Хаббла, определяющего темп расширения Вселенной и её возраст, составляет $H_0 = (67 \pm 1) \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ [13, 14]. Однако, локальное значение параметра Хаббла, получаемое из сравнения лучевых скоростей и расстояний галактик, $H_0 = (74 \pm 2) \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ [15–17], значимо превышает глобальную величину. Такое расхождение оценок H_0 получило название "хаббловского трения". Локальная величина параметра H_0 определяется на масштабах $\sim 100 \text{ Мпк}$. При её измерении необходим тщательный учёт космических потоков, амплитуды которых в разных участках неба могут достигать нескольких сотен км с^{-1} . К примеру, наша Галактика имеет индивидуальную скорость относительно реликтового космического излучения около 630 км с^{-1} . Тем не менее, с учётом местных потоков и неопределённостей в нуль-пункте шкалы расстояний, различие локальной и глобальной величины параметра H_0 значительно превышает ошибки их измерения. Для объяснения этого противоречия выдвигалось предположение, что земной наблюдатель расположен посреди громадной космической лагуны размером $\sim (200–300) \text{ Мпк}$ [18, 19]. Согласно результатам численного моделирования, расширение войдов происходит с темпом примерно на $(10–15) \%$ выше глобального. Следовательно, позиция наблюдателя вблизи центра пустоты могла бы объяснить более высокий темп расширения местного участка Вселенной. Однако, стандартная космологическая модель не предполагает, чтобы на масштабах свыше 200 Мпк существовали флуктуации средней плотности материи с амплитудой более 3% .

2.4. Проблема потерянных барионов

Соотношение количества барионной материи и тёмной материи в модели ΛCDM составляет $\Omega_b : \Omega_{\text{DM}} \simeq 1 : 6$. Однако, наблюдаемое соотношение плотностей светлой (звёздной) и тёмной материи, $\Omega_* : \Omega_{\text{DM}} \simeq 1 : 42$, оказывается примерно в семь раз меньше ожидаемого [20, 21]. В богатых скоплениях галактик масса горячего газа на порядок превышает суммарную массу звёзд [1, 22]. Учёт ионизованного газа скоплений ослабляет проблему потерянных барионов, однако, расхождение на уровне фактора $2–3$ всё же остаётся. В последние годы появился новый инструмент для изучения межгалактической

среды с помощью измерения меры дисперсии и красного смещения в быстрых радиовсплесках (FRB). Этот метод позволяет оценить среднюю плотность свободных электронов на луче зрения [23]. Данные, полученные по изучению быстрых радиовсплесков, показали, что межгалактическое пространство заполнено тёплым ионизованным газом, температура которого мала для обнаружения его в рентгеновском диапазоне. Средняя плотность этой среды оказалась вполне достаточной, чтобы разрешить проблему потерянных барионов [24, 25].

2.5. Проблема потерянной тёмной материи

Вопрос о существовании тёмной материи в галактиках и между ними имеет почти 90-летнюю историю [26]. Наблюдательные проявления темной материи видны в плоских (неубывающих, некеплеровских) кривых вращения на окраинах галактик, а также в большой дисперсии лучевых скоростей у галактик в группах и скоплениях. Физическая природа тёмной материи остаётся неизвестной. Подробный обзор наблюдательных данных, свидетельствующих о наличии небарионной тёмной материи, представлен в обзоре [27]. Соотношение тёмной и светлой (звёздной) материи растёт от нормальных галактик в сторону карликовых и от двойных, тройных систем в сторону богатых групп и скоплений. Минимум этого отношения приходится на массивные галактики типа Млечного Пути. Большинство определений массы тёмной материи в группах и скоплениях галактик сделаны на основе применения к ним теоремы о вириале, которая предполагает баланс между кинетической (T) и потенциальной (U) энергией системы гравитирующих тел, $2T + U = 0$. Если в системе имеется центральная доминирующая галактика, то её полную массу оценивают по орбитальным движениям мелких спутников. В последнее время появились новые и независимые оценки полной массы скоплений с использованием эффекта слабого гравитационного линзирования, которые основаны на анализе узора позиционных углов далёких галактик вокруг более близкого скопления с известным красным смещением. В общих чертах согласие между оценками массы обоими методами вполне удовлетворительное [28, 29].

Составление каталогов близких групп и скоплений, охватывающих всё небо, и применение к ним вириальных оценок массы показало, что средняя плотность материи, заключённой в системах галактик разного масштаба, составляет $\Omega_m = 0,08 \pm 0,02$ [30–33]. Этой плотности явно недостаточно, чтобы согласовать её с глобальным значением $\Omega_m = 0,30 \pm 0,02$ [12, 13], которое следует из анализа свойств реликтового излучения. Естественно предположить, что недостающая часть тёмной материи распределена между группами и скоплениями галактик, но прямых методов обнаружения её пока предложено не было. Обсуждение этой наиболее важной и сложной проблемы будет продолжено в разделе 5.

2.6. Несоответствие ожидаемой и наблюдаемой ориентации спинов галактик

Угловой момент вращения галактики, её спин, является весьма консервативной характеристикой, сохраняясь по величине и направлению на протяжении космологического времени. По этой причине угловые моменты являются важными индикаторами начальных условий формирования галактик. Согласно теоретическим пред-

сказаниям, направления спинов галактик ориентированы преимущественно в плоскости стенки, в которой они находятся [34–36]. В частности, для галактик местного сверхскопления ожидается упорядоченное расположение их спинов вдоль экватора сверхскопления. Однако, предпринятые попытки проверить это предсказание пока не обнаружили заметного предпочтения в ориентации спинов [37, 38].

3. Образцовая выборка галактик местного объёма

Каталоги звёзд и галактик обычно составляют, ограничивая выборку объектов их видимой величиной (поток). Численное моделирование крупномасштабной структуры Вселенной осуществляется в некотором ограниченном объёме пространства. Поэтому для проверки результатов космологического моделирования необходима выборка галактик, ограниченная фиксированным расстоянием. Составление такой выборки сопряжено с большими трудностями из-за громадного диапазона светимостей галактик, а также трудностей измерения их расстояний. К примеру, список 1000 самых ярких галактик перекрывается со списком самых близких галактик менее чем на 10%. Первый список соседей Млечного Пути был составлен в 1979 г. [39] и насчитывал всего 179 галактик с расстояниями от наблюдателя менее 10 Мпк. За прошедшие годы благодаря целенаправленным усилиям [40, 41] выборка близких галактик была увеличена почти на порядок. Пополнение этого списка продолжается и в настоящее время, в основном, за счёт обнаружения всё более тусклых галактик, имеющих низкую поверхностную яркость. Создание образцовой и представительной выборки галактик местного объёма состояло из нескольких основных этапов.

1. Для поиска новых близких галактик низкой светимости были использованы массовые обзоры северного и южного неба в оптическом диапазоне: POSS-II, ESO SERC, SDSS, DESI [42, 43] и в радиолинии нейтрального водорода 21-см: HIPASS, Arecibo survey, FAST survey [44–46].

2. Были проведены массовые измерения лучевых скоростей отобранных кандидатов в близкие галактики на оптическом 6-метровом телескопе Российской академии наук, БТА [47], на 100-м радиотелескопе в Эффельсберге, Германия [48–50] и на других крупнейших радиотелескопах.

3. Определение расстояний галактик выполнялось на космическом телескопе Хаббла (HST) по светимости вершины ветви звёзд — красных гигантов (TRGB). С использованием снимков галактики в двух фильтрах строилась диаграмма "цвет – светимость" для звёзд. Положение TRGB, определяемое параметрами ядерных реакций в недрах звезды, позволяло измерить расстояние галактики любого типа с точностью $\sim 5\%$. В качестве примера на рис. 2 приведена диаграмма "цвет – величина" для карликовой галактики KK196, удалённой на расстояние 3,96 Мпк. Всего по снимкам, полученным на HST, были измерены высокоточные расстояния для более 500 близких галактик.

4. Для галактик местного объёма с расстояниями в пределах 12 Мпк были определены интегральные светимости, массы звёздной и газовой компоненты, темп звездообразования и другие характеристики. Каталог и

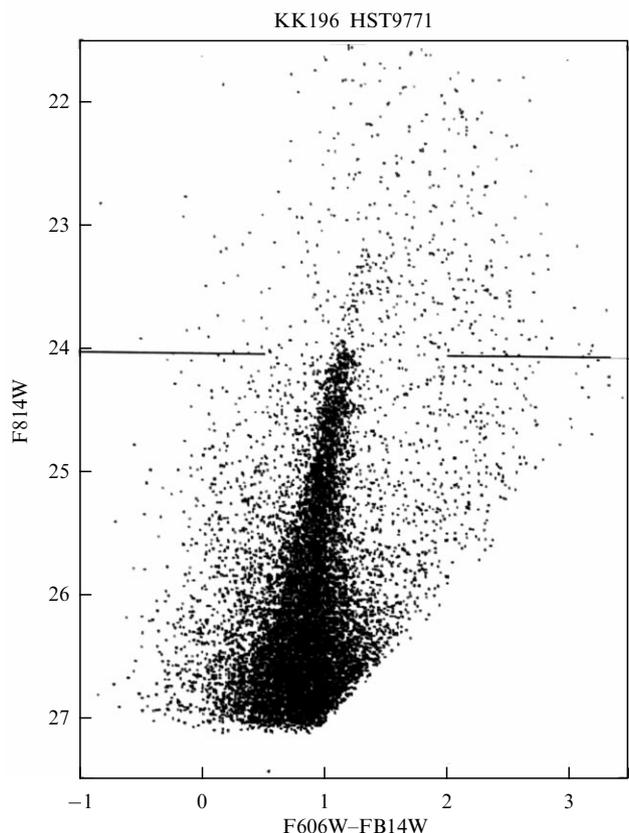


Рис. 2. Диаграмма "цвет – звёздная величина" для звёзд карликовой галактики KK196 на расстоянии 3,96 Мпк, полученная по снимкам в фильтрах F814W и F606W на космическом телескопе Хаббла. Положение вершины ветви красных гигантов отмечено горизонтальной линией.

атлас ~ 1700 галактик местного объёма представлен в базе данных [51], которая периодически пополняется но-

выми объектами, а также уточнением основных параметров галактик. Как показывает титульная страница базы данных (рис. 3), количество её посещений уже превысило четыреста тысяч, а количество ссылок на две опубликованные версии каталога [40, 41] достигло 1300.

Распределение галактик местного объёма по величине их звёздной массы и расстоянию от наблюдателя приведено на рис. 4. В пределах расстояния 12 Мпк имеется 27 галактик, звёздные массы которых сравнимы с массой Млечного Пути (MW) и туманности Андромеды (M31). Около половины всех более слабых галактик ассоциируются с этими гигантами. Разброс галактик по звёздным массам достигает шести порядков. Измерения разности лучевых скоростей спутников ΔV и их проекционных расстояний R_p относительно главной галактики позволяют определить полную динамическую массу группы [52]

$$M_T = \left(\frac{16\pi}{G} \right) \langle \Delta V^2 R_p \rangle,$$

где G — постоянная тяготения. Здесь сделано предположение, что орбиты спутников ориентированы случайно относительно луча зрения, а их средний эксцентриситет орбиты составляет $\langle e^2 \rangle = 1/2$, как это следует из результатов численного моделирования галактик в стандартной космологической модели.

Таблица 1 представляет список 27 самых массивных галактик местного объёма. В её столбцах указаны: (1) — имя галактики; (2) — её расстояние от наблюдателя в Мпк; (3) — число спутников с измеренной лучевой скоростью; (4) — дисперсия лучевых скоростей спутников; (5) — интегральная масса группы; (6) — отношение интегральной массы к звёздной массе группы. Как следует из этих данных, типичные скорости движения галактик в близких группах составляют ~ 100 км с⁻¹, а типичное отношение полной массы к звёздной массе характеризуется величиной $M_T/M_* \sim 40$.

Data base on the Local Volume Objects							
Name							
AGC102728	UGC12894	PGC000083	WLM	And XVIII	PAndAS-03	PAndAS-04	PAndAS-05
ESO409-015	AGC748778	And XX	UGC00064	UGC00063	ESO349-031	dw0009-25	NGC0024
Dw0010-0112	dw0010-25	NGC0045	ScutesA	NGC0055	NGC0059	NGC 55-dw1	ESO410-005
LV_00015-3825	And XIX	IC0010	JKB129	And XXVI	Sc22	Cetus	ESO294-010
UGC00288	And XXV	ESO473-024	DoV	NGC0147	ScuSR	DoVI	And III
Cas III	dw0036-2828	And XXX	And XVII	And XXVII	DoVII	KK7	NGC0185
NGC0205	DoVIII	And IV	MESSIER032	DoIX	MESSIER031	DDO226	And I
And XI	DoIV	DoII	NGC0247	And XII	NGC0253	Sci-MM-Dw1	NGC253-SNEC-dw1
KDC002	DDO006	Sci-MM-Dw2	ESO540-032	Sci-MM-Dw5	Bcl520	And XIV	And XIII
SMC	And IX	Sci-MM-Dw4	NGC0300	LV_J0055-2310	Sculptor_C	PAndAS-48	And XVI
Sculptor	PAndAS-50	LGS 3	IC1613	And X	Sculptor_B	UGC00685	KKH5
PAndAS-C02	AM0106-382	Sculptor_A	DoIII	NGC0404	And V	DoI	And XV
And II	And XXIV	ScutesB	PAndAS-55	Triangulum III	PAndAS-56	And XXII	PAndAS-57
Triangulum IV	UGC01056	PAndAS-58	And XXIII	UGC01085	UGC01104	AGC112454	MESSIER033
dw0133+1543	dw0134+1544	AGC114027	KKH6	NGC0625	dw0136+1628	NGC628dwB	NGC0628
NGC628dwA	dw0137+1607	AGC112503	UGC01171	dw0139+1433	DDO013	AGC112521	KK13
KDC010	Dw0143+1338	KK14	ESO245-005	JKB142	KK15	N672dwB	N672dwA
IC1727	NGC0672	UGC01281	Dw0149+3237	Phoenix	KK16	Dw0158+3018	KK17
NGC0784	UGC01561	Cetus III	Cas1	UGC01703	Triangulum II	NGC0855	Dw0214+2836

Рис. 3. Титульная страница базы данных по галактикам местного объёма. На 26.01.2025 г. количество посещений базы данных составило 465737.

Таблица 1. Самые массивные галактики Местного объёма

Имя	D	N_v	σ_v	M_T	M_T/M_*
	Мпк		км с ⁻¹	$10^{12}/M_\odot$	
Milky Way	0,01	45	109	1,17	38 ± 13
M31	0,77	51	113	1,70	48 ± 9
NGC253	3,70	7	42	0,81	13 ± 4
N628 = M74	10,19	9	69	1,44	60 ± 22
NGC891	9,95	5	92	0,83	14 ± 3
NGC1291	9,08	2	121	4,35	75 ± 7
IC342	3,28	8	73	1,59	58 ± 29
NGC2683	9,82	2	43	0,12	3 ± 3
NGC2784	9,82	2	111	3,04	80 ± 80
NGC2903	9,17	5	41	0,45	11 ± 9
N3031 = M81	3,70	31	123	3,10	37 ± 10
NGC3115	10,20	10	112	4,82	80 ± 25
NGC3184	11,12	2	59	0,66	33 ± 4
N3379 = M105	10,80	33	136	5,75	30 ± 7
NGC3521	10,70	3	55	0,89	12 ± 5
N3556 = M108	9,90	2	67	1,07	52 ± 47
N3627 = M66	11,10	22	135	5,89	6 ± 6
NGC4258	7,66	11	96	2,09	39 ± 18
Sombbrero	9,55	15	96	13,38	91 ± 35
N4736 = M94	4,41	15	68	2,40	83 ± 28
N5055 = M63	9,04	7	54	0,51	8 ± 3
NGC5128	3,68	34	124	4,67	58 ± 17
N5194 = M51	8,40	5	83	1,35	17 ± 14
NGC5236	4,90	10	61	1,07	24 ± 6
N5457 = M101	6,95	8	69	1,07	27 ± 10
NGC6744	9,51	5	71	1,55	24 ± 14
NGC6946	7,73	8	65	1,23	20 ± 8

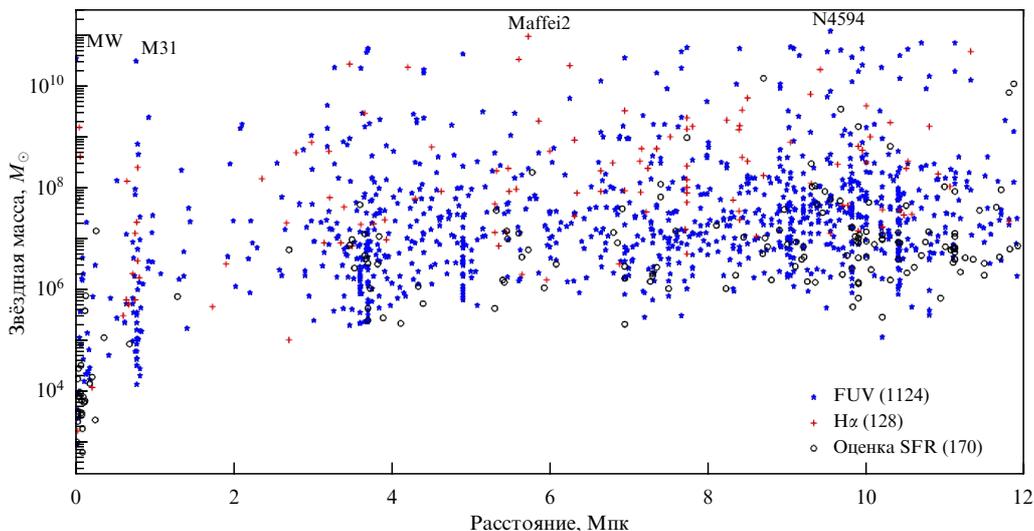


Рис. 4. Распределение галактик местного объёма по величине звёздной массы (в единицах массы Солнца) и расстоянию (в Мпк). Разными символами обозначены галактики с определением их темпа звездообразования по потоку в далёком ультрафиолете (FUV), потоку в линии H α и по калибровочному соотношению "масса – SFR".

4. Ориентация спинов галактик в местном объёме

Абсолютная величина углового момента вращения галактики, определяемого как произведение амплитуды вращения её диска на характерный радиус диска и его барионную массу, варьируется в пределах более чем 9 порядков в зависимости от светимости галактики и её морфологического типа. Для произвольно ориентированной галактики относительно луча зрения пространственное направление её спина можно определить, зная по спектральным данным, какая сторона её диска удаляется

от наблюдателя. При этом, необходимо определить, какая сторона вдоль малой оси изображения галактики является ближней к наблюдателю. Такие условия удаётся выполнить только для самых близких крупных галактик, где различима детальная структура. В далёких областях, за пределами местного объёма для анализа ориентации спинов используют выборки галактик, ориентированных с ребра [37, 53] или же ориентированных анфас, где можно рассмотреть направление закручивания спирального узора по или против часовой стрелки [54]. В результате таких исследований обнаруживались слабые признаки анизотропии в распределении спинов спиральных галактик.

Таблица 2. Оценки общей массы систем галактик

Системы	M_v/M_\odot	$M(R_0)/M_\odot$	$R_0/\text{Мпк}$
Местная группа	$(2,8 \pm 0,6) \times 10^{12}$	$(1,9 \pm 0,2) \times 10^{12}$	$0,96 \pm 0,03$
Синтетическая группа	$(1,8 \pm 0,5) \times 10^{12}$	$(1,7 \pm 0,2) \times 10^{12}$	$0,93 \pm 0,03$
Скопление Virgo	$(6,3 \pm 0,9) \times 10^{14}$	$(7,2 \pm 0,9) \times 10^{14}$	$7,0 \pm 0,2$

которая отделяет коллапсирующую область вокруг местной группы от общего космологического расширения. Типичное отношение R_0 к вириальному радиусу группы составляет $R_0/R_v \simeq 3,5$. При фиксированном значении параметра Ω_Λ полная масса аттрактора (группы/скопления) связана с величиной R_0 соотношением

$$M_T(R_0) = \left(\frac{\pi^2}{8G}\right) H_0^2 C(\Omega_\Lambda) R_0^3,$$

где $C(\Omega_\Lambda)$ — безразмерный фактор, принимающий значения от 1 до 9/4. При $\Omega_\Lambda = 0,7$ и $H_0 = 74 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ это выражение приобретает вид $M_T/M_\odot = 2,1 \times 10^{12} \times (R_0/\text{Мпк})^3$.

Мы определили величину радиуса R_0 для местной группы [55], для синтетической группы, составленной из нескольких соседних групп [56] и для ближайшего богатого скопления Virgo [57, 58]. Результаты представлены в табл. 2. Как следует из этих данных, оценки полной массы групп и скопления по вириальным движениям членов, M_v , согласуются с оценками массы по движениям окрестных галактик, $M(R_0)$, в пределах статистических ошибок обоих методов. Здесь следует отметить, что достаточно низкая погрешность оценки массы местной группы по величине радиуса R_0 , $\sim 10\%$, обусловлена малой дисперсией лучевых скоростей галактик в окрестном хаббловском потоке. Согласно последним данным [59], наблюдаемая дисперсия лучевых скоростей у падающих к местной группе галактик составляет всего 15 км с^{-1} , что существенно меньше, чем величина 70 км с^{-1} , которая получена из данных численного моделирования местного потока. Это обстоятельство можно рассматривать как ещё одну проблему для стандартной космологической модели, недавно возникшую на малых масштабах.

Полученное согласие значений массы в объёмах $(R_v)^3$ и $(3,5R_v)^3$ указывает на то, что основная масса тёмной материи сосредоточена в пределах вириального радиуса системы галактик. Необходимо отметить также, что кинематика хаббловского потока зависит от величины Λ -члена, действующего как универсальная сила отталкивания между галактиками. При этом, предположение об отсутствии Λ -члена приводило бы к парадоксальным оценкам массы в пределах $3,5R_v$ меньшим, чем в пределах R_v . Здесь мы имеем наблюдательное свидетельство действия тёмной энергии на близких к нам расстояниях, что важно, поскольку первичное указание на наличие тёмной энергии было получено по наблюдениям предельно далеких событий — вспышек сверхновых, происходивших в далекую эпоху миллиарды лет назад.

На рисунке 7 представлено распределение средней плотности звёздной массы (верхняя панель) и полной динамической массы (нижняя панель) в зависимости от радиуса сферы вокруг наблюдателя. Для этого были использованы данные каталога местного объёма, UNGC [41] и каталога групп галактик МК11 [32] с расстояниями до 40 Мпк. Горизонтальная линия на верхней панели соответствует глобальному значению средней плотности звёздной материи по данным глубоких инфракрасных обзоров

неба [60]. Как видно из этих данных, на всех масштабах вплоть до 40 Мпк имеет место избыток локальной плотности светлой материи над её глобальным значением.

Поведение средней плотности всей материи с расстоянием $\Omega_m(D)$ повторяет в общих чертах распределение $\Omega_*(D)$. Однако, в более крупных объёмах при $D > 20$ Мпк средняя плотность Ω_m оказывается систематически ниже глобального значения $\Omega_m = 0,30$, отмеченного горизонтальной линией. Независимые оценки вириальных масс групп и скоплений галактик, сделанные по данным каталога [33], также приводят к среднему значению $\Omega_m \simeq 0,08 \pm 0,02$ на масштабе ~ 40 Мпк. Для объяснения различия между оценками локального и глобального значения Ω_m выдвигались различные предположения.

Согласно [61, 62], профиль плотности тёмной материи в системах галактик может быть более протяжённым, чем профиль барионной материи, и тогда в невидимых ореолах вокруг групп и скоплений была бы заключена основная доля тёмной материи. Но этому предположению противоречат наблюдательные данные из табл. 2, которые фиксируют приблизительное равенство оценок полной массы, сделанных в объёмах с радиусами R_v и $R_0 \simeq 3,5R_v$.

Другое объяснение допускает, что рассматриваемая область местной вселенной диаметром 80 Мпк не соответствует масштабу космологической "ячейки однородности". Земной наблюдатель может находиться внутри протяжённого космического войда, где средняя плотность материи примерно в 3 раза ниже глобальной. Однако, из данных верхней панели рис. 7 следует, что широкие окрестности вокруг нашей Галактики характеризуются не дефицитом, а избытком локальной звёздной плотности. При этом подсчёты числа галактик, сделанные до глубокого предела и в разных участках неба [63 –

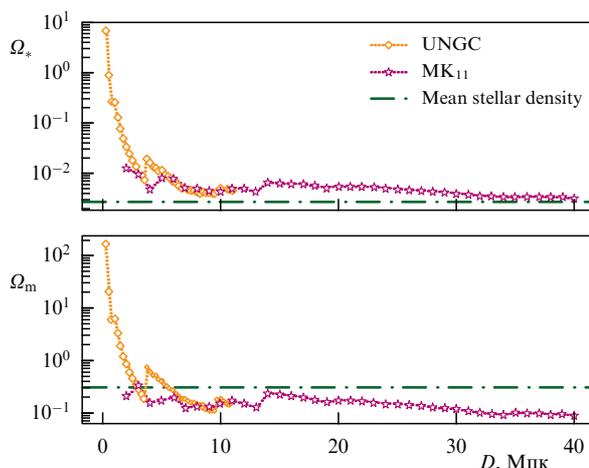


Рис. 7. Распределение средней звёздной плотности (верхняя панель) и суммарной плотности материи (нижняя панель) в зависимости от расстояния от наблюдателя по данным каталогов UNGC [41] и МК11 [32]. Глобальные значения средней звёздной плотности и суммарной плотности материи показаны горизонтальными линиями.

Таблица 3. Динамические области космической паутины

Парамеры	Вириализованные	Коллапсирующие	Расширяющиеся
Масса звёзд	54 %	20 %	26 %
Доля галактик	82 %	8 %	10 %
Относительный объём	0,1 %	5 %	95 %
Вклад в Ω_m	0,06 %	0,02 %	0,22 %

66] не показывают убедительных признаков наличия обширной местной пустоты размером $\sim (100-300)$ Мпк.

Более очевидным является предположение о том, что основное количество тёмной материи распределено в пространстве между группами и скоплениями или в виде однородного тёмного "океана", или же в виде популяции тёмных аттракторов разной массы. Гипотеза о тёмном океане выглядит менее привлекательной, поскольку нуждается в привлечении другого типа тёмной материи, не подверженной джинсовской гравитационной неустойчивости.

Существование тёмных аттракторов с массами $\sim 10^{12} - 10^{15} M_\odot$, в которых не происходил процесс звездообразования, представляется более реальным. Для их обнаружения может быть использован эффект слабого гравитационного линзирования. Анализ узора изображений галактик дальнего фона, вытянутых в поперечном направлении относительно более близкого аттрактора (гравлинзы) позволяет определить координаты и массу аттрактора. Исследование этого эффекта в площадке неба размером 72 квадратных градуса, снятой на телескопе с широким полем при субсекундных изображениях, показало [67], что среди трёхсот обнаруженных пиков гравитационного потенциала есть около 60 % пиков, не отождествляемых с видимыми скоплениями галактик. Это указывает на возможное существование популяции тёмных аттракторов с массами, типичными для богатых скоплений галактик. В настоящее время ведутся наблюдения эффекта слабого гравитационного линзирования в более глубоких обзорах, охватывающих значительную часть всего неба [14]. Анализ этих данных позволит в ближайщие несколько лет выяснить, существуют ли во Вселенной обособленные массивные сгустки тёмной материи.

Заметим, что в местном объёме обнаружено рассеянное облако галактик "Coma I", где наблюдаются необычно большие движения карликовых галактик, достигающие 800 км с^{-1} . Возмущённая кинематика этой области возможно обусловлена наличием там тёмного аттрактора с массой $\sim 2 \times 10^{14} M_\odot$, который находится от нас на расстоянии ~ 15 Мпк [68].

Крупномасштабная структура Вселенной может быть условно разделена на три динамические категории:

а) вириальные зоны групп и скоплений, где установлен баланс между кинетической и потенциальной энергией, а члены системы "забыли" о начальных условиях своего образования;

б) коллапсирующие области вокруг вириальных зон, ограниченные сферами нулевой скорости с радиусом R_0 ;

в) остальной бесконечно расширяющийся объём общего метагалактического поля.

Результаты численного моделирования крупномасштабной структуры [69, 70], а также накопленные наблюдательные данные в местном объёме [71], позволяют характеризовать эти области параметрами, которые представлены в табл. 3. Как видно из первых двух строк таблицы, около половины всех галактик и более 80 % их

звёздной массы заключено в пределах вириальных зон групп и скоплений. По-видимому, основной этап динамической эволюции крупномасштабной структуры уже завершился. При этом, в современную эпоху вириальные объёмы групп и скоплений занимают всего 0,1 % общего объёма, а в 95 % остального расширяющегося объёма сосредоточено всего около 10 % звёздной массы. Из этих цифр, сохраняющих пока значительную неопределённость, можно оценить, что соотношение тёмной и звёздной материи в общем поле за пределами вириальных и коллапсирующих зон вокруг систем галактик достигает величины $M_{DM}/M_* \sim 1000$.

6. Заключение

В приведённом кратком обзоре перечислены основные вызовы для стандартной космологической модели Λ CDM, обнаруженные при сравнении её выводов с наблюдательными данными в местном объёме Вселенной. Некоторые из них постепенно теряют свою актуальность, другие служат стимулом для совершенствования теории. В последние годы запланированы глубокие и обширные обзоры неба на крупных наземных и орбитальных телескопах в различных спектральных диапазонах: Euclid mission [72], Roman Space Telescope [73], Vera Rubin Observatory [74]. Осуществление этих проектов позволит продвинуться в понимании природы загадочных компонентов Вселенной: тёмной материи и тёмной энергии, в частности, выяснить, существуют ли в пространстве между скоплениями галактик сугубо тёмные массивные аттракторы.

Как будет выглядеть Вселенная через сотни миллиардов лет? Ответ зависит от малоизученных свойств тёмной материи и тёмной энергии. О тёмной энергии уже написано много статей. Разные взгляды на её природу изложены в обзорах [75, 76]. Прогресс в понимании этой фундаментальной физической субстанции, пронизывающей всё пространство видимой Вселенной, не достиг пока желаемого завершения. Отметим, что классическое уравнение Фридмана без Λ -члена с $\Omega_m = 1$ описывает пульсирующую модель, где циклы расширения и сжатия Вселенной могут бесконечно сменять друг друга. Добавление Λ -члена кардинально меняет ситуацию. Действуя как универсальная сила отталкивания, тёмная энергия приводит к разбеганию галактик, необратимому падению средней плотности барионной материи, росту энтропии и структурной деградации Вселенной. Однако, такая картина может быть слишком упрощённой, если пространство, заполненное чёрными дырами, имеет сложную топологию, а у доминирующей в природе тёмной энергии будут обнаружены новые неожиданные свойства.

Благодарности. Автор благодарит Д.И. Макарова, В.Е. Караченцеву, Е.И. Кайсину, О.Г. Кашибадзе и С.С. Кайсина за сотрудничество. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-12-00277.

Список литературы

1. Вихлинин А А и др. *УФН* **184** 339 (2014); Vikhlinin A A et al. *Phys. Usp.* **57** 317 (2014)
2. Gross M A K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **301** 81 (1998)
3. Klypin A et al. *Astrophys. J.* **516** 530 (1999)
4. Knollmann S R, Knebe A *Astrophys. J. Suppl.* **182** 608 (2009)
5. Moore B et al. *Astrophys. J.* **524** L19 (1999)
6. Klypin A et al. *Astrophys. J.* **522** 82 (1999)
7. Kim S Y, Peter A H G, Hargis J R *Phys. Rev. Lett.* **121** 211302 (2018)
8. Kroupa P, Theis C, Boily C M *Astron. Astrophys.* **431** 517 (2005)
9. Ibata R A et al. *Nature* **493** 62 (2013)
10. Pawlowski M S, Kroupa P, Jerjen H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **435** 1928 (2013)
11. Martínez-Delgado D et al. *Astron. Astrophys.* **652** A48 (2021)
12. Dupuy A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **516** 4576 (2022)
13. Aghanim N et al. (Planck Collab.) "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters" *Astron. Astrophys.* **641** A6 (2020)
14. Anbajagan D et al. *Open J. Astrophys.* **8** 46161 (2025) DOI:10.33232/001c.146161; arXiv:2502.17677
15. Kourkchi E et al. *Astrophys. J.* **902** 145 (2020)
16. Riess A G et al. *Astrophys. J. Lett.* **934** L7 (2022)
17. Riess A G et al. *Astron. J.* **861** 126 (2018)
18. Keenan R C, Barger A J, Cowie L L *Astrophys. J.* **775** 62 (2013)
19. Böhringer H, Chon G, Collins C A *Astron. Astrophys.* **633** A19 (2020)
20. Fukugita M, Peebles P J E *Astrophys. J.* **616** 643 (2004)
21. Spergel D N et al. *Astrophys. J. Suppl.* **170** 377 (2007)
22. Bahcall N A et al. *Astrophys. J.* **541** 1 (2000)
23. Попов С Б, Постнов К А, Пширков М С *УФН* **188** 1063 (2018); Popov S B, Postnov K A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **61** 965 (2018)
24. Macquart J-P et al. *Nature* **581** 391 (2020)
25. Yang K B, Wu Q, Wang F Y *Astrophys. J. Lett.* **940** L29 (2022)
26. Mandelbaum R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **368** 715 (2006)
27. Zwicky F *Astrophys. J.* **86** 217 (1937)
28. Засов А В и др. *УФН* **187** 3 (2017); Zasov A V et al. *Phys. Usp.* **60** 3 (2017)
29. van Uitert E et al. *Astron. Astrophys.* **534** A14 (2011)
30. Vennik J *Tartu Astron. Obs. Publ.* (73) 1 (1984)
31. Tully R B *Astrophys. J.* **321** 280 (1987)
32. Makarov D, Karachentsev I *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **412** 2498 (2011)
33. Kourkchi E, Tully R B *Astrophys. J.* **843** 16 (2017)
34. Peebles P J E *Astrophys. J.* **155** 393 (1969)
35. Дорошкевич А Г *Астрофизика* **6** 581 (1970); Doroshkevich A G *Astrophysics* **6** 320 (1970)
36. White S D M *Astrophys. J.* **286** 38 (1984)
37. Антипова А В, Макаров Д И, Бизяев Д В *Астрофиз. бюл.* **76** 306 (2021); Antipova A V, Makarov D I, Bizyaev D V *Astrophys. Bull.* **76** 248 (2021)
38. Karachentsev I D, Zozulia V D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **522** 4740 (2023)
39. Kraan-Korteweg R C, Tammann G A *Astron. Nachr.* **300** 181 (1979)
40. Karachentsev I D et al. *Astron. J.* **12** 2031 (2004)
41. Karachentsev I D, Makarov D I, Kaisina E I *Astron. J.* **145** 101 (2013)
42. Abazajian K N et al. *Astrophys. J. Suppl.* **182** 543 (2009)
43. Dey A et al. *Astron. J.* **157** 168 (2019)
44. Donley J L et al. *Astron. J.* **129** 220 (2005)
45. Haynes M P et al. *Astron. J.* **142** 170 (2011)
46. Zhang C-P et al. *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **67** 219511 (2024)
47. Huchtmeier W K et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **141** 469 (2000)
48. Huchtmeier W K, Karachentsev I D, Karachentseva V E *Astron. Astrophys.* **377** 801 (2001)
49. Huchtmeier W K, Karachentsev I D, Karachentseva V E *Astron. Astrophys.* **401** 483 (2003)
50. Karachentsev I D, Chazov M I, Kaisin S S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **537** L21 (2025)
51. Кайсина Е И и др. *Астрофиз. бюл.* **67** (1) 120 (2012); Kaisina E I et al. *Astrophys. Bull.* **67** 115 (2012)
52. Karachentsev I D, Kudrya Yu N *Astron. J.* **148** 50 (2014)
53. Dolgosheeva P, Makarov D, Libeskind N *Astron. Astrophys.* **698** L8 (2025)
54. Shamir L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **516** 2281 (2022)
55. Karachentsev I D et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **393** 1265 (2009)
56. Kashibadze O G, Karachentsev I D *Astron. Astrophys.* **609** A11 (2018)
57. Karachentsev I D et al. *Astrophys. J.* **782** 4 (2014)
58. Karachentsev I D et al. *Astrophys. J.* **858** 62 (2018)
59. Makarov D et al. *Astron. Astrophys.* **698** A178 (2025)
60. Driver S P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427** 3244 (2012)
61. Rines K, Diaferio A *Astron. J.* **132** 1275 (2006)
62. Masaki S, Fukugita M, Yoshida N *Astrophys. J.* **746** 38 (2012)
63. Djorgovski S et al. *Astrophys. J. Lett.* **438** L13 (1995)
64. Bershadsky M A, Lowenthal J D, Koo D C *Astrophys. J.* **505** 50 (1998)
65. Totani T et al. *Astrophys. J.* **559** 592 (2001)
66. Huang J-S et al. *Astron. Astrophys.* **368** 787 (2001)
67. Shan H et al. *Astrophys. J.* **748** 56 (2012)
68. Karachentsev I D, Nasonova O G, Courtois H M *Astrophys. J.* **743** 123 (2011)
69. Cautun M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** 2923 (2014)
70. Nuza S E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **445** 988 (2014)
71. Караченцев И Д *Астрофиз. бюл.* **67** (2) 129 (2012); Karachentsev I D *Astrophys. Bull.* **67** 123 (2012)
72. Enia A et al. (Euclid Collab.) *Astron. Astrophys.* **691** A175 (2024)
73. Wang K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **546** staf2253 (2026) DOI:10.1093/mnras/staf2253; arXiv:2501.16139
74. Rubin D et al., arXiv:2506.04327; *Astrophys. J.*, submitted
75. Чернин А Д *УФН* **178** 267 (2008); Chernin A D *Phys. Usp.* **51** 253 (2008)
76. Лукаш В Н, Рубаков В А *УФН* **178** 301 (2008); Lukash V N, Rubakov V A *Phys. Usp.* **51** 283 (2008)

Problems of cosmology on small scales of the Universe

I.D. Karachentsev

Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences,
Nizhnii Arkhyz, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation
E-mail: idkarach@gmail.com

Six challenges for the standard cosmological model Λ CDM are listed, which arise when comparing theoretical predictions with observational data on scales of ~ 1 Mpc. Different parameters of luminous and dwarf galaxies in the local sphere with a radius of 12 Mpc are presented. The average densities of stellar matter and dark matter are reproduced depending on a distance in the Local volume. Observational data on distribution of angular momentum of nearby galaxies are considered. A comparison of the dark matter mass estimates for systems of galaxies based on motions of their internal (virialized) members and neighboring galaxies is given. The reasons for the low derived value of the matter density, $\Omega_m = 0.08 \pm 0.02$, in the Local Universe with respect to the global value $\Omega_m = 0.30 \pm 0.02$ are discussed.

Keywords: galaxies, dark matter, systems of galaxies

PACS numbers: **95.35.+d**, **95.36.+x**, **98.65.-r**

Bibliography — 76 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (3) 239–247 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039964>

Received 2 April 2025

Physics – Uspekhi **69** (3) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.03.039964>