

ПОТЕРЯННАЯ ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В МЕСТНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

© 2012 И. Д. Караченцев

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 февраля 2012 г.; принята в печать 20 февраля 2012 г.

На основе выборки 11 тысяч галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с рассмотрены особенности распределения светлой (звездной) и темной материи в этом объеме $\Omega_{m,loc} = 0.08 \pm 0.02$ оказывается существенно меньше глобальной космической плотности $\Omega_{m,glob} = 0.28 \pm 0.03$. Обсуждаются три возможных объяснения этого парадокса: 1) группы и скопления окружены темными ореолами, их основная масса находится за пределами вириального радиуса; 2) местный объем Вселенной не является репрезентативным, будучи расположенным внутри гигантского войда; 3) основная доля материи во Вселенной не связана со скоплениями и группами, а распределена между ними в виде массивных темных сгустков. Приведен ряд аргументов в пользу последнего предположения. К двум известным нестыковкам космологических моделей с наблюдательными данными: проблеме потерянных спутников у нормальных галактик и проблеме потерянных барионов, очевидно, прибавляется еще одна — проблема потерянной темной материи.

Ключевые слова: космология: темная материя — галактики: эволюция — галактики: образование

1. ВВЕДЕНИЕ

Проверка различных космологических моделей обычно осуществляется по наблюдениям далеких объектов с красными смещениями $z = v/c \sim 1$ и свойствам фоновых излучений, образовавшихся в эпоху $z \sim 10\,000$. Однако структура и кинематика близких ($z \simeq 0$) объемов Вселенной также является источником важной космологической информации. В Местной вселенной, ограниченной условно радиусом $D = 10$ Мпк, обнаружено большое количество карликовых галактик, скорости и расстояния которых трассируют Хаббловский поток с беспрецедентно высокой подробностью по сравнению с удаленными объектами. Исследование звездного населения близких галактик позволяет восстановить историю звездообразования в них с разрешением $\Delta T \sim 10^8 - 10^9$ лет. Фактически, за последние 10–15 лет изучение Местной вселенной формируется в самостоятельную и плодотворную ветвь наблюдательной космологии, что неоднократно подчеркивалось Пиблсом [1–3].

До недавнего времени серьезным препятствием в развитии наблюдательной космологии Местной вселенной была скудность данных о расстояниях даже самых близких галактик. Использование уникальных возможностей космического телескопа “Хаббл” в сочетании с новым методом определения расстояний до галактик по светимости верхушки ветви красных гигантов [4] позволило вы-

полнить массовые измерения расстояний до более чем 250 соседних галактик с точностью (5–10)%. Сводка данных о расстояниях, лучевых скоростях и других параметрах галактик Местного объема радиусом 10 Мпк была представлена в “Catalog of Neighboring Galaxies” (CNG; [5]), который содержит 450 объектов. В этом объеме, где видны карликовые галактики вплоть до светимости в 10 000 раз меньше светимости Млечного Пути, имеется более дюжины групп, похожих на нашу Местную группу по размерам и населенности. Детальная картина движений галактик в этих группах и вокруг них впервые выявила неожиданные особенности Хаббловского потока на мелких (1–3 Мпк) масштабах. Оказалось, что Хаббловские диаграммы “скорость–расстояние” вокруг Местной группы и других соседних групп характеризуются малой дисперсией пекулярных скоростей $V_{pec} \sim 30$ км/с. При таких малых хаотичных движениях и малых ошибках измерения расстояний становится заметным искривление “холодного” Хаббловского потока, вызванное гравитационным торможением окружающих группу галактик суммарной массой самой группы. Пример Хаббловского потока вокруг нашей группы показан на Рис. 1. На этой диаграмме видна область вириальных движений ± 200 км/с у спутников Млечного Пути и М 31 (Андромеды) и область общего Хаббловского расширения. Они отделены друг от друга “сферой нулевой скоро-

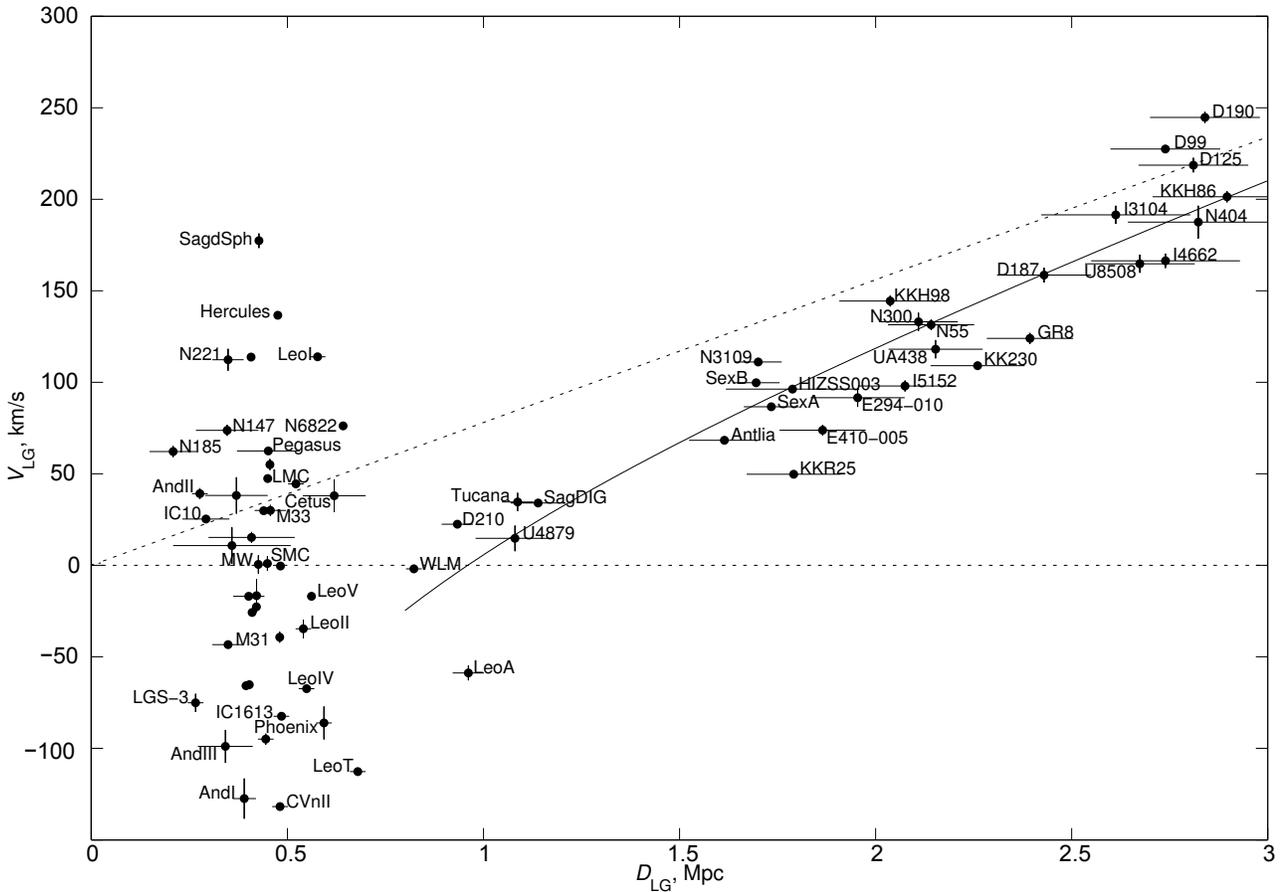


Рис. 1. Хаббловская диаграмма для галактик в окрестности Местной группы. Расстояния и скорости галактик даны относительно центроида Местной группы, ошибки расстояний и скоростей показаны отрезками. Пунктирная прямая соответствует неискаженному Хаббловскому потоку с параметром $H_0 = 80$ км/с/Мпк. Искривленная сплошная линия отражает тормозящее влияние на поток Местной группы с массой $1.9 \times 10^{12} M_\odot$

сти” радиусом $R_0 = (0.96 \pm 0.03)$ Мпк [6]. Примечательно, что радиус R_0 определяет собой полную массу группы, $M_T = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_\odot$, и эта величина находится в замечательном согласии с вириальными оценками массы $M(\text{MW} + \text{M31}) = (1.6\text{--}2.2) \times 10^{12} M_\odot$. Следует подчеркнуть, что приведенная величина M_T получена в предположении стандартной космологической модели ΛCDM с параметром $\Omega_\lambda = 0.73$. При отсутствии же λ -члена ($\Omega_\lambda = 0$) оценка полной массы по внешним движениям составляла бы всего $1.2 \times 10^{12} M_\odot$, т.е. меньше вириальных оценок. Аналогичный вывод можно сделать по движениям галактик вокруг соседних групп, где доминируют галактики М 81 и Centaurus A [7]. Следовательно, наблюдаемые особенности местного Хаббловского потока дают (при достигнутой недавно точности измерения расстояний) прямое и независимое свидетельство наличия во Вселенной космической компоненты — темной

энергии, обнаруженной по наблюдениям далеких сверхновых.

Недавние массовые обзоры неба как в оптическом диапазоне, так и на длине волны радиолинии 21 см привели к обнаружению новых близких карликовых галактик. Обновленная версия каталога CNG насчитывает сейчас около 800 объектов и готовится к печати [8].

2. ОТ МЕСТНОГО ОБЪЕМА, $D < 10$ МПК, К МЕСТНОЙ ВСЕЛЕННОЙ, $D < 50$ МПК

Высокая плотность наблюдательных данных о галактиках в Местном объеме позволяет иметь достаточно полное представление о пространственном распределении светящейся и темной материи в нем. Однако, на масштабе $D \sim 10$ Мпк относительные флуктуации плотности светимости составляют $\Delta\rho_L/\bar{\rho}_L \sim 1$. Поэтому Местный объем

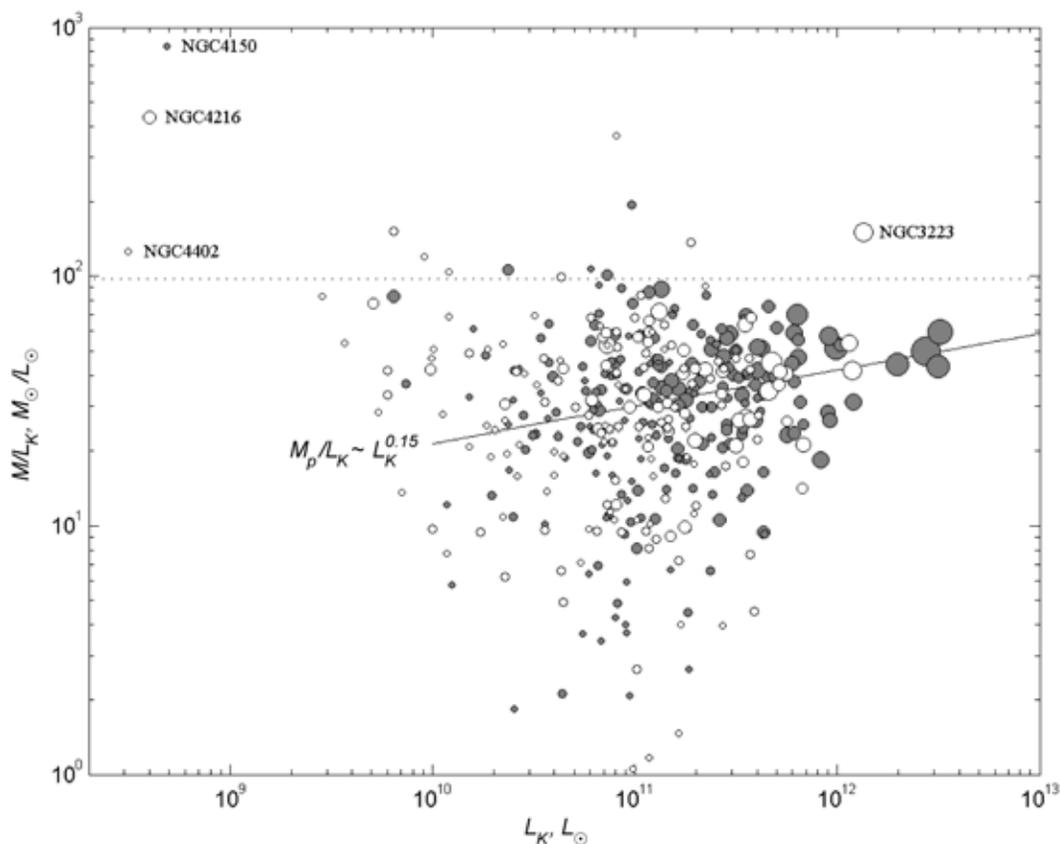


Рис. 2. Распределение групп галактик с числом членов 4 и более по интегральной светимости в K -полосе и отношению вириальной массы к светимости. Размер кружка отражает населенность системы. Темными кружками выделены группы и скопления, где самая яркая галактика имеет ранний морфологический тип (E, S0, Sa).

не может считаться репрезентативным в смысле его кинематики и динамики. Чтобы достичь лучшей представительности наблюдательной выборки, Макаров и Караченцев [9] рассмотрели в 100 раз больший объем вокруг нашей Галактики. Этот объем включает в себя все известные галактики с лучевыми скоростями $V_{LG} < 3500$ км/с относительно центра Местной группы за вычетом зоны сильного поглощения на галактических широтах $|b| < 15^\circ$. Данный объем диаметром 96 Мпк (при $H_0 = 73$ км/с/Мпк) содержит около 11 тысяч галактик. Большинство из них принадлежит Местному сверхскоплению, однако в этот объем (“Местную вселенную”) попадают отроги и других соседних сверхскоплений. Основываясь на данных Sloan Digital Sky Survey [10], Папай и Запуди [11] оценили, что вариации суммарной светимости галактик в кубе с ребром 100 Мпк составляют около 10%. Следовательно, рассматриваемый объем Местной вселенной вполне удовлетворяет условию репрезентативности выборки.

Основные усилия в нашей программе были

направлены на систематизацию данных о лучевых скоростях, видимых величинах и морфологических типах галактик. При этом были предприняты поиски новых карликовых галактик, оптические отождествления HI-радиоисточников из HIPASS [12], ALFALFA [13] и других “слепых” обзоров неба. Особое внимание было уделено проблеме “Астро-спама”: нередким случаем путаницы с отождествлением HI-источников, наложению звезды на изображение галактики, когда близкая к нулю скорость звезды приписывалась далекой галактике, случаям ложной кратности галактики, когда два или несколько сгущений в ней принимались за динамически разные объекты и т.д.

К обновленной и “очищенной” выборке 10 900 галактик Макаров и Караченцев [9] применили новый алгоритм для выделения групп различной кратности n . В отличие от простого алгоритма перколяции “friends of friends” (FoF) [14], использованный ими критерий группирования принимал во внимание индивидуальные различия галактик по светимостям. На первичном этапе объединения

двух галактик в виртуальную пару предполагалось, что эта пара должна обладать отрицательной полной энергией, а ее компоненты должны быть причинно связанными (“время пересечения” пары меньше возраста Вселенной). Как показал последующий анализ, использованный в [9] алгоритм выделяет группы с примерно одинаковыми характеристиками как в близких, так и далеких объемах Местной вселенной. (Заметим, что этим свойством не обладает упомянутый критерий FoF). В результате были созданы каталоги: 509 пар [15], 168 тройных систем [16], 395 групп с населением $n > 3$ [9] и 520 особо изолированных галактик [17].

Не вдаваясь в детали, отметим, что выделенные этим алгоритмом пары, группы и скопления в Местной вселенной хорошо соответствуют известным ранее системам. В ряде случаев, однако, новый критерий разбивал известные агрегаты галактик на подсистемы, которые, очевидно, ассоциированы друг с другом, но не достигли пока стадии слияния и релаксации. Игнорирование субструктуры таких образований заметно искажает (завышает) оценку их вириальной массы.

Распределение групп галактик с населением $n > 3$ по величине интегральной светимости в K -полосе и отношению вириальной (проекционной) массы к светимости показано на Рис. 2 [9]. Группы, где главная галактика относится к раннему ($T < 3$) или же позднему типам, изображены, соответственно, заштрихованными и пустыми кружками, размеры кружков пропорциональны населенности группы. Пунктирная горизонтальная прямая на рисунке при $M/L_K = 97 M_\odot/L_\odot$ соответствует глобальной средней плотности материи $\Omega_m = 0.28$.

Значительный разброс систем галактик на этой диаграмме обусловлен, в основном, действием факторов проекции. Несмотря на большие вариации, среднее отношение вириальной массы к светимости растет с увеличением населенности системы, ее светимости и коррелирует с морфологическим типом ярчайшего члена. Все эти особенности хорошо известны по другим каталогам групп и скоплений галактик.

Располагая данными о светимостях галактик в Местной вселенной, Макаров и Караченцев [9] проследили изменение средней плотности светимости в K -полосе от радиуса сферы, внутри которой проводится усреднение. Зависимость средней плотности $j(L_K)$ от расстояния D представлена на Рис. 3 с шагом в 1 Мпк. Как видим, основной вклад в суммарную светимость на всех масштабах дают члены групп, триплетов и пар (кружки). С учетом вклада некластеризованных галактик суммарная плотность светимости (ступенчатая линия) плавно приближается к асимптотическому значению, четыре оценки которого по

данным 2MASS обзора [18–21] отмечены горизонтальными прямыми. На всех масштабах локальная плотность светимости превышает глобальное значение. Широкий горб на расстояниях 15–25 Мпк обусловлен вкладом скоплений Virgo и Fornax. Поскольку в K -полосе среднее отношение звездной массы к светимости галактик составляет $M_*/L_K \simeq 1 M_\odot/L_\odot$ [19], то Рис. 3 показывает избыток плотности звездной массы над ее глобальным значением на всех масштабах Местной вселенной до границы выборки ($D \simeq 45$ Мпк).

Суммируя вириальные массы групп и скоплений, Макаров и Караченцев [9] построили распределение средней плотности темной материи в сферах различного радиуса вокруг нашей Галактики. Результаты представлены на Рис. 4. Вклад групп с населением $n > 3$ показан квадратами, вклад пар и триплетов — треугольниками, а ступенчатая линия изображает ход суммарной средней плотности с учетом некластеризованных галактик “поля”, относительный вклад которых по численности составляет 46%, а по светимости — 18% (среди галактик поля преобладает карликовое население). Отношение массы к светимости для некластеризованных галактик было принято таким же, как для пар и тройных систем, приблизительно $20 M_\odot/L_\odot$, что согласуется с оценками M/L_K по эффекту слабого гравитационного линзирования [22, 23].

Как следует из сравнения Рис. 4 и 3, ход средней плотности темной материи с расстоянием D приблизительно повторяет ход средней плотности звездной массы. Однако, почти во всех бинах плотность $\Omega_m = \rho_m/\rho_c$ лежит ниже глобального значения $\Omega_m = 0.28$ и в больших объемах стремится к асимптотическому значению $\Omega_{m,loc} = 0.08 \pm 0.02$. Погрешность этой величины определяется, в основном, ошибками измерения оптических лучевых скоростей галактик.

3. ПРОБЛЕМА ПОТЕРЯННОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Тот наблюдательный факт, что вириальные массы групп и скоплений галактик не в состоянии обеспечить глобальное значение плотности $\Omega_m = 0.28$, был известен в литературе достаточно давно. Так, Талли [24] использовал данные о 2367 галактиках с лучевыми скоростями менее 3000 км/с для группирования галактик методом “иерархического дерева”. Использованный метод учитывал различия галактик по светимостям и объединял в группы около 2/3 всех рассматриваемых галактик. Суммарный вклад в Ω_m вириальных масс групп по Талли [24] составляет как раз $\Omega_{m,loc} = 0.08$. Венник [25] и Магтесян [26] применили несколько другие алгоритмы

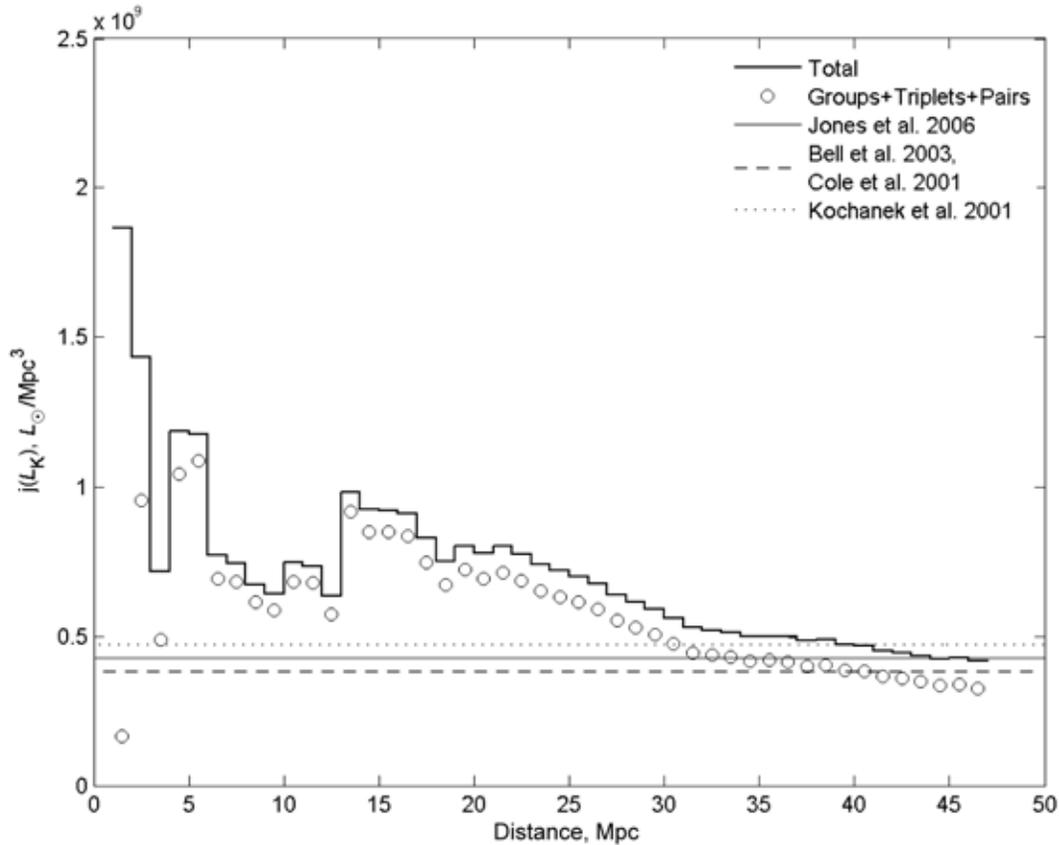


Рис. 3. Средняя плотность K -светимости Местной вселенной в сферах различного радиуса (ступенчатая линия). Кругками отмечен вклад галактик в группах, триплетгах и парах. Четыре горизонтальные прямые фиксируют глобальное значение плотности светимости по данным разных авторов.

для кластеризации галактик в Местной вселенной и получили, соответственно, оценки $\Omega_{m,loc} \simeq 0.08$ и $\Omega_{m,loc} \simeq 0.05$. Оба автора принимали во внимание различие в индивидуальных светимостях галактик.

Крук и др. [27] использовали метод перколяции (FoF) для выделения групп галактик с видимыми величинами $K < 11.25$ в 2MASS каталоге. На среднем контрасте плотности $\Delta\rho/\rho \sim 80$ было кластеризовано 53% всех галактик. Общий вклад их в Ω_m составил 0.10–0.13 в зависимости от способа оценки вириальной массы. Различия в светимости галактик здесь игнорировались. Пытаясь “дотянуться” до глобального значения $\Omega_m = 0.28$, Крук и др. [27] составили другой вариант каталога групп с более мягким условием среднего контраста плотности $\Delta\rho/\rho \sim 12$. При этом подходе в группы и скопления вошло 73% галактик, а вклад систем галактик в Ω_m составил 0.14–0.23. Однако, большинство таких слабоконтрастных агрегатов не являются вириализованными системами, поскольку их время пересечения сопоставимо с возрастом Вселенной.

Бакалл и др. [28] рассматривали вклад в величину Ω_m систем галактик разного масштаба от пар до сверхскоплений. Предполагая, что основной вклад в Ω_m вносят богатые скопления, авторы получили значение $\Omega_m = 0.16 \pm 0.05$. Однако, несмотря на возрастание среднего отношения вириальной массы к светимости от пар и групп к скоплениям и сверхскоплениям, основной вклад в Ω_m все же вносят небольшие системы типа Местной группы. Только 2% светимости в K -полосе приходится на скопления богаче Virgo [29], а относительная доля вириальной массы в них не превышает 10–15%. Заметим, что в рассматриваемом нами объеме ($V_{LG} < 3500$ км/с) относительный вклад скопления Virgo в суммарную массу Местной вселенной составляет около 15%, т.е. не является определяющим на фоне менее населенных систем.

Итак, наиболее рафинированные способы оценки вириальной массы в системах разного масштаба и населенности приводят к значению локальной ($D \leq 50$ Мпк) средней плотности материи

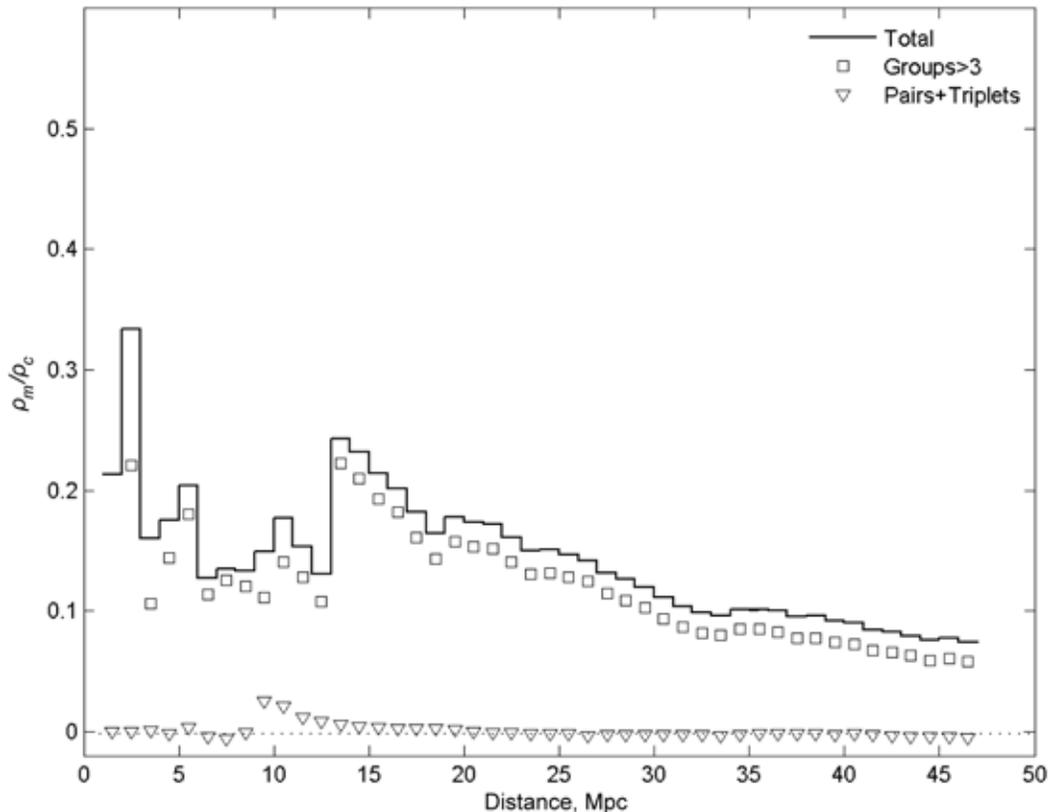


Рис. 4. Средняя плотность материи в сферах различного радиуса (ступенчатая линия). Квадратами и треугольниками отмечен вклад пар, триплетов и групп галактик.

$\Omega_{m,loc} = 0.08 \pm 0.02$, что в 3–4 раза ниже глобального значения $\Omega_{m,glob} = 0.28 \pm 0.03$ в стандартной Λ CDM космологии [30, 31]. В литературе высказывались различные возможные объяснения этого противоречия. Перечислим три основных из них.

1) Темная материя в системах галактик простирается далеко за пределы их вириального радиуса, так что полная масса группы/скопления в 3–4 раза больше вириальной оценки.

2) Диаметр рассматриваемой области Местной вселенной, 90 Мпк, не соответствует истинному масштабу “ячейки однородности”; наша Галактика может находиться внутри гигантского войда размером порядка 100–500 Мпк, в котором средняя плотность материи в 3–4 раза ниже глобальной.

3) Основная часть темной материи во Вселенной, около 2/3 ее, не ассоциируется с группами и скоплениями галактик, а распределена в пространстве между ними в виде или массивных темных сгустков или в виде гладкого “океана”.

Обсудим каждое из этих предположений подробнее.

3.1. Темные ореолы вокруг групп и скоплений

Тавио и др. [32] и Масаки и др. [33] рассмотрели интегральное распределение массы темного гало в зависимости от расстояния, выраженного в единицах вириального радиуса. В предположении стандартного NFW-профиля гало около 50% полной массы располагается по их оценкам за пределами вириального радиуса. Согласно Райнес и Диаферио [34], в зонах коллапса вокруг скоплений галактик между радиусом R_{VIR} и $R_0 \simeq 3.7R_{VIR}$ может находиться масса, равная $(1.19 \pm 0.18)M_{VIR}$. С другой стороны, моделирование орбит пробных частиц внутри массивного гало, выполненное в [35], привело этих авторов к заключению, что отношение полной массы гало к вириальной массе составляет в среднем всего $M_T/M_{VIR} = 1.25$. Последний результат представляется нам более реалистичным. Как мы отмечали во введении, оценки полной массы Местной группы и других близких групп внутри радиуса R_0 хорошо согласуется с их вириальными массами. Аналогичное соответствие (с погрешностью 30–50%) имеет место также для ближайших

скоплений Virgo и Fornax [36, 37]. Во всяком случае, предположение о наличии между R_{VIR} и R_0 массы в 2–3 раза больше M_{VIR} явно противоречит имеющимся наблюдательным данным.

3.2. Протяженная местная пустота

Идея о нахождении нашей Галактики вблизи центра обширной космической пустоты [38, 39] неоднократно привлекалась как альтернатива модели ускоренного расширения Вселенной, построенной по наблюдениям вспышек далеких сверхновых. Однако, как свидетельствуют данные Рис. 3 и 4, местоположение нашей Галактики характеризуется не дефицитом, а избытком локальной плотности на всех масштабах вплоть до 45 Мпк. Можно предположить, что местный избыток плотности возвышается над протяженным окружающим войдом наподобие центральной горки лунного кратера. Помимо своей некоторой искусственности, такое предположение вступает в противоречие с наблюдательными данными. Подсчеты числа галактик в K -полосе, выполненные до глубокого предела в разных направлениях [40–43] не показывают каких-либо признаков существования обширной местной пустоты размером порядка 100–500 Мпк.

3.3. Популяция темных аттракторов

По очевидным причинам предположение о существовании между группами и скоплениями большого числа невидимых темных гало разной массы с трудом поддается наблюдательной проверке. Тем не менее, уже имеются некоторые свидетельства в пользу такой необычной картины. Караченцев и др. [44] обратили внимание на наличие среди изолированных галактик каталога KIG [45] некоторой доли объектов с сильно искаженной структурой. Примером является галактика KIG 293 = UGC 4722 с протяженным изогнутым хвостом (Рис. 5). Как принято считать, подобные структуры образуются при тесном взаимодействии галактик приблизительно одинаковой массы. Однако, в широкой окрестности UGC 4722 не видно ни одной соседки, которая была бы способна произвести наблюдаемые приливные возмущения. В качестве вероятного объяснения этого явления можно предположить здесь случай взаимодействия обычной галактики с невидимым темным объектом, чья масса составляет порядка $10^9 M_{\odot}$. Недавно аналогичная популяция искаженных изолированных галактик была обнаружена и в каталоге “Local Orphan Galaxy” [17]. В обоих выборках, KIG и LOG, относительное число таких объектов невелико, около 4%.

Исследуя структуры гравитационных линз Эйнштейна с помощью космического телескопа Хаббла, Вегетти и др. [46, 47] обнаружили на

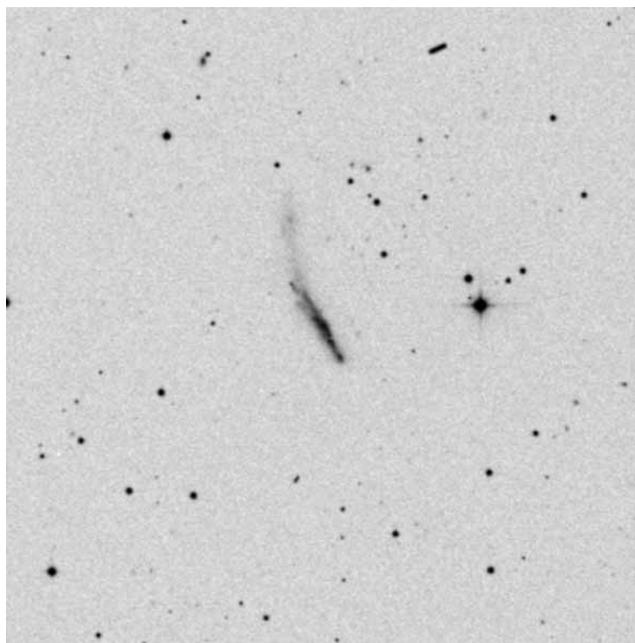


Рис. 5. Изолированная галактика UGC 4722 с признаками сильно возмущенной структуры. Размер снимка — $10' \times 10'$. Жирный отрезок в верхней правой части — след астероида.

космологических расстояниях $z = 0.22$ и $z = 0.88$ два случая, свидетельствующих о наличии невидимых спутников возле линз-галактик. По оценкам авторов, массы этих темных спутников составляют 10^8 – $10^9 M_{\odot}$, а нижний предел отношения массы к светимости превышает $120 M_{\odot}/L_{\odot}$. Определить космическое обилие таких темных субструктур представляется пока затруднительным.

Шан и др. [48] исследовали эффекты слабого гравитационного линзирования далеких галактик в площадке размером $72 \square^{\circ}$, снятой на CFHT-телескопе с субсекундными изображениями. На карте пиков гравитационного потенциала, реконструированной по этим данным, авторы обнаружили 301 пик, из которых 126 были отождествлены с оптическими или рентгеновскими скоплениями галактик. Около 60% пиков остались неотожествленными, что, возможно, указывает на существование в эпоху $z \sim 0.4$ популяции темных аттракторов с массами, типичными для богатых скоплений галактик. Аналогичные наблюдательные аргументы в пользу существования массивных темных сгустков приводились ранее Натараемом и Спрингелом [49] и Джи и др. [50] по эффектам слабого линзирования.

Среди галактик в Местной вселенной с измеренными расстояниями и лучевыми скоростями встречаются галактики, имеющие большие отрицательные пекулярные скорости. Анализируя эти

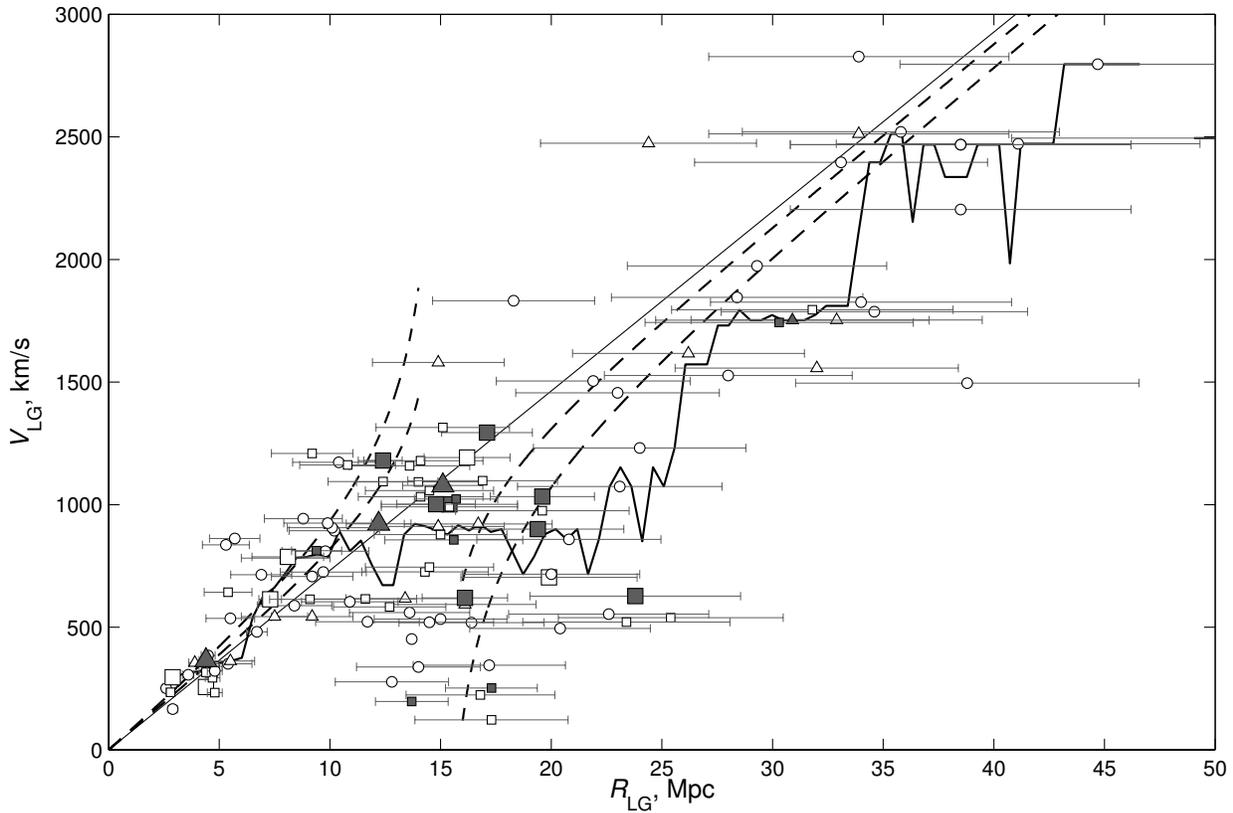


Рис. 6. Соотношение скорость–расстояние для 122 галактик в области Coma I. Прямая линия соответствует невозмущенному Хаббловскому потоку с параметром $H_0 = 73$ км/с/Мпк. Квадраты — члены групп, треугольники — члены триплетов и пар, а кружки — одиночные галактики. Галактики с балджами (E, S0, Sa) показаны темным. Горизонтальные отрезки соответствуют ошибкам измерения расстояний. Ломаная линия отражает поведение скользящей медианы с окном 2 Мпк. Две прерывистые линии соответствуют картине падения галактик на точечный аттрактор с массой $0.5 \times 10^{14} M_\odot$ и $2.0 \times 10^{14} M_\odot$, расположенный на расстоянии 15 Мпк, для случая, когда луч зрения проходит через центр аттрактора.

случаи, Караченцев и др. [51] обратили внимание на то, что половина таких быстролетающих галактик сконцентрирована в малой области неба ($RA \simeq 12^h 20^m$, $Dec \simeq +30^\circ$), называемой “облаком Coma I”. Данная область содержит несколько рассеянных групп с расстояниями от 4 до 30 Мпк. Хаббловская диаграмма для галактик в области Coma I (Рис. 6) обнаруживает систематические отклонения от линейной зависимости $V = H_0 R$, характерные для натекания вещества на аттрактор. Эффект натекания согласуется с наблюдательными данными при массе аттрактора порядка $2 \times 10^{14} M_\odot$ на расстоянии приблизительно 15 Мпк от нас. Суммарная светимость галактик в зоне предполагаемого аттрактора составляет $L_K = 1.0 \times 10^{12} L_\odot$, что дает отношение массы к светимости $M/L_K \sim 200 M_\odot/L_\odot$. Такое отношение M/L_K в 4 раза выше, чем у богатых скоплений типа Coma. Возможно, что мы имеем здесь первый случай близкого темного аттрактора с массой, характерной для скоплений галактик.

Необходимо подчеркнуть, что средняя локальная плотность материи Ω_m может быть определена не только путем суммирования вириальных масс систем галактик, но также из анализа поля пекулярных скоростей на достаточно больших масштабах. Абате и Эрдогду [52] исследовали поле пекулярных скоростей галактик из выборки SF1++ [53] и получили на масштабе около 6000 км/с оценку $\Omega_m = 0.09-0.23$. Эта величина должна включать в себя, очевидно, и темную материю между группами и скоплениями, если таковая существует. Аналогичный анализ выборки SF1++ был проведен в [54] с привлечением данных о красных смещениях галактик из 2MASS обзора [55]. Авторы пришли к заключению, что местное поле пекулярных скоростей хорошо соответствует местному рельефу гравитационного потенциала (распределение темной материи следует распределению галактик), однако оговариваются, что гладкая компонента темной материи не может быть протестирована этим методом. Еще одна локальная оценка $\Omega_m = 0.20 \pm 0.07$ на

Основные параметры трех динамических областей крупномасштабной структуры

	Вириализованные зоны	Коллапсирующие области	Остальной расширяющий фон
Относительное число галактик	54 %	~20 %	~26 %
Относительное количество звездной массы	82 %	~8 %	~10 %
Относительная доля занимаемого объема	0.1 %	5 %	95 %
Вклад в величину Ω_m	0.06	0.02	0.20
Среднее отношение темной массы к звездной, M_{DM}/M_*	~26	~87	~690

масштабе порядка 100 Мпк получена в работе [56] по поведению диполя сгущивания 2MASS галактик относительно направления движения Местной группы в системе координат космического микроволнового излучения.

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ

По геометрическим признакам в крупномасштабной структуре Вселенной обычно выделяют следующие элементы: большие и малые космические пустоты (войды), филаменты и стенки на границах пустот, скопления галактик в узлах на пересечении волокон и стенок. По мере расширения Вселенной, возмущения плотности растут и элементы крупномасштабной структуры становятся все более контрастными, что наглядно иллюстрируется многочисленными N-body моделированиями.

С динамической точки зрения элементы крупномасштабной структуры целесообразно разделять на три категории:

а) вириализованные зоны групп и скоплений, где установился баланс между кинетической и потенциальной энергией, $2T + U = 0$, а галактики “забыли” о начальных условиях своего образования;

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

в) остальные, бесконечно расширяющиеся области “общего поля”, которые включают в себя население войдов и диффузных филаментов.

Пример такого разделения показан на Рис. 7. представляющем в экваториальных координатах комплекс близких групп в созвездиях Fornax–Eridanus [37]. На нем вириализованные области скопления Fornax (расположено внизу от центра рисунка) и соседствующих друг с другом групп в Eridanus изображены темными кругами. Более светлые круги соответствуют радиусам R_0 вокруг групп. Как видно из рисунка, сферы радиуса R_0

взаимно пересекаются, образуя поверхность, под которой группы Eridanus и скопление Fornax со временем сольются в единый динамический агрегат.

Основываясь на результатах кластеризации галактик в Местной вселенной [9] и других наблюдательных данных о близких системах, можно выделить ряд важных параметров, характеризующих динамический статус трех компонент крупномасштабной структуры в современную эпоху. Эти параметры собраны в таблице. Некоторые из них содержат пока значительную неопределенность.

Как следует из первых двух строк таблицы, более половины всех галактик и более 4/5 их звездной массы уже находится внутри вириальных зон. Последующее натекание галактик из окружающих коллапсирующих областей принесет сравнительно небольшую добавку к наличным вириальным массам. В этом смысле можно сказать, что основной этап динамической эволюции крупномасштабной структуры уже завершился.

Третья строка таблицы показывает, что вириализованные объемы групп и скоплений занимают всего 0.1 % от общего объема, а на зоны коллапса вокруг них приходится около 5 % объема Вселенной. В остальных 95 % объема, относящегося к “общему полю”, сосредоточено всего около 10 % звездной массы. Таким образом, контраст средней плотности звездной массы между вириализованными объемами и общим полем достигает около 7000.

Предпоследняя строка таблицы фиксирует, какой вклад в величину Ω_m вносят три разные динамические зоны, считая, что в сумме они дают стандартное значение $\Omega_{m, glob} = 0.28$. Интересно отметить, что при этом контраст средних плотностей темной материи между вириализованными зонами и общим полем составляет примерно 280.

Наконец, в последней строке представлено характерное отношение массы темной материи к массе светящейся (звездной) в трех обозначенных зонах. Как и ранее, звездная масса галактики M_*

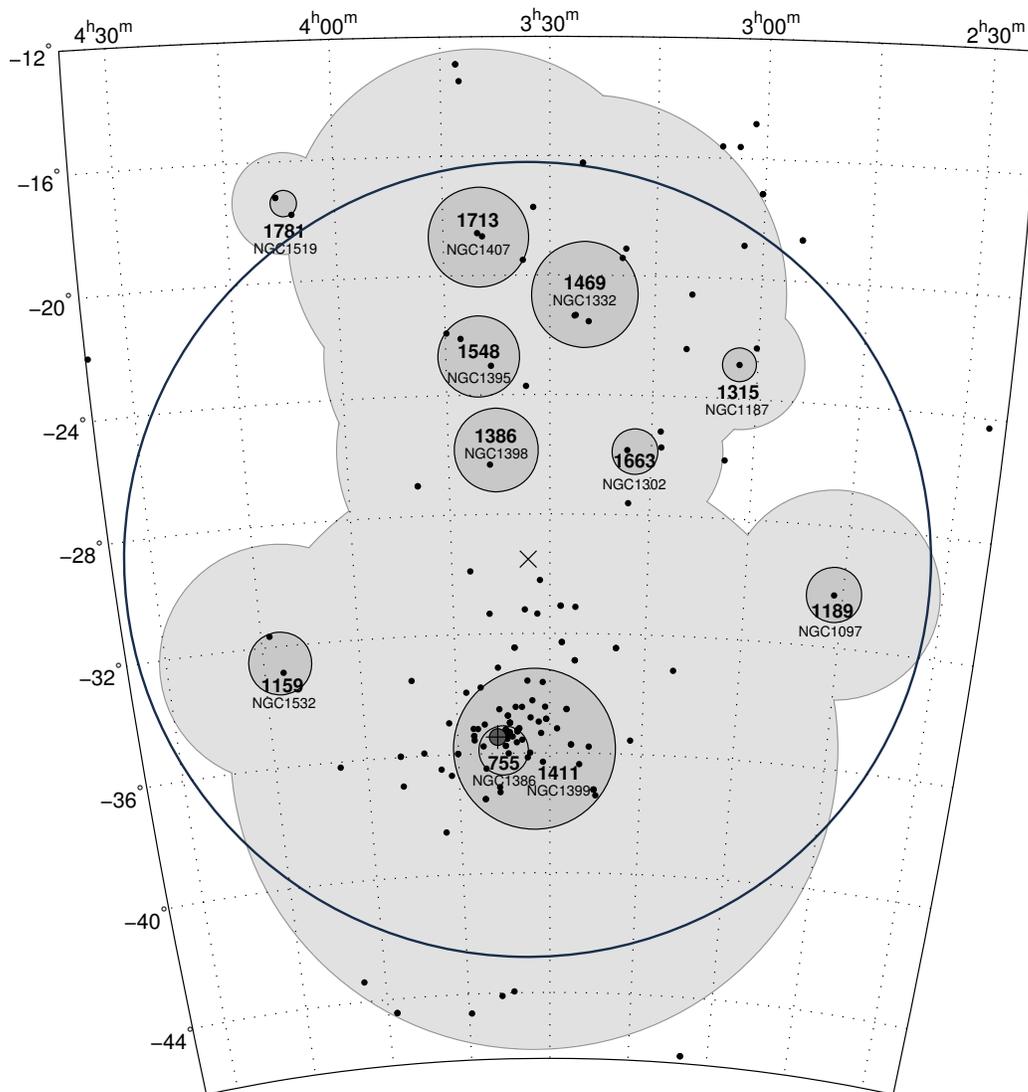


Рис. 7. Распределение групп галактик в Eridanus и в скоплении Fornax в экваториальных координатах. Темные круги соответствуют вириальным радиусам групп и скопления, более светлые круги отвечают зонам коллапса вокруг них. NGC—номерами обозначены ярчайшие члены каждой группы, а жирными цифрами — средние лучевые скорости групп в км/с.

выражалась через ее светимость в K -полосе, полагая $M_*/L_K \simeq 1.0 M_\odot/L_\odot$ [19].

Здесь необходимо отметить важное обстоятельство. Используемый в [9] алгоритм выделения групп предполагал, что у всех галактик, независимо от их светимости, типа и плотности окружения, отношение полной массы гало к массе звездной компоненты имеет одно и то же значение $M_T/M_* = 6$. Эта безразмерная величина является единственным более-менее произвольным параметром применявшегося алгоритма (в отличие от алгоритма перколяции FoF, где подвергаются выбору два произвольных параметра: максимальная разность лучевых скоростей и максимальное проекционное расстояние у компонентов виртуальной пары).

Согласно результатам моделирования “Bolshoi” в Λ CDM модели [57], отношение $M_T/M_* = 6$ должно приблизительно выполняться (в пределах $\pm 1\sigma$ полосы) для всех галактик со звездными массами в диапазоне $\log(M_*/M_\odot) = [8.5-11.0]$, что косвенно оправдывает сделанный выбор величины параметра кластеризации M_T/M_* .

Таким образом, с использованием исходного значения $M_T/M_* = 6$ для индивидуальных гало галактик, мы получаем для вириализованных областей групп и скоплений среднее отношение $M_T/M_* \simeq 26$ (оно систематически растет при переходе от пар и групп к скоплениям), а остальное пространство “общего поля” характеризуется

отношением $M_T/M_* \sim 690$, что на два порядка выше, чем у типичной галактики.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как широко известно, некоторые предсказания стандартной космологической модели Λ CDM не согласуются с имеющимися сегодня наблюдательными данными. В первую очередь, это касается проблемы “потерянных” спутников [58], которая выражается в том, что теория предсказывает количество спутников у галактик типа Млечного Пути в десятки раз больше, чем их наблюдается у нашей Галактики, у M31 и у других соседних галактик высокой светимости. Были предложены различные объяснения этому противоречию, основанные на особенностях процесса звездообразования в карликовых галактиках в эпоху $z \sim 10$. Однако проблема “потерянных” спутников все же остается.

Другая загадка заключается в том, что теория образования химических элементов в горячей расширяющейся Вселенной дает значение космического обилия барионов $\Omega_b = 0.045 \pm 0.005$ [30]. Однако, по данным наблюдений только 1/10 часть этих барионов известна нам в виде звезд и газа в галактиках. Предполагается, что основная масса барионов может быть распределена между галактиками наподобие теплого ($T \sim 10^5$ К) невириализованного “бульона” [59]. В литературе появились сообщения о вероятном наблюдательном обнаружении “недостающих” барионов [60, 61]. Тем не менее, и эту проблему нельзя пока считать окончательно решенной.

Существенное расхождение между локальным (0.08 ± 0.02) и глобальным (0.28 ± 0.03) значением средней плотности материи добавляет еще одну задачу — проблему “потерянной” темной материи. В отличие от ситуации с потерянными спутниками и потерянными барионами, недостаток темной материи в Местной вселенной характеризуется не одним—двумя порядками величины, а всего лишь фактором около 3, что, однако, также немало для так называемой “эпохи прецизионной космологии”. Противоречивые оценки Ω_m , вероятно, указывают на то, что предположение о пропорциональном распределении темной и звездной материи, $\log(\rho_{DM}) \propto \log(\rho_*)$, оказывается хотя и удобной, но не вполне оправданной парадигмой. Другими словами, наша Вселенная может выглядеть более скрытой и темной, чем это нам представлялось до недавнего времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа поддержана грантом РФФИ 11-02-90449-Укр-ф-а и госконтрактом “Космология ближней вселенной” N 14.740.11.0901.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton, University Press, 1993).
2. P. J. E. Peebles, S. D. Phelps, E. J. Shaya and R. B. Tully, *Astrophys. J.* **554**, 104 (2001).
3. P. J. E. Peebles and A. Nusser, *Nature* **465**, 565 (2010).
4. M. G. Lee, W. L. Freedman and B. F. Madore, *Astronom. J.* **106**, 964 (1993).
5. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier and D. I. Makarov, *Astronom. J.* **127**, 2031 (2004).
6. I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov and R. B. Tully, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **393**, 1265 (2009).
7. I. D. Karachentsev, *Astronom. J.* **129**, 178 (2005).
8. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov and E. I. Kaisina, in preparation (RCNG) (2012).
9. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **412**, 2498 (2011).
10. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
11. P. Papai and I. Szapudi, *Astrophys. J.* **725**, 2078 (2010).
12. M. J. Meyer, M. A. Zwaan, R. L. Webster et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **350**, 1195 (2004).
13. R. Giovanelli, M. P. Haynes, B. R. Kent et al., *Astronom. J.* **130**, 2598 (2005).
14. J. P. Huchra and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **257**, 423 (1982).
15. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
16. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 24 (2009).
17. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 1 (2011).
18. S. Cole, P. Norberg, C. M. Baugh et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **326**, 255 (2001).
19. E. F. Bell, D. H. McIntosh, N. Katz and M. D. Weinberg, *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 289 (2003).
20. C. S. Kochanek, M. A. Pahre, E. E. Falco et al., *Astrophys. J.* **560**, 566 (2001).
21. D. H. Jones, B. A. Peterson, M. Colless and W. Daunders, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **369**, 25 (2006).
22. R. Mandelbaum, U. Seljak, G. Kauffmann et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **368**, 715 (2006).
23. E. van Uitert, H. Hoekstra, M. Velander et al., *Astronom. and Astrophys.* **534**, 14 (2011).
24. R. B. Tully, *Astrophys. J.* **321**, 280 (1987).
25. J. Vennik, *Tartu Astron. Obs. Publ.* **73**, 1 (1984).
26. A. Magtesian, *Astrofizika* **28**, 150 (1988).
27. A. C. Crook, J. P. Huchra, N. Martimbeau et al., *Astrophys. J.* **655**, 790 (2007).
28. N. A. Bahcall, R. Cen, R. Dave et al., *Astrophys. J.* **541**, 1 (2000).

29. V. R. Eke, C. M. Baugh, S. Cole et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **362**, 1233 (2005).
30. M. Fukugita and P. J. E. Peebles, Astrophys. J. **616**, 643 (2004).
31. D. N. Spergel et al., Astrophys. J. Suppl. **170**, 377 (2007).
32. H. Tavio, A. J. Cuesta, F. Prada et al., arXiv:0807.3027 (2008).
33. S. Masaki, M. Fukugita and N. Yoshida, arXiv:1105.3005 (2011).
34. K. Rines and A. Diaferio, Astronom. J. **132**, 1275 (2006).
35. D. Anderhalden and J. Diemand, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **414**, 3166 (2011).
36. I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **405**, 1075 (2010).
37. O. G. Nasonova, J. A. de Freitas Pacheco and I. D. Karachentsev, Astronom. and Astrophys. **532**, 104 (2011).
38. A. Shafieloo, V. Sahni and A. A. Starobinsky, arXiv:0903.5141 (2009).
39. A. E. Romano, M. Sasaki and A. A. Starobinsky, arXiv:1006.4735 (2010).
40. S. Djorgovski, B. T. Soifer, M. A. Pahre et al., Astrophys. J. **438**, L13 (1995).
41. M. A. Bershad, J. D. Lowenthal and D. C. Koo, Astrophys. J. **505**, 50 (1998).
42. T. Totani, Y. Yoshii, T. Maihara et al. Astrophys. J. **559**, 592 (2001).
43. J. S. Huang, D. Thompson, M. W. Kummel et al., Astronom. and Astrophys. **368**, 787 (2001).
44. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva and W. K. Huchtmeier, Astronom. and Astrophys. **451**, 817 (2006).
45. B. E. Караченцева, Сообщ. САО **8**, 3 (1973).
46. S. Vegetti, L. Koopmans, A. Bolton et al, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **408**, 1969 (2010).
47. S. Vegetti, D. J. Lagattuta, J. P. McKean et al, arXiv:1201.3643 (2012).
48. H. Y. Shan, J. P. Kneib, C. Tao et al, arXiv:1108.1981 (2011).
49. P. Natarajan and V. Springel, Astrophys. J. **617**, L13 (2004).
50. M. J. Jee, R. L. While, N. Benitez et al., Astrophys. J. Suppl. **618**, 46 (2005).
51. I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova and H. M. Courtois, Astrophys. J. **743**, 123 (2011).
52. A. Abate and P. Erdogdu, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **400**, 1541 (2009).
53. C. M. Springov, K. L. Masters, M. P. Haynes et al., Astrophys. J. Suppl. **172**, 599 (2009).
54. M. Davis, A. Nusser, K. Masters et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **413**, 2906 (2011).
55. T. N. Jarrett, T. Chester, R. Cutri et al., Astronom. J. **119**, 2498 (2000).
56. M. Bilicki, M. Chodorowski, G. A. Mamon and T. Jarrett, Astrophys. J. **741**, 31 (2011).
57. S. Trujillo-Gomez, A. A. Klypin, J. Primack and A. J. Romanowsky, Astrophys. J. **742**, 16 (2011)
58. A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela and F. Prada, Astrophys. J. **522**, 82 (1999).
59. R. Cen and J. P. Ostriker, Astrophys. J. **519L**, 109 (1999).
60. J. T. Stocke, S. V. Penton, C. W. Danforth et al., Astrophys. J. **641**, 217 (2006).
61. A. Naranayan, B. P. Wakker, B. D. Savage et al., Astrophys. J. **721**, 960 (2010).

MISSING DARK MATTER IN THE LOCAL UNIVERSE

I. D. Karachentsev

A sample of 11 thousand galaxies with radial velocities $V_{LG} < 3500$ km/s is used to study the features of the local distribution of luminous (stellar) and dark matter within a sphere of radius of around 50 Mpc around us. The average density of matter in this volume, $\Omega_{m,loc} = 0.08 \pm 0.02$, turns out to be much lower than the global cosmic density $\Omega_{m,glob} = 0.28 \pm 0.03$. We discuss three possible explanations of this paradox: 1) galaxy groups and clusters are surrounded by extended dark halos, the major part of the mass of which is located outside their virial radii; 2) the considered local volume of the Universe is not representative, being situated inside a giant void; and 3) the bulk of matter in the Universe is not related to clusters and groups, but is rather distributed between them in the form of massive dark clumps. Some arguments in favor of the latter assumption are presented. Besides the two well-known inconsistencies of modern cosmological models with the observational data: the problem of missing satellites of normal galaxies and the problem of missing baryons, there arises another one—the issue of missing dark matter.

Keywords: *cosmology: dark matter—galaxies: evolution—galaxies: formation*