

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи  
УДК 524.6-333/524.72/524.7-333/524.82

Макаров Данила Дмитриевич

**Анализ скоростей близких карликовых галактик  
и оценка массы Млечного Пути, Туманности Андромеды  
и Местной Группы**

Специальность 1.3.1 —  
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор РАН  
Макаров Дмитрий Игоревич

Нижний Архыз — 2025

## Оглавление

Стр.

|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение . . . . .</b>                                                                               | <b>4</b>  |
| <b>Глава 1. Влияние Большого Магелланова Облака на кинематику<br/>спутников Млечного Пути . . . . .</b> | <b>16</b> |
| 1.1 Введение . . . . .                                                                                  | 16        |
| 1.2 Спутники Млечного Пути . . . . .                                                                    | 17        |
| 1.3 Бегущий апекс Солнца . . . . .                                                                      | 23        |
| 1.3.1 Движение Солнца в Галактике . . . . .                                                             | 23        |
| 1.3.2 Измерение апекса Солнца . . . . .                                                                 | 24        |
| 1.3.3 Квадрупольный член распределения лучевых скоростей . . . . .                                      | 28        |
| 1.4 Две популяции спутников . . . . .                                                                   | 28        |
| 1.4.1 Первый пролет . . . . .                                                                           | 29        |
| 1.4.2 Возможное вращение подсистемы внутренних спутников<br>Млечного Пути . . . . .                     | 32        |
| 1.5 Влияние БМО на солнечный апекс . . . . .                                                            | 33        |
| 1.5.1 Апекс Солнца без возмущения, вызванного БМО . . . . .                                             | 34        |
| 1.5.2 Отслеживание влияния БМО на апекс в моделировании . . . . .                                       | 37        |
| 1.6 Основные результаты Главы 1 . . . . .                                                               | 41        |
| <b>Глава 2. Оценка массы Млечного Пути и Туманности Андромеды . . . . .</b>                             | <b>44</b> |
| 2.1 Введение . . . . .                                                                                  | 44        |
| 2.2 Метод проекционной массы . . . . .                                                                  | 46        |
| 2.3 Метод массы на луче зрения . . . . .                                                                | 47        |
| 2.3.1 Случай Млечного Пути . . . . .                                                                    | 51        |
| 2.3.2 Случай близкой группы . . . . .                                                                   | 51        |
| 2.3.3 Дополнительные замечания . . . . .                                                                | 52        |
| 2.4 Сравнение с космологическими симуляциями . . . . .                                                  | 53        |
| 2.5 Применение метода к Местной группе галактик . . . . .                                               | 57        |
| 2.5.1 Млечный Путь . . . . .                                                                            | 59        |
| 2.5.2 Туманность Андромеды . . . . .                                                                    | 67        |
| 2.5.3 Влияние погрешностей измерения расстояния . . . . .                                               | 73        |
| 2.6 Основные результаты Главы 2 . . . . .                                                               | 76        |

|                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 3. Замороженные окраины: холодный Хаббловский поток и масса Местной группы . . . . .</b> | <b>79</b>  |
| 3.1 Введение . . . . .                                                                            | 79         |
| 3.2 Модель поля скоростей . . . . .                                                               | 81         |
| 3.3 Оценка массы по модели потока Хаббла . . . . .                                                | 84         |
| 3.4 Сравнение с моделированием HESTIA . . . . .                                                   | 88         |
| 3.5 Обсуждение . . . . .                                                                          | 90         |
| 3.6 Основные результаты Главы 3 . . . . .                                                         | 96         |
| <b>Заключение . . . . .</b>                                                                       | <b>98</b>  |
| <b>Список литературы . . . . .</b>                                                                | <b>101</b> |

## Введение

### Актуальность темы исследования

Современная стандартная  $\Lambda$ CDM космология базируется на модели расширяющейся вселенной, состоящей из трёх основных компонент: *тёмной энергии*, описываемой космологической постоянной  $\Lambda$  в уравнениях общей теории относительности Эйнштейна; *холодной тёмной материи* (Cold-Dark-Matter), частицы которой движутся медленно по сравнению со скоростью света и проявляются только в гравитационном взаимодействии; и небольшой доли обычного “барионного” вещества. По данным миссии Planck [1] наша Вселенная является плоской и её полная плотность с высокой точностью равна критической плотности Вселенной,  $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ . Стандартная  $\Lambda$ CDM модель прекрасно описывает наблюдаемые флуктуации реликтового излучения. Согласно этой модели возраст Вселенной равен  $13.797 \pm 0.023$  миллиарда лет, современное значение постоянной Хаббла равно  $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$ , на темную энергию приходится  $68.5 \pm 0.7\%$ , оставшиеся  $31.5 \pm 0.7\%$  составляет гравитирующее вещество, основу которого образует холодная темная материя, а на долю обыкновенного “барионного” вещества приходится только  $4.93 \pm 0.03\%$  полной плотности Вселенной. Стандартная модель дает хорошее описание широкому кругу наблюдаемых явлений во Вселенной, в частности: существованию и свойствам реликтового излучения, наблюдаемому содержанию водорода, гелия и лития, формированию крупномасштабной структуры распределения галактик, ускоренному расширению Вселенной. Тем не менее, нужно подчеркнуть, что основные свойства Вселенной определяются “тёмными” компонентами, природа которых остается загадочной.

Ускоренное расширение Вселенной было обнаружено в конце 90х годов двумя независимыми группами исследователей, Supernova Cosmology Project [2] и High-Z Supernova Search Team [3], по изучению сверхновых типа Ia на космологических красных смещениях вплоть до  $z \sim 0.8$ . Сверхновые использовались в качестве “стандартных свечей”, то есть объектов, имеющих одинаковую светимость, для измерения фотометрического расстояния. В рамках общей теории относительности ускоренное расширение Вселенной объясняется положительным

значением космологической постоянной  $\Lambda$ , получившей название “тёмная энергия”.

Проблема скрытой массы или тёмной материи является одной из старейших в астрономии. Fritz Zwicky по наблюдениям радиальных скоростей восьми галактик в скоплении Coma обнаружил, что для устойчивости скопления его полная масса должна быть в 400 раз больше, чем звёздная масса входящих в него галактик [4]. С тех пор многочисленные наблюдения только подтверждали и обобщали этот вывод. Кривые вращения галактик, как правило, выходят на плато и не демонстрируют падения с расстоянием от центра галактик [5]. Такое поведение круговой скорости невозможно объяснить распределением видимого вещества. Кинематика шаровых скоплений и спутников галактик подтверждают вывод, что полная масса галактик в несколько раз превышает суммарную массу звёзд и газа, заключённую в галактиках. Анализ лучевых скоростей галактик в группах и скоплениях показывает, что тёмная материя присутствует на всех уровнях галактической иерархии, причём её доля растёт с увеличением массы систем [6]. Межгалактический горячий газ в массивных скоплениях галактик примерно в 10 раз превышает массу всех звёзд в галактиках, тем не менее и он составляет только  $\sim 15\%$  полной массы скоплений галактик [7]. Гравитационное линзирование, то есть отклонение света в гравитационном поле массивных объектов, даёт независимый способ изучения распределения гравитирующей массы внутри скоплений галактик. Обнаружение чёткого разделения в распределении гравитирующей массы, определенной по слабому гравитационному линзированию, и рентгеновского излучения горячего газа в сталкивающемся скоплении галактик Пуля интерпретируется как прямое доказательство существования тёмной материи [8]. Тем не менее, проблема тёмного вещества во Вселенной остается нерешённой, поскольку неизвестна его природа и состав. Несмотря на активные поиски, частицы темной материи экспериментально пока так и не обнаружены. Вопрос о природе темного вещества, его свойствах и распределении, остается одним из ключевых в современной космологии.

В наблюдаемом распределении галактик закодирована динамическая история развития Вселенной под воздействием тёмной энергии, тёмной материи и обычного вещества. Под воздействием гравитации окружающего вещества наблюдаемые скорости галактик могут существенно отличаться от линейного хаббловского закона расширения Вселенной. В линейном приближении существует прямая связь между крупномасштабными неоднородностями в распределении ве-

щества и крупномасштабным полем пекулярных скоростей галактик [9]. Анализ роста возмущений в расширяющейся Вселенной [10] показывает, что космические структуры демонстрируют асимметричный эллипсоидальный коллапс. Систематический поток вещества происходит от пустот к стенам, от стен к волокнам и, наконец, от волокон к скоплениям и группам галактик [11]. За последние десятилетия произошёл гигантский прогресс в массовом измерении расстояний до галактик независимо от красного смещения, что позволяет изучать поле пекулярных скоростей. Анализ пекулярных движений галактик является ключевым методом для решения проблемы происхождения и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной, оценки массы групп и скоплений галактик, картографирования распределения материи на шкале 100–200 Мпк.

Исследование самых близких галактик является источником чрезвычайно важных сведений о формировании и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной [12]. Изучение непосредственных окрестностей Местной Группы на шкале до 10 Мпк, так называемого Местного Объёма, позволяет исследовать множество карликовых галактик, недоступных наблюдениям на больших расстояниях. Эти “пробные частицы” с измеренными лучевыми скоростями и расстояниями трассируют хаббловский поток с беспрецедентно высокой точностью. Комбинация возможностей космического телескопа им. Хаббла с преимуществами измерения расстояний по вершине ветви красных гигантов (TRGB) позволила построить самую точную трёхмерную карту распределения галактик на шкале до 10 Мпк. На данный момент высокоточные расстояния получены для более чем 500 близких галактик [13].

Усилия по исследованию Местного Объёма позволили построить детальную картину движений галактик и выявить неожиданные особенности Хаббловского потока на малых масштабах 1–3 Мпк вокруг близких групп галактик [14]. Оказалось, что Хаббловские диаграммы “скорость–расстояние” вокруг Местной Группы и других соседних групп характеризуются чрезвычайно малой дисперсией пекулярных скоростей  $V_{\text{pec}} \sim 25 \text{ км с}^{-1}$  [15]. 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. “Сфера нулевой скорости” вокруг группы галактик отделяет область её гравитационного влияния, где происходит падение галактик на группу, от общего Хаббловского разбегания галактик. Размер этой области определяется полной массой группы галактик, что

дает независимый метод оценки массы групп галактик. Для Местной Группы радиус “сферы нулевой скорости” равен  $R_0 = (0.96 \pm 0.03)$  Мпк, что соответствует массе  $M_{LG} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_\odot$  [15]. Эта величина находится в замечательном согласии с вириальными оценками массы нашей Галактики и Туманности Андромеды  $M_{MW+M31} = (1.6\text{--}2.2) \times 10^{12} M_\odot$ . Караченцев [14] подчеркивает, что это согласие достигается только в предположении наличия темной энергии со стандартным параметром плотности  $\Omega_\Lambda = 0.73$ . Аналогичный вывод можно сделать по наблюдению движения галактик вокруг соседних групп М 81 и Centaurus A [16]. Следовательно, наблюдаемые особенности местного Хаббловского потока дают прямое и независимое свидетельство наличия во Вселенной особой космологической среды — темной энергии [14].

Местная Группа, являясь нашим домом, играет ключевую роль в исследовании Вселенной. Современные глубокие обзоры обеспечивают ученых непрерывным гигантским потоком высокоточных данных о расстояниях, лучевых скоростях и собственных движениях звёзд и галактик, обнаружении новых спутников и структур. Как правило, столь качественная и подробная информация об исследуемых объектах за пределами Местной Группы просто недоступна. Это делает Местную Группу уникальной лабораторией для изучения процессов, связанных с гравитационным взаимодействием галактик, эволюцией звёздных систем, распределением тёмной материи и её влиянием на динамику галактик. Несмотря на богатство данных, оценки массы Млечного Пути, Туманности Андромеды и Местной Группы в целом варьируются в достаточно широких пределах в зависимости от используемых методов. Wang и др. [17] отмечают, что масса нашей Галактики известна с точностью до фактора двойки и лежит в диапазоне от  $5 \times 10^{11}$  до  $2 \times 10^{12} M_\odot$ . Метод временного аргумента дает оценку массы Местной Группы порядка  $5 \times 10^{12} M_\odot$ , в то время как сумма вириальных масс Млечного Пути [18; 19] и Туманности Андромеды [20], как и размер сферы нулевой скорости [15], приводят к примерно в два раза более низким значениям. Эти расхождения требуют детального анализа и усовершенствования моделей, учитывающих распределение тёмной материи, первый пролет спутников и взаимное влияние галактик на динамику системы.

## Цели и задачи диссертационной работы

Основной задачей данной работы является изучение кинематики карликовых галактик Местной Группы радиусом около 1 Мпк, оценки масс Млечного Пути, Туманности Андромеды и Местной Группы в целом. Внимание сконцентрировано на анализе лучевых скоростей. Несмотря на гигантский прорыв в определении собственных движений звёзд и ближайших галактик, за пределами вириальной зоны нашей Галактики данные о тангенциальных скоростях остаются крайне скудными и неточными, и лучевые скорости остаются источником основной информации о движении галактик.

## Научная новизна

- Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми.
- Обнаружена аномалия поведения бегущего апекса Солнца относительно спутников нашей Галактики. Близкие спутники показывают неожиданно большую амплитуду коллективного движения около  $230 \text{ км с}^{-1}$  относительно центра Галактики. Показано, что эффект связан с первым пролетом массивного Большого Магелланова Облака (БМО) со своей свитой вокруг Млечного Пути и возмущением в кинематике спутников Млечного Пути, вызванным этим пролетом.
  - На основе подхода, предложенного Bahcall & Tremaine [21], разработан метод оценки массы близких групп галактик с учетом трёхмерного распределения спутников вокруг центральной галактики. Получены оценки массы Млечного Пути и Туманности Андромеды на шкале 240 и 300 кпк, соответственно.
  - Получены оценки полной массы Местной Группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк от центроида Местной Группы из анализа падения удаленных членов Местной Группы за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды.

## Научная и практическая значимость работы

Основные результаты, полученные в данном исследовании, вносят вклад в изучение движения близких карликовых галактик, структуры Местной Группы и распределения в ней вещества, понимания её эволюции.

В данной работе составлена самая полная на данный момент выборка галактик Местной Группы и её ближайших окрестностей. Обзор литературы позволил собрать воедино наиболее точные измерения расстояний и скоростей этих галактик. Эта коллекция данных лежит в основе данного исследования и чрезвычайно важна для сопоставления наблюдений с теорией. Анализ кинематики спутников позволяет изучать историю формирования группы и выявлять эффекты пролета массивных членов.

Метод оценки массы внутри вириального радиуса галактик с учетом известных трёхмерных расстояний спутников, разработанный в данном исследовании, позволяет исключить неопределённость, связанную с учетом проекции расстояний в классическом подходе, и, как следствие, повысить точность и надёжность полученных оценок масс. Изучена применимость метода к исследованию близких групп галактик.

Показано, что падение галактик внутрь Местной Группы прослеживается вплоть до границ вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды. Движение галактик является холодным и хорошо описывается моделью Хаббловского потока под воздействием центральной массы с учетом влияния  $\Lambda$ -члена, что позволяет оценить полную массу Местной Группы в широком диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк и сопоставить эту оценку с индивидуальными массами двух основных членов: Млечного Пути и Андромеды. Данный подход критически важен для понимания распределения массы в группах галактик.

Показано, что современное космологическое численное моделирование качественно хорошо описывает наблюдаемое поле скоростей вокруг Местной Группы, однако, оно не способно получить столь холодное натекание галактик на центральные галактики.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Определение апекса Солнца  $(l, b, V) = (+90 \pm 14^\circ, -10.0 \pm 6.4^\circ, 249 \pm 37 \text{ км с}^{-1})$  относительно внешних спутников Млечного Пути, расположенных далее 100 кпк, что находится в хорошем согласии с известным движением Солнца в Галактике.
2. Открытие и объяснение аномальной скорости  $230 \text{ км с}^{-1}$  коллективного движения близких спутников, расположенных на расстояниях менее 100 кпк, относительно центра Галактики. Аномалия вызвана первым пролетом Большого Магелланова Облака массой  $\approx 2 \times 10^{11} M_\odot$ .
3. Измерение массы нашей Галактики  $M_{\text{MW}} = (7.9 \pm 2.3) \times 10^{11} M_\odot$  в пределах 240 кпк и Туманности Андромеды  $M_{\text{M31}} = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_\odot$  в пределах 300 кпк методом “массы на луче зрения”, который учитывает трёхмерное распределение спутников вокруг центральной доминирующей по массе галактики.
4. Обнаружение факта, что движение большинства периферийных членов Местной Группы относительно барицентра системы характеризуется чрезвычайно малой дисперсией скоростей по лучу зрения  $15 \text{ км с}^{-1}$  и прослеживается вплоть до границ вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды.
5. Определение полной массы Местной Группы галактик  $M_{\text{LG}} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_\odot$ , на основе модели Хаббловского потока в стандартной  $\Lambda\text{CDM}$  космологии под воздействием центральной концентрации массы. Данная оценка согласуется с суммой индивидуальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды. За пределами вириальных радиусов этих двух галактик не обнаружено значимого роста массы на расстояниях от 400 до 1400 кпк от барицентра Местной Группы.

## Степень достоверности и апробация результатов

Методы, разработанные и применённые в данном исследовании, приводят к непротиворечивым результатам, которые хорошо согласуются с работами, вы-

полненными другими авторами с применением независимых подходов и методов. Апробация работы проводилась на семинарах, многочисленных Российских и международных конференциях, и симпозиумах:

1. Международная конференция “Mid term CLUES mini meeting”, on-line, 21–24.02.2022, устный доклад “The solar Apex problem”, Dmitry Makarov, Danila Makarov
2. Российская конференция “Многоликая Вселенная: теория и наблюдения — 2022” к 90-летию академика Ю.Н. Парийского, САО РАН, Нижний Архыз, 23–27.05.2022, устный доклад “Анализ кинематики спутников нашей Галактики”, Дмитрий Макаров, Данила Макаров, Сергей Хоперсков, Лидия Макарова, Noam Libeskind
3. Международная конференция “CLUES 2022”, La Cristalera, Spain, 10–15.07.2022, устный доклад “The Solar Apex problem”, Dmitry Makarov, Danila Makarov, Sergey Khoperskov, Lidia Makarova, Noam Libeskind
4. Российская конференция “Наука будущего — наука молодых” — VII Всероссийский молодежный научный форум, Новосибирск, Россия, 23–26.08.2022, устный и стендовый доклад “Анализ кинематики спутников нашей Галактики”, Макаров Данила Дмитриевич
5. Астрофизический семинар АКЦ ФИАН, 07.11.2022, устный доклад “Особенности кинематики спутников нашей Галактики”, Дмитрий Макаров; Данила Макаров; Сергей Хоперсков; Лидия Макарова; Noam Libeskind
6. Конкурс-конференция САО РАН, 08.02.2023, устный доклад “Влияние Большого Магелланова Облака на кинематику спутников Млечного Пути: подсказка бегущего апекса Солнца”, Макаров Д.И, Макаров Д.Д., Макарова Л.Н., Хоперсков С.А., Либескинд Н., Саломон Ж.Б.
7. Международная конференция “CLUES Meeting 2023”, Munich, Germany, 05–09.06.2023, устный доклад “Kinematics of the Milky Way satellites”, Dmitry Makarov, Sergey Khoperskov, Danila Makarov, Lidia Makarova, Noam Libeskind, Jean-Baptist Salomon
8. Семинар Galaxies, Institut d’Astrophysique de Paris, Paris, France, 21.09.2023, устный доклад “Kinematics of dwarfs in the Local Group”, Makarov Dmitry, Makarov Danila, Khoperskov Sergey, Kozyrev Kirill, Makarova Lidia, Libeskind Noam, Selchenok Valeria, Salomon Jean-Baptiste

9. Российская конференция “Ультрафиолетовая Вселенная - 2023”, Москва, 16–19.10.2023, устный доклад “Кинематика карликовых галактик в Местной Группе”, Д.И. Макаров, Д.Д. Макаров, С.А. Хоперсков, К.А. Козырев, Л.Н. Макарова, N. Libeskind, В.А. Сельчёнок, J.-B. Salomon
10. Российская конференция “Успехи российской астрофизики 2023: Теория и Эксперимент”, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Москва, 15.12.2023, устный доклад “Масса Местной Группы галактик по кинематике карликовых галактик”, Макаров Д.Д., Макаров Д.И., Козырев К.А., Макарова Л.Н., Libeskind N., Сельчёнок В.А.
11. Международный симпозиум “32nd General Assembly International Union (IAUGA 2024)”, Capetown, South Africa, 06–15.08.2024, стендовый доклад “The fall of the dwarfs and the mass of the Local Group”, Makarov Danila, Makarov Dmitry, Makarova Lidia
12. Всероссийская астрономическая конференция “Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр”, САО РАН, Нижний Архыз, 25–31.08.2024, стендовый доклад “Оценка массы Туманности Андромеды на шкале до 300 кпк”, Козырев Кирилл Александрович, Макаров Д.И., Макаров Д.Д.
13. Всероссийская астрономическая конференция “Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр”, САО РАН, Нижний Архыз, 25–31.08.2024, стендовый доклад “Масса Млечного Пути по кинематике спутников”, Макаров Данила Дмитриевич, Макаров Д.И., Макарова Л.Н.
14. Всероссийская астрономическая конференция “Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр”, САО РАН, Нижний Архыз, 25–31.08.2024, устный доклад “Оценка массы Местной Группы по движению карликовых галактик”, Макаров Данила Дмитриевич, Макаров Д.И., Козырев К.А., Макарова Л.Н.
15. Международная конференция “Cosmic Flows 2025: Probing the Universe with Peculiar Velocities”, Brisbane, Australia, 02–08.02.2025, устный доклад “The Hubble flow model around the Local Group”, Danila Makarov, Dmitry Makarov

### Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации изложены в трёх работах, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, общим объёмом 51 страница и в трёх материалах конференций.

1. Makarov Dmitry, Khoperskov Sergey, Makarov Danila, Makarova Lidia, Libeskind Noam, Salomon Jean-Baptiste “The LMC impact on the kinematics of the Milky Way satellites: clues from the running solar apex”, 2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 521, 3540–3552
2. Makarov Danila, Makarov Dmitry, Kozyrev Kirill, Libeskind Noam “Line-of-Sight Mass Estimator and the Masses of the Milky Way and Andromeda Galaxy”, 2025, Universe, 11, id.144
3. Makarov Danila, Makarov Dmitry, Makarova Lidia, Libeskind Noam “The frozen outskirts: A cold Hubble flow and the mass of the Local Group”, 2025, Astronomy & Astrophysics, 698, id.A178
4. Makarov Danila, Makarov Dmitry, Makarova Lidia “The fall of the dwarfs and the mass of the Local Group”, 2024, 32nd General Assembly International Astronomical Union (IAUGA 2024), Capetown, South Africa, poster id. 1131
5. Kozyrev K., Makarov D., Makarov D. “Mass of the Andromeda Galaxy on a scale of up to 300 kpc”, 2024, Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK2024), held 25-31 July, 2024 in Nizhny Arkhyz, Russian Federation. pp. 198–202
6. Makarov D. D., Makarov D. I., Makarova L., Kozyrev K. “The mass of the Milky Way based on the kinematics of satellites”, 2024, Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK2024), held 25-31 July, 2024 in Nizhny Arkhyz, Russian Federation. pp. 210–214

### Личный вклад автора

Все работы выполнены в соавторстве под руководством Д.И. Макарова.

Создание выборки членов Местной Группы галактик, сбор данных по литературе проводились автором диссертации. В сборе данных по спутникам ту-

манности Андромеды также активное участие принимал К.А. Козырев. Весь программный код, использовавшийся в работе, написан автором.

Определение и анализ бегущего апекса Солнца относительно спутников Млечного Пути, и проверки различных гипотез объяснения аномалии выполнен автором. Численное моделирование пролета БМО и его влияния на гало частиц сделано С.А. Хоперсковым.

Развитие метода проекционных масс для случая известных расстояний спутников проведено автором. Масса нашей Галактики оценена автором. Масса Туманности Андромеды измерена К.А. Козыревым совместно с автором диссертации.

Анализ распределения скоростей вне вириальных зон и оценка полной массы Местной Группы по её влиянию на Хаббловский поток выполнены автором диссертации.

Данные космологического гидродинамического моделирования HESTIA предоставлены N. Libeskind. Анализ этих данных проводился автором совместно с К.А. Козыревым.

Обсуждение всех результатов, подготовка и написание статей велось наравне с соавторами.

## Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения, общим объёмом 123 страницы, включая 23 иллюстрации и 11 таблиц. Список цитируемой литературы включает 239 наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, ставятся цели и задачи исследования, описывается её научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту. Кроме того, приводится список работ, содержащих результаты данного исследования, с указанием личного вклада автора. Кратко представлено содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена анализу бегущего апекса Солнца относительно спутников нашей Галактики. Проанализированы дипольный и квадрупольный моменты распределения лучевых скоростей спутников на разных расстояниях. Обнаружена аномально большая скорость Солнца относительно спутников, располо-

женных ближе 100 кпк. Рассмотрены различные гипотезы, объясняющие эту аномалию. Выявлена её связь с Большим Магеллановым Облаком (БМО) и галактиками, кинематически связанными с ним. Проведено численное моделирование пролета БМО вокруг нашей Галактики и проанализировано его влияние на поле скоростей частиц гало. Показано, что первый пролет массивной галактики  $M_{\text{LMC}} \approx 2 \times 10^{11} M_{\odot}$  может объяснить наблюдаемую аномалию в поведении бегущего апекса Солнца относительно спутников.

В **Главе 2** развит метод проекционных масс, предложенный Bahcall & Tremaine [21], как альтернатива теореме вириала, для случая известных расстояний спутников в системе. Метод основан на использовании соотношения  $v^2 r$  в качестве индикатора массы и усреднения этой величины по всем возможным орбитам. Знание трёхмерных расстояний позволяет избавиться от одной из основных неопределённостей классического подхода оценки массы в далеких группах — учет поправки за проекцию распределения спутников на небо. На основе этого метода измерены массы Млечного Пути и Туманности Андромеды на масштабах 240 и 300 кпк, соответственно. Эти оценки находятся в прекрасном согласии с независимыми измерениями, полученными другими авторами.

В **Главе 3** проанализировано движение галактик за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды. Показано, что холодный Хаббловский поток прослеживается вплоть до границ вириальных зон и хорошо описывается простой моделью торможения космологического разбегания сферически-симметричной концентрации массы с учетом космологической постоянной. Это позволяет оценить массу Местной Группы в широком диапазоне расстояний. Оказалось, что полная масса Местной Группы, оцененная по Хаббловскому потоку, практически совпадает с суммой индивидуальных масс двух её основных членов. Более того, в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк не прослеживается никакого роста массы. Проведено сравнение с современным космологическим гидродинамическим моделированием.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации.

## Глава 1. Влияние Большого Магелланова Облака на кинематику спутников Млечного Пути

### 1.1 Введение

Благодаря своей близости Местная Группа является одной из наиболее благоприятных для исследований систем галактик, и, таким образом, она является испытательным полигоном для решения различных проблем современных теорий формирования галактик. За последние десятилетия различные крупномасштабные обзоры привели к открытию и детальному изучению нескольких десятков близких карликовых галактик [см. обзор 22, и ссылки в нем]. Благодаря космической миссии *Gaia* были измерены собственные движения для большинства близких галактик-спутников [например, см. недавние работы 23—25]. Эти данные вместе с лучевыми скоростями дают возможность изучить как формирование, так и эволюцию галактик Местной Группы.

Предполагается, что движения объектов внутри вириальных областей групп должны быть хорошо “рандоминизированными”, а когерентные структуры не могут сохраняться в течение очень долгого времени. Однако, Kunkel & Demers [26] и Lynden-Bell [27] отметили, что спутники Млечного Пути расположены широким поясом вдоль большого круга, перпендикулярного диску Галактики. Kroupa et al. [28], Metz et al. [29] и Pawłowski et al. [30] показали, что уплощенное распределение спутников Млечного Пути на 99.5% не соответствует изотропному или вытянутому распределению субструктур, как можно было бы ожидать согласно теории  $\Lambda$ CDM. Подобные планарные структуры были обнаружены вокруг всех близких массивных галактик: M 31 [29], M 81 [31], Centaurus A [32] и NGC 253 [33]. Более того, наблюдения показывают, что плоскость галактик-спутников, перпендикулярная диску Млечного Пути, может быть стабилизирована вращением [34]. Есть также свидетельства в пользу регулярного вращения плоскости спутников вокруг Туманности Андромеды [35]. Таким образом, плоскости спутников могут быть довольно широко распространены в ближней Вселенной. Однако, современные космологические расчеты формирования галактик говорят не в пользу стабильности таких структур [см. например, 36].

Одно из возможных объяснений наличия плоских структур в Местной группе — это естественный результат анизотропного падения спутников вдоль филаментов тёмной материи космической паутины [37; 38]. Это неотъемлемый процесс формирования гало в  $\Lambda$ CDM-космологии. Действительно, Besla et al. [39] пришли к выводу, что Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО, ММО) находятся на своем первом пролете вокруг Млечного Пути [см. также 40—42].

Современные оценки массы БМО позволяют предположить, что это довольно массивная галактика ( $\propto 10^{11} M_{\odot}$ ), влияющая на движения звёзд в звёздном гало Млечного Пути [43; 44], формирующая свойства окружающих звёздных потоков [45; 46], шаровых скоплений [47], и оставляющая след в распределении тёмной материи на больших масштабах [48; 49]. В результате, падающая БМО вместе с сопровождающим её эскортом спутников может влиять на распределение скоростей всего населения спутников Млечного Пути [50].

Настоящая работа концептуально перекликается с исследованием поведения апекса Солнца, выполненного Karachentsev & Makarov [51], крайне важного для изучения движения галактик за пределами Местной Группы [51—53].

## 1.2 Спутники Млечного Пути

Таблица 1 — Список галактик группы Млечного Пути

| Name           | J2000           | $(m - M)_0$<br>mag            | Method | $D$<br>kpc            | $V_h$<br>км с <sup>-1</sup> |
|----------------|-----------------|-------------------------------|--------|-----------------------|-----------------------------|
| Tucana IV      | 000255.2–605100 | 18.41 $\pm$ 0.19 [54]         | TRGB   | 48,1 $\pm$ 4.4        | 15,9 $^{+1.8}_{-1.7}$ [23]  |
| SMC            | 005238.0–724801 | 18.99 $\pm$ 0.05 [23]         | Cep    | 62,8 $\pm$ 1.5        | 158 $\pm$ 4 [55]            |
| Sculptor       | 010009.4–334233 | 19.67 $\pm$ 0.14 [23]         | TRGB   | 85,9 $\pm$ 5.7        | 111,4 $\pm$ 0.1 [56]        |
| Cetus II       | 011752.8–172512 | 17.10 $\pm$ 0.10 [57]         | CMD    | 26,3 $\pm$ 1.2        |                             |
| DELVE 2        | 015505.3–681511 | 19.26 $\pm$ 0.10 [58]         | HB     | 71,1 $\pm$ 3.4        |                             |
| Cetus III      | 020519.4–041612 | 22.00 $^{+0.20}_{-0.10}$ [23] | HB     | 251 $^{+24}_{-12}$    |                             |
| Triangulum II  | 021317.4+361042 | 17.27 $\pm$ 0.11 [59]         | CMD    | 28,4 $\pm$ 1.5        | –381,70 $\pm$ 1.10 [23]     |
| Segue 2        | 021916.0+201031 | 17.70 $\pm$ 0.10 [23]         | TRGB   | 34,7 $\pm$ 1.6        | –40,20 $\pm$ 0.90 [25]      |
| Eridanus III   | 022245.5–521701 | 19.70 $\pm$ 0.15 [23]         | HB     | 87,1 $\pm$ 6.2        |                             |
| DES J0225+0304 | 022542.4+030410 | 16.88 $^{+0.06}_{-0.05}$ [60] | CMD    | 23,8 $^{+0.7}_{-0.6}$ |                             |
| Hydrus I       | 022933.4–784128 | 17.20 $\pm$ 0.04 [23]         | TRGB   | 27,5 $\pm$ 0.5        | 80,4 $\pm$ 0.6 [23]         |
| Fornax         | 023954.7–343133 | 20.84 $\pm$ 0.18 [23]         | TRGB   | 147 $\pm$ 13          | 55,2 $\pm$ 0.1 [56]         |
| Horologium I   | 025531.7–540708 | 19.50 $\pm$ 0.20 [23]         | HB     | 79,4 $\pm$ 7.7        | 112,8 $^{+2.5}_{-2.6}$ [23] |

| Name              | J2000           | $(m - M)_0$                                  | Method | $D$  |                                 | $V_h$              |                     |
|-------------------|-----------------|----------------------------------------------|--------|------|---------------------------------|--------------------|---------------------|
|                   |                 | mag                                          |        | kpc  |                                 | km c <sup>-1</sup> |                     |
| Horologium II     | 031632.1–500105 | 19.46 ± 0.20 [23]                            | HB     | 78,0 | ± 7.5                           | 168,7              | +12.9<br>-12.6 [23] |
| Reticulum II      | 033542.1–540257 | 17.40 ± 0.15 [23]                            | HB     | 30,2 | ± 2.2                           | 64,7               | +1.3<br>-0.8 [23]   |
| Reticulum III     | 034526.4–602700 | 19.81 ± 0.31 [23]                            | CMD    | 92   | ± 14                            | 274,2              | +7.5<br>-7.4 [23]   |
| Pictor I          | 044347.4–501659 | 20.30 ± 0.15 [23]                            | HB     | 115  | ± 8                             |                    |                     |
| LMC               | 052334.6–694522 | 18.50 ± 0.13 [61]                            | Cep    | 50,1 | ± 3.1                           | 278                | ± 2 [62]            |
| Columba I         | 053125.7–275727 | 21.31 ± 0.11 [59]                            | BHB    | 183  | ± 10                            | 153,7              | +5<br>-4.8 [23]     |
| Carina            | 064136.7–505758 | 20.11 ± 0.13 [23]                            | TRGB   | 105  | ± 7                             | 222,9              | ± 0.1 [23]          |
| Pictor II         | 064443.2–595360 | 18.30 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.15</sub> [23] | HB     | 45,7 | <sup>+2.6</sup> <sub>-3.3</sub> |                    |                     |
| Carina II         | 073625.6–560003 | 17.79 ± 0.05 [23]                            | HB     | 36,1 | ± 0.8                           | 477,2              | ± 1.2 [23]          |
| Carina III        | 073831.2–560601 | 17.22 ± 0.10 [23]                            | HB     | 27,8 | ± 1.3                           | 284,6              | +3.4<br>-3.1 [23]   |
| Ursa Major II     | 085130.0+630748 | 17.50 ± 0.30 [23]                            | TRGB   | 31,6 | ± 4.7                           | -116,5             | ± 1.9 [23]          |
| HYDRA 1           | 085536.0+033600 | 15.52 ± 0.05 [63]                            | MS     | 12,7 | ± 0.3                           | 89                 | ± 1.4 [63]          |
| Antlia II         | 093532.8–364602 | 20.6 ± 0.11 [64]                             | BHB    | 132  | ± 7                             | 288,8              | ± 0.4 [65]          |
| Segue 1           | 100703.2+160425 | 16.8 ± 0.20 [23]                             | CMD    | 22,9 | ± 2.2                           | 208,5              | ± 0.9 [23]          |
| Leo I             | 100826.9+121829 | 22.02 ± 0.13 [23]                            | TRGB   | 254  | ± 16                            | 282,5              | ± 0.1 [23]          |
| Sextans dSph      | 101303.0–013652 | 19.67 ± 0.10 [23]                            | TRGB   | 85,9 | ± 4.0                           | 224,2              | ± 0.1 [23]          |
| Sextans II        | 102544.9–003752 | 20.50 ± 0.20 [66]                            | HB     | 126  | ± 12                            |                    |                     |
| Ursa Major I      | 103448.8+515606 | 19.93 ± 0.10 [23]                            | TRGB   | 97   | ± 5                             | -55,3              | ± 1.4 [23]          |
| Willman 1         | 104921.0+510260 | 17.90 ± 0.40 [23]                            | CMD    | 38,0 | ± 7.7                           | -12,8              | ± 1 [25]            |
| Leo II            | 111329.2+220917 | 21.84 ± 0.13 [23]                            | TRGB   | 233  | ± 14                            | 78                 | ± 0.1 [23]          |
| Leo V             | 113109.6+021312 | 21.46 ± 0.16 [23]                            | TRGB   | 196  | ± 15                            | 170,9              | +2.1<br>-1.9 [23]   |
| Leo IV            | 113257.0+003160 | 20.94 ± 0.09 [23]                            | HB     | 154  | ± 7                             | 132,3              | ± 1.4 [23]          |
| Crater            | 113615.8–105240 | 20.81 ± 0.12 [67]                            | HB     | 145  | ± 8                             | 149,3              | ± 1.2 [68]          |
| Crater II         | 114914.4–182447 | 20.35 ± 0.02 [23]                            | TRGB   | 118  | ± 1                             | 89,3               | ± 0.3 [65]          |
| Virgo I           | 120009.6+004048 | 19.80 ± 0.20 [23]                            | HB     | 91   | ± 9                             |                    |                     |
| Hydra II          | 122142.1–315907 | 20.64 ± 0.16 [23]                            | TRGB   | 134  | ± 10                            | 303,1              | ± 1.4 [23]          |
| Coma Berenices    | 122658.4+235442 | 18.13 ± 0.08 [23]                            | HB     | 42,3 | ± 1.6                           | 98,1               | ± 0.9 [23]          |
| Centaurus I       | 123820.4–405407 | 20.33 ± 0.10 [69]                            | HB     | 116  | ± 6                             |                    |                     |
| Canes Venatici II | 125710.0+341915 | 21.02 ± 0.06 [23]                            | HB     | 160  | ± 5                             | -129               | ± 1.2 [23]          |
| Canes Venatici I  | 132803.5+333321 | 21.69 ± 0.10 [23]                            | TRGB   | 218  | ± 10                            | 30,9               | ± 0.6 [70]          |
| Bootes III        | 135712.0+264800 | 18.35 ± 0.10 [71]                            | HB     | 46,8 | ± 2.2                           | 197,5              | ± 3.8 [72]          |
| Bootes II         | 135808.0+125054 | 18.10 ± 0.06 [23]                            | TRGB   | 41,7 | ± 1.2                           | -117               | ± 5.2 [23]          |
| Bootes I          | 140005.0+143015 | 19.11 ± 0.08 [23]                            | HB     | 66,4 | ± 2.5                           | 101,8              | ± 0.7 [25]          |
| Ursa Minor        | 150911.3+671252 | 19.40 ± 0.10 [23]                            | TRGB   | 75,9 | ± 3.6                           | -246,9             | ± 0.1 [23]          |
| Bootes IV         | 153445.4+434334 | 21.60 ± 0.20 [23]                            | HB     | 209  | ± 20                            |                    |                     |
| Draco II          | 155247.6+643355 | 16.67 ± 0.05 [23]                            | TRGB   | 21,6 | ± 0.5                           | 342,5              | +1.1<br>-1.2 [23]   |
| DELVE 1           | 163054.0+005819 | 16.39 ± 0.10 [69]                            | HB     | 19,0 | ± 0.9                           |                    |                     |
| Hercules          | 163103.6+124724 | 20.84 ± 0.20 [23]                            | TRGB   | 147  | ± 14                            | 46,4               | ± 1.3 [73]          |
| Draco             | 172001.4+575434 | 19.40 ± 0.17 [23]                            | TRGB   | 76   | ± 6                             | -291               | ± 0.1 [23]          |
| <b>Milky Way</b>  | 174540.0–290028 | 14.55 ± 0.01 [74]                            | Direct | 8,1  | ± 0.0                           | -9,5               | ± 0.0 [75]          |
| Sagittarius dSph  | 185503.1–302842 | 17.10 ± 0.15 [76]                            | TRGB   | 26,3 | ± 1.9                           | 140                | ± 2 [77]            |
| Sagittarius II    | 195240.5–220405 | 19.32 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.02</sub> [23] | CMD    | 73,1 | <sup>+1.0</sup> <sub>-0.7</sub> | -177,2             | +0.5<br>-0.6 [78]   |
| Indus II          | 203852.8–460936 | 21.65 ± 0.16 [23]                            | CMD    | 214  | ± 16                            |                    |                     |

| Name        | J2000           | $(m - M)_0$       | Method | $D$  |      | $V_h$              |                       |
|-------------|-----------------|-------------------|--------|------|------|--------------------|-----------------------|
|             |                 | mag               |        | kpc  |      | км с <sup>-1</sup> |                       |
| Indus I     | 210850.0–510949 | 20.00 ± 0.20 [23] | HB     | 100  | ±10  |                    |                       |
| Segue 3     | 212131.0+190702 | 16.16 ± 0.09 [79] | CMD    | 17,1 | ±0.7 | –167,1             | ±1.5 [79]             |
| Grus II     | 220404.8–462624 | 18.62 ± 0.21 [23] | CMD    | 53   | ±5   | –110               | ±0.5 [23]             |
| Pegasus III | 222422.6+052512 | 21.56 ± 0.20 [23] | CMD    | 205  | ±20  | –222,9             | ±2.6 [23]             |
| Aquarius II | 223355.5–091939 | 20.16 ± 0.07 [23] | TRGB   | 108  | ±4   | –71,1              | ±2.5 [23]             |
| Tucana II   | 225155.1–583408 | 18.80 ± 0.20 [23] | HB     | 58   | ±6   | –129,1             | ±3.5 [23]             |
| Grus I      | 225642.4–500948 | 20.40 ± 0.20 [23] | TRGB   | 120  | ±12  | –140,5             | $^{+2.4}_{-1.6}$ [23] |
| Pisces II   | 225831.0+055709 | 21.31 ± 0.17 [23] | TRGB   | 183  | ±15  | –226,5             | ±2.7 [23]             |
| Tucana V    | 233724.0–631612 | 18.71 ± 0.34 [23] | CMD    | 55   | ±9   | –36,2              | $^{+2.5}_{-2.2}$ [23] |
| Phoenix II  | 233959.4–542422 | 19.60 ± 0.15 [23] | HB     | 83   | ±6   | 32,4               | $^{+3.7}_{-3.8}$ [80] |
| Tucana III  | 235636.0–593600 | 17.01 ± 0.16 [23] | TRGB   | 25,2 | ±1.9 | –102,3             | ±0.4 [25]             |

Для исследования кинематики спутников Млечного Пути мы отобрали 66 известных в настоящее время карликовых галактик в пределах 450 кпк вокруг нашей Галактики. Данные были собраны по недавним исследованиям космических потоков в окрестностях массивных галактик [81], включая систематический поиск сверхслабых спутников в обзорах Dark Energy Survey (DES) и Pan-STARRS1 (PS1) [82]. В наш каталог также включены данные из работ по собственным движениям карликовых галактик вокруг Млечного Пути [23; 25]. Итоговый каталог представлен в Таблице 1, содержащий (1) имя галактики, Name; (2) экваториальные координаты на эпоху J2000; (3–5) модуль расстояния  $(m - M)_0$  с указанием ошибки и источника данных; (6) метод определения расстояний: Blue Horizontal Branch (BHB), Cepheids (Cep), Color-Magnitude Diagram (CMD), the S2 orbit around the supermassive black hole in our Galaxy (Direct), Horizontal Branch (HB), Main Sequence (MS), Tip of the Red Giant Branch (TRGB); (7–8) гелиоцентрическое расстояние  $D$  в кпк; (9–11) гелиоцентрическая лучевая скорость  $V_h$  в км с<sup>-1</sup> и её источник данных. Распределение галактик на небе показано на рис. 1.1.

На рис. 1.2 мы показываем распределение карликовых галактик вокруг Млечного Пути по расстояниям. Оставляя за скобками вопрос о полноте выборки спутников, что выходит за рамки данной работы, мы обнаружили, что количество объектов линейно возрастает как функция логарифма расстояния. Это соотношение соответствует уменьшению объёмной плотности числа спутников как куб расстояния,  $n \propto r^{-3}$ . Это поведение начинается от галактики Tucana III,  $D_{MW} \approx 23$  кпк, что примерно соответствует границе звёздного гало Галактики,  $\approx 25$  кпк [18], и продолжается до Leo I,  $D_{MW} \approx 260$  кпк, что примерно соответствует внешней границе гало тёмной материи Млечного Пути,  $292 \pm 61$  кпк [83].

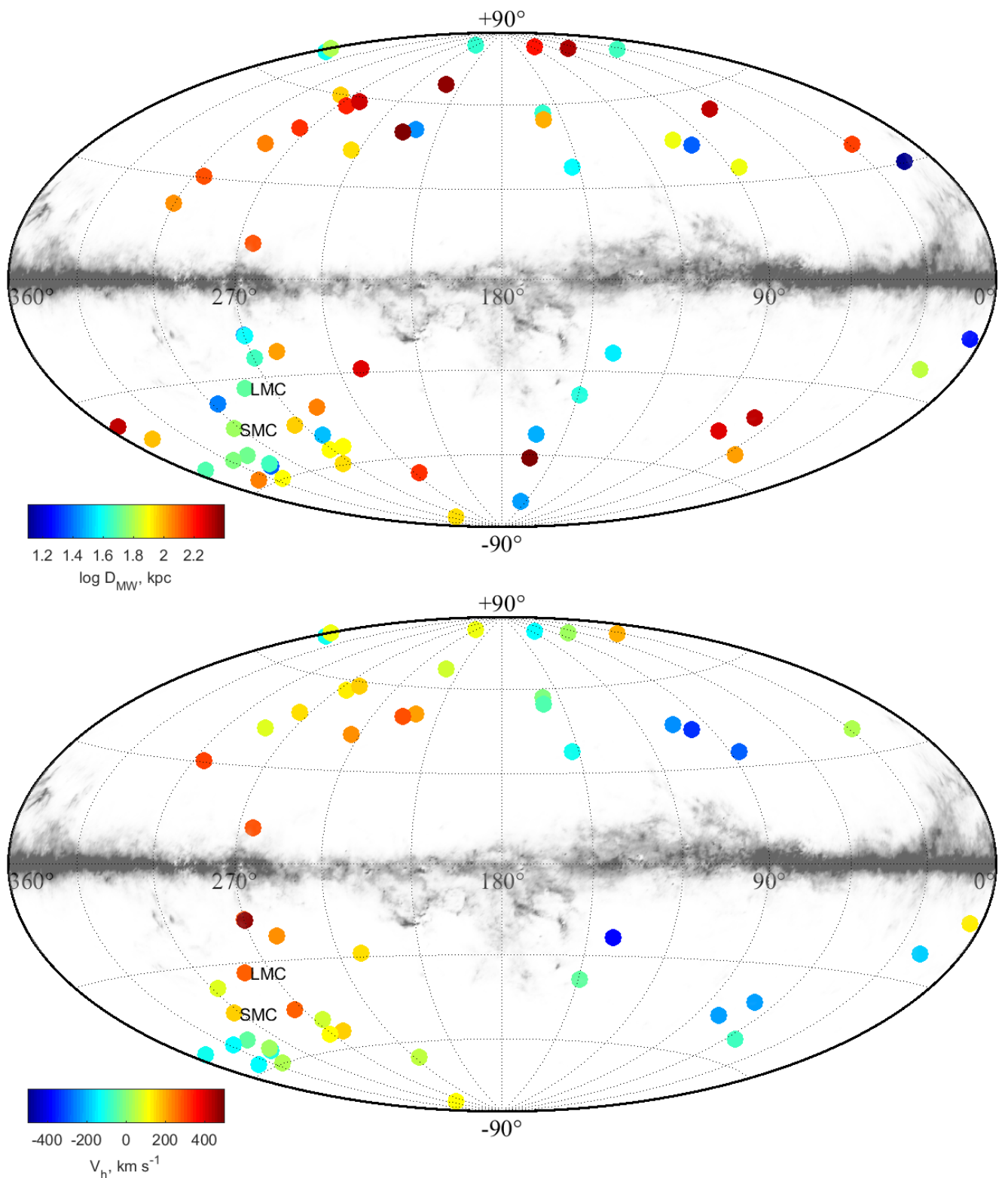


Рисунок 1.1 — Распределение спутников Млечного Пути по небу в галактических координатах. Серым цветом показаны области большого поглощения во Млечном Пути. В центре карты находится антицентр Галактики. На верхней панели цветом показано распределение спутников по галактоцентрическому расстоянию, а на нижней — их гелиоцентрические радиальные скорости.

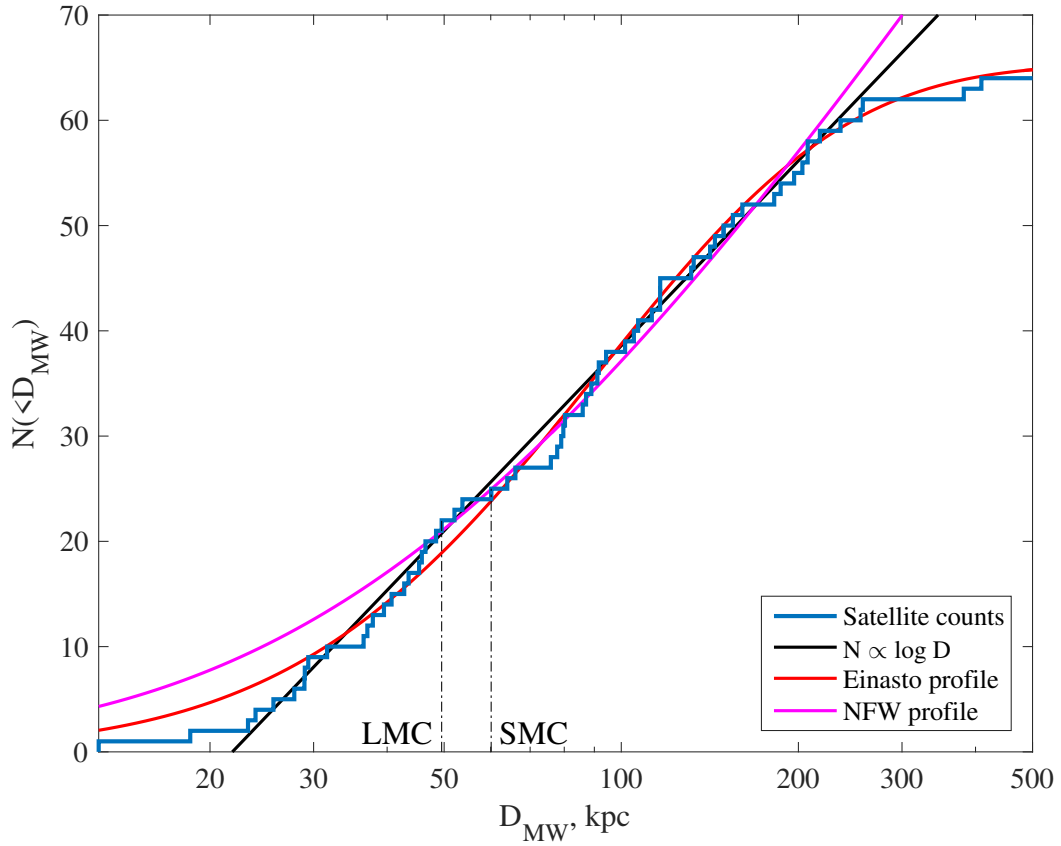


Рисунок 1.2 — Кумулятивное распределение числа спутников в зависимости от расстояния от галактического центра (синяя линия). Линейная регрессия показана черной сплошной линией, а красная и пурпурная линии соответствуют профилям Эйнасто и NFW, соответственно.

Распределение плотности числа спутников хорошо описывается профилем Эйнасто [84],  $n \propto \exp(-0.82r^{0.46})$ , за исключением самых внутренних частей звёздного гало Млечного Пути,  $D_{MW} \lesssim 30$  кпк (соответствующий профиль показан красной линией на рис. 1.2). Наблюдаемое отсутствие карликовых галактик вблизи диска, вероятно, вызвано их разрушением в приливном поле Млечного Пути. Профиль Наварро-Френка-Уайта [NFW, 85] переоценивает количество галактик на очень больших расстояниях от Млечного Пути,  $D_{MW} \gtrsim 260$  кпк, однако, он хорошо работает на меньших расстояниях вплоть до Большого Магелланова Облака (БМО),  $D_{MW} \sim 50$  кпк (профиль показан пурпурной линией на рис. 1.2).

За пределами 260 кпк от Млечного Пути наблюдается хорошо заметный разрыв в распределении спутников на диаграмме скорость-расстояние (рис. 1.3). Следующие карликовые галактики появляются только на расстоянии около  $D_{MW} \approx 400$  кпк. Они также отличаются по кинематике. Внутри 260 кпк спутники очень хорошо рандомизированы вокруг Млечного Пути по скоростям, в то время как на расстояниях около 400 кпк все галактики имеют отрицательные лучевые ско-

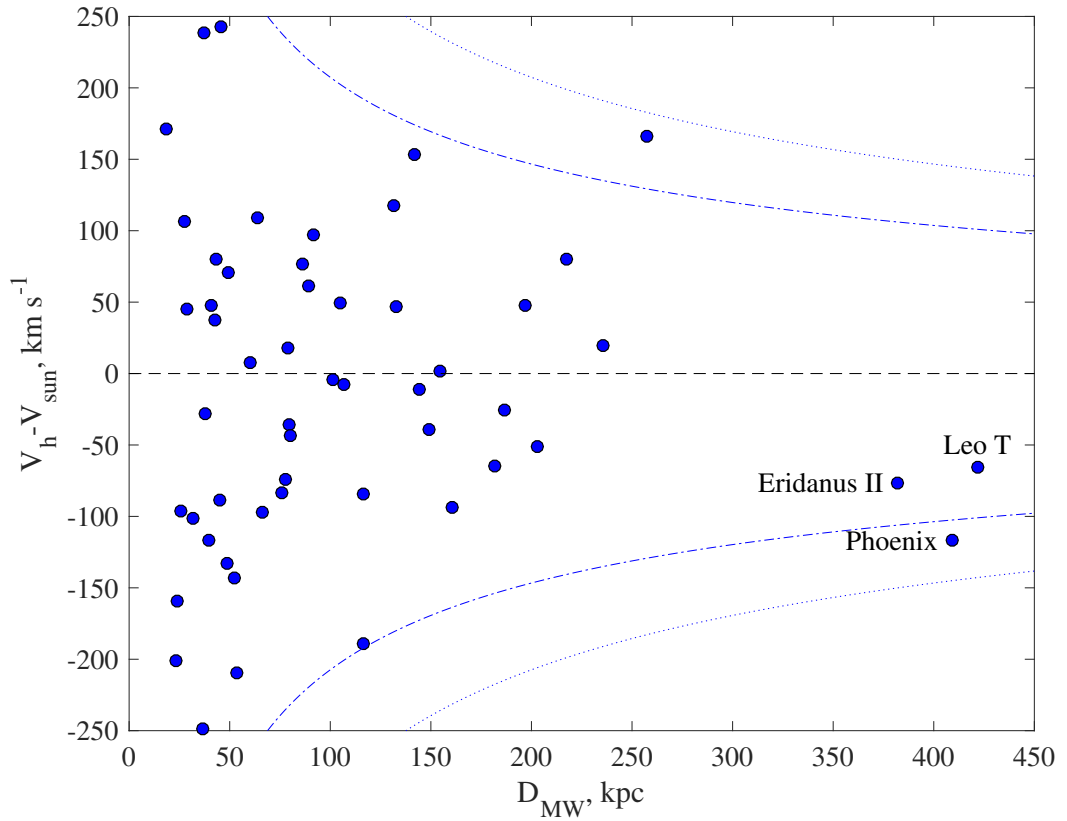


Рисунок 1.3 — Распределение ближайших галактик по скоростям и галактоцентрическим расстояниям. Лучевая скорость скорректирована за движение Солнца в Галактике. Штрих-пунктирная и пунктирная голубые линии соответствуют круговой скорости и скорости убегания для точечной массы  $1 \times 10^{12} M_{\odot}$ , соответственно.

рости. Это указывает на то, что Eridanus II, Phoenix и Leo T только начали свое первое падение в гало Млечного Пути. Из этого можно сделать вывод, что вириальная зона нашей Галактики простирается по крайней мере до 260, но не далее 380 кпк. Поэтому для дальнейшего анализа мы используем только галактики в пределах 260 кпк от Млечного Пути.

Большинство радиальных скоростей в нашей выборке были взяты из работы [23] с последними обновлениями из работы [25] и из оригинальных статей. Несколько недостающих галактик, а именно ММО, БМО, Crater, Bootes III, Sagittarius dSph, были добавлены из базы данных галактик Местного Объёма<sup>1</sup> [72]. В общей сложности 79 процентов спутников в вириальной зоне Млечного Пути (50 из 63) имеют точные измерения лучевой скорости с типичной ошибкой менее  $2 \text{ km s}^{-1}$ . На нижней панели рис. 1.1 представлено распределение лучевых скоростей спутников по небу в галактических координатах. Видно, что

<sup>1</sup><https://www.sao.ru/lv/lvgdb/>

в распределении скоростей чётко прослеживается крупномасштабная дипольная структура с отрицательными скоростями в направлении движения Солнца вокруг галактического центра,  $(l, b) \approx (90^\circ, 0^\circ)$  и положительными скоростями в противоположном направлении,  $(l, b) \approx (270^\circ, 0^\circ)$ .

Хотя в распределение галактик на рис. 1.1 хорошо видна вышеупомянутая плоскость спутников и явная концентрация объектов в направлении системы БМО/ММО, тем не менее видно, что небесная сфера заполнена спутниками достаточно хорошо. Это позволяет исследовать полное трёхмерное коллективное движение системы карликовых галактик вокруг Млечного Пути, и оценить направление и величину солнечного апекса относительно этих галактик.

### 1.3 Бегущий апекс Солнца

#### 1.3.1 Движение Солнца в Галактике

В нашем анализе мы используем параметры движения и расположения Солнца в Галактике из обзора Bland-Hawthorn & Gerhard [18], где авторы собрали и систематизировали информацию о структуре и свойствах Млечного Пути. В частности, мы предполагаем, что Солнце находится на расстоянии  $8.2 \pm 0.1$  кпк от галактического центра и на  $25 \pm 5$  пк над плоскостью Галактики. Движение Солнца относительно местного стандарта покоя (LSR) описывается вектором  $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (10.0 \pm 1, 11.0 \pm 2, 7.0 \pm 0.5)$  км с<sup>-1</sup>, где  $U_\odot$  соответствует движению к галактическому центру,  $V_\odot$  — скорость в направлении вращения, а  $W_\odot$  — компонента скорости, перпендикулярная плоскости диска в направлении северного полюса Галактики. Угловое движение Солнца в плоскости Галактики относительно компактного радиоисточника Sgr A\*, связанного со сверхмассивной черной дырой в центре Млечного Пути, составляет  $\Omega_\odot = 30.24 \pm 0.12$  км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup> [86; 87]. Это соответствует тангенциальной скорости Солнца  $V_{g,\odot} = 248 \pm 3$  км с<sup>-1</sup>. Объединяя все вышесказанное, мы получаем, что компоненты движения Солнца относительно галактического центра составляют  $(U, V, W) = (10.0 \pm 1, 248 \pm 3, 7.0 \pm 0.5)$  км с<sup>-1</sup>. Поскольку коллективное движение LSR относительно кругового движения в Галактике остается неопределенным,  $V_{\text{LSR}} = 0 \pm 15$  км с<sup>-1</sup>,

Bland-Hawthorn & Gerhard [18] оценили круговую скорость Галактики в окрестностях Солнца равной  $238 \pm 15 \text{ км с}^{-1}$ .

### 1.3.2 Измерение апекса Солнца

Гелиоцентрическая лучевая скорость  $V_h$  спутников Млечного Пути может быть представлена как:

$$V_h = (\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_\odot) \cdot \mathbf{n} + \varepsilon, \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{V}_\odot$  — трёхмерный вектор движения Солнца в Галактике,  $\mathbf{V}_g$  — вектор скорости спутника относительно Галактики,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор направления на спутник, и  $\varepsilon$  — случайная ошибка измерения скорости.

Предполагая, что движение спутников в вириальной области некоррелированы, мы можем рассматривать лучевую скорость галактики,  $\mathbf{V}_g \cdot \mathbf{n}$ , как случайную величину со средним значением равным нулю и дисперсией порядка  $100 \text{ км с}^{-1}$ . В этом случае расчет солнечного апекса сводится к задаче линейной регрессии:

$$V_h = -\mathbf{V}_\odot \cdot \mathbf{n} + \varepsilon, \quad (1.2)$$

где модельная “ошибка”,  $\varepsilon$ , представляет собой сумму случайной величины, связанной с неизвестным направлением движения галактики, и ошибки измерения скорости. Стандартные ошибки трёх компонент вектора скорости Солнца,  $\mathbf{V}_\odot$ , оцениваются стандартным способом с помощью ковариационной матрицы и остаточной дисперсии линейной регрессии (1.2). Для удобства вектор движения Солнца переводится в сферические галактические координаты, а его ошибки преобразуются в соответствии со стандартной процедурой переноса погрешностей. Отметим также, что погрешности измерений  $\sim 1\text{--}2 \text{ км с}^{-1}$  пренебрежимо малы по сравнению с дисперсией скоростей спутников в гравитационном поле Млечного Пути. Кроме того, солнечный апекс, определенный по спутникам, содержит информацию не только о движении Солнца в Галактике, но и о коллективных движениях окружающих галактик. Поскольку данная модель ориентирована исключительно на анализ распределения скоростей, ошибки в расстоянии до спутников не влияют на полученное решение. Неопределённость расстояний может лишь незначительно повлиять на состав подвыборки галактик из-за вариации их расстояний.

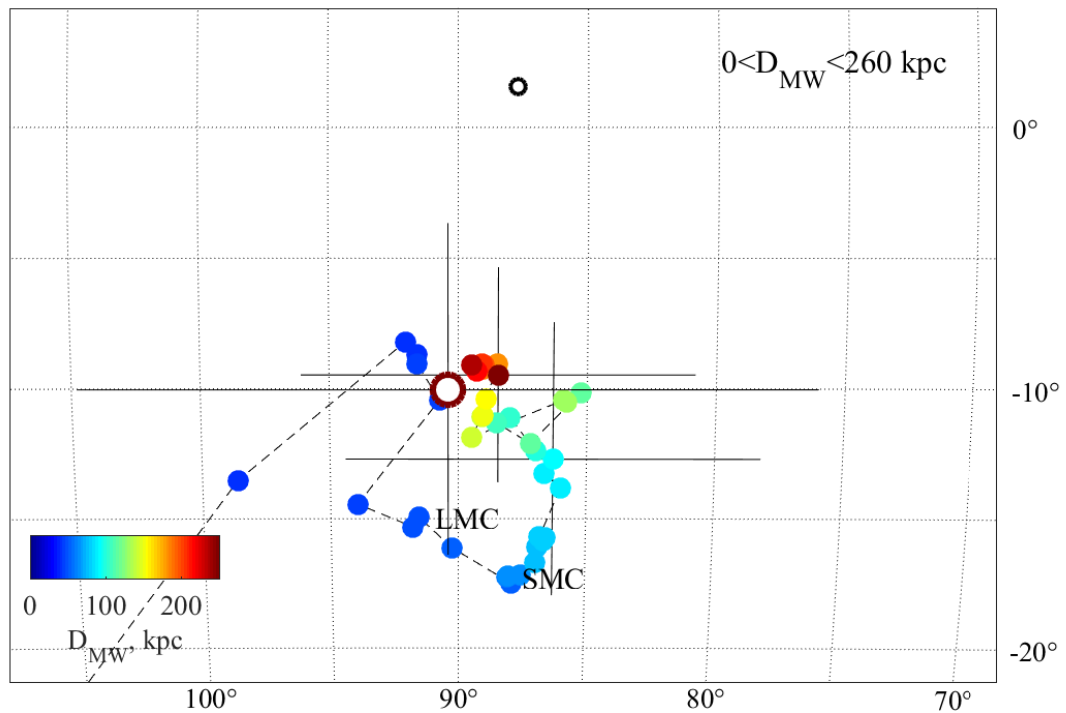


Рисунок 1.4 — “Дрейф” бегущего апекса Солнца в галактических координатах. “Траектория” апекса показана пунктирной линией. Цвет точек соответствует глубине выборки, а именно расстоянию до самой дальней галактики в выборке. Ошибки оценки апекса показаны только для двух подвыборок 0–100 и 0–260 кпк. Большой коричневый кружок с ошибками соответствует подвыборке галактик от 100 до 260 кпк. Маленький черный кружок указывает апекс Солнца в нашей Галактике. Его размер примерно соответствует погрешностям измерений.

Отсортировав спутники в порядке возрастания расстояния от центра Млечного Пути, мы определяем солнечный апекс в зависимости от текущего числа рассматриваемых галактик,  $k$ , и, собственно, от расстояния от центра Галактики. Несмотря на то, что каждая последующая оценка не является статистически независимой от предыдущих, такой подход позволяет выявить тенденции в поведении солнечного апекса. По сути, эта методология в основных деталях повторяет анализ движения нашей Галактики относительно её соседей в Местном Объёме [51].

“Дрейф” солнечного апекса на небе показан на рис. 1.4. На малых расстояниях апекс рыскает по небу, а его амплитуда скачет из-за малого размера выборок. Затем точки концентрируются вокруг направления  $(l, b) = (+86^\circ, -16^\circ)$  с амплитудой  $\sim 390 \text{ км с}^{-1}$ . После чего происходит переход к стационарному значению  $(l, b, V) = (+88^\circ, -9^\circ, 300 \text{ км с}^{-1})$  для всей выборки спутников в пределах 260 кпк. Апекс систематически (на уровне 2–2.5 сигмы) дрейфует ниже ожидаемого направления движения Солнца в Галактике.

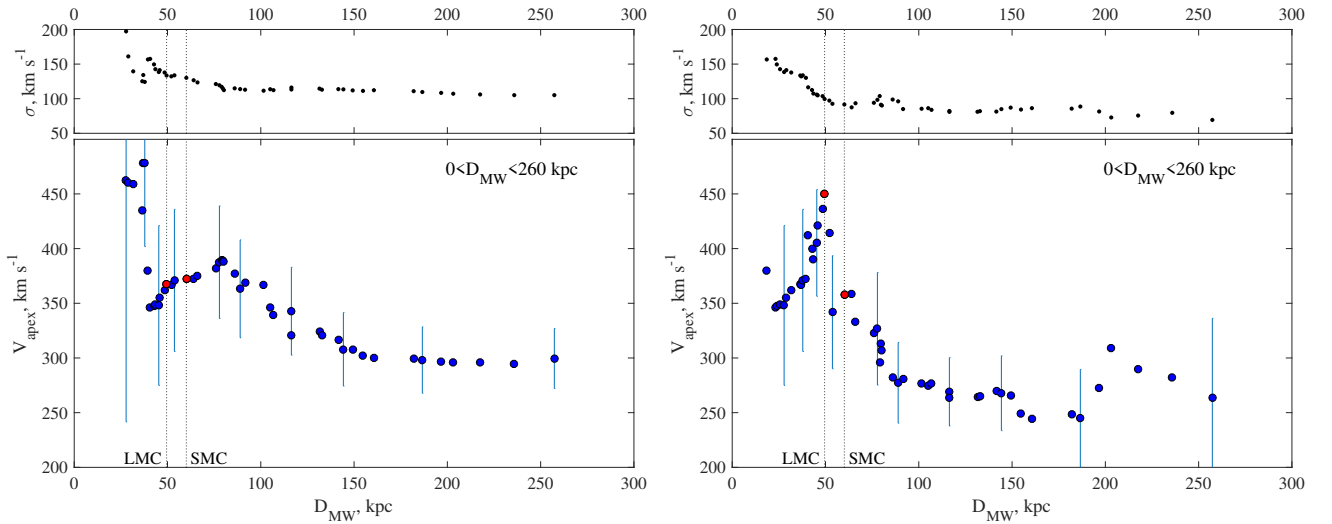


Рисунок 1.5 — “Эволюция” скорости апекса с галактоцентрическим расстоянием. Стандартное отклонение разброса остаточных скоростей показано на верхних панелях. Бары ошибок показаны только для каждого пятого измерения, чтобы не загромождать рисунок. *Слева:* Бегущий апекс в зависимости от глубины выборки спутников. Выборки, впервые содержащие LMC и SMC, отмечены красным цветом. *Справа:* Поведение амплитуды сглаженного солнечного апекса, оцененного по 21 спутнику для каждой точки. Апексы, центрированные на БМО (LMC) и ММО (SMC), также отмечены красным цветом.

Изменение амплитуды апекса и стандартного отклонения остаточных скоростей с глубиной выборки представлено на левой панели рис. 1.5. Обращает на себя внимание тот факт, что скорость апекса, определенная для близких галактик, оказывается систематически выше, чем для более полной выборки, включающей далекие спутники. Переход между этими двумя стационарными точками происходит на расстоянии около 100 кпк, разделяя спутники Млечного Пути на условно внутренние и внешние.

Эта особенность становится еще более заметной, если мы построим график бегущего апекса, оцененного для каждого спутника, включая 10 галактик до и после него в упорядоченном списке. Этот подход похож на сглаживание данных с помощью фильтра скользящего среднего. В результате каждая точка на правой панели рис. 1.5 соответствует солнечному апексу, определенному по движению 21 объекта (разумеется, мы учитываем только данные, попадающие в окно сглаживания, а вблизи границ число рассматриваемых галактик меньше 21, опускаясь до 11 для первой и последней галактики в выборке). Амплитуда апекса, определенная для внутренних галактик, расположенных на расстоянии менее  $\sim 80$  кпк, систематически превышает  $300 \text{ км с}^{-1}$ , достигая максимума в  $450 \text{ км с}^{-1}$  для БМО.

Таблица 2 — Апекс Солнца, оцененный по разным выборкам спутников нашей Галактики

| Sample                      | N  | $\sigma$<br>км с <sup>-1</sup> | $U$<br>км с <sup>-1</sup> | $V$<br>км с <sup>-1</sup> | $W$<br>км с <sup>-1</sup> | $l$<br>°        | $b$<br>°        | $V$<br>км с <sup>-1</sup> | $t$ |
|-----------------------------|----|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----|
| Sun                         |    |                                | $+10 \pm 1$               | $+248 \pm 3$              | $+7 \pm 1$                | $+87.7 \pm 0.2$ | $+1.6 \pm 0.1$  | $248 \pm 3$               |     |
| $0 < D_{\text{MW}} < 100$   | 31 | 113                            | $+23 \pm 51$              | $+359 \pm 44$             | $-81 \pm 33$              | $+86.3 \pm 8.1$ | $-12.7 \pm 5.3$ | $369 \pm 44$              | 3.5 |
| $30 < D_{\text{MW}} < 85$   | 22 | 101                            | $+71 \pm 54$              | $+414 \pm 54$             | $-110 \pm 35$             | $+80.2 \pm 7.4$ | $-14.7 \pm 4.8$ | $435 \pm 53$              | 4.3 |
| $35 < D_{\text{MW}} < 81$   | 21 | 100                            | $+82 \pm 54$              | $+430 \pm 55$             | $-106 \pm 34$             | $+79.3 \pm 7.0$ | $-13.6 \pm 4.6$ | $450 \pm 54$              | 4.5 |
| $30 < D_{\text{MW}} < 100$  | 25 | 105                            | $+62 \pm 54$              | $+384 \pm 48$             | $-79 \pm 32$              | $+80.8 \pm 7.9$ | $-11.5 \pm 4.8$ | $397 \pm 48$              | 3.7 |
| $0 < D_{\text{MW}} < 260$   | 50 | 105                            | $+8 \pm 39$               | $+295 \pm 28$             | $-49 \pm 21$              | $+88.5 \pm 7.6$ | $-9.5 \pm 4.1$  | $300 \pm 27$              | 3.0 |
| $30 < D_{\text{MW}} < 260$  | 44 | 101                            | $+22 \pm 41$              | $+295 \pm 28$             | $-45 \pm 21$              | $+85.8 \pm 8.0$ | $-8.6 \pm 4.0$  | $300 \pm 28$              | 2.8 |
| $100 < D_{\text{MW}} < 260$ | 19 | 84                             | $-2 \pm 62$               | $+245 \pm 37$             | $-43 \pm 27$              | $+90 \pm 14$    | $-10.0 \pm 6.4$ | $249 \pm 37$              | 1.7 |

Это значение статистически значимо превышает скорость Солнца в Галактике  $248 \text{ км с}^{-1}$  на уровне 4 сигма. Поведение сглаженного апекса для спутников на расстояниях больших  $\sim 80$  кпк резко успокаивается и образует плато со скоростью  $\sim 270 \text{ км с}^{-1}$ .

Сравнение двух подходов показывает, что внутренние галактики с расстояниями  $D_{\text{MW}} < 100$  кпк ответственны как за систематическое отклонение апекса для всей выборки спутников, так и за их более высокую дисперсию скоростей.

Солнечный апекс, оцененный только по выборке внешних спутников,  $100 < D_{\text{MW}} < 260$  кпк, вне “зоны перехода”, равен  $(l, b, V) = (90 \pm 14^\circ, -10 \pm 6^\circ, 249 \pm 37 \text{ км с}^{-1})$  со стандартным отклонением остаточных скоростей  $84 \text{ км с}^{-1}$ . Это значение хорошо согласуется с известным движением Солнца в Галактике. Положение солнечного апекса для внешних спутников отмечено на рис. 1.4 большим незаполненным коричневым кружком с усами ошибок.

Полученные результаты обобщены в таблице 2. В её колонках содержится: 1) критерий отбора спутников в выборку; 2) количество, N, галактик в выборке; 3) стандартное отклонение,  $\sigma$ , остаточных скоростей в модели (1.2); 4, 5 и 6) пространственные,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , компоненты вектора скорости Солнца; 7, 8 и 9) апекс Солнца,  $(l, b)$ , в галактических координатах и его скорость,  $V$ ; и 10)  $t$ -статистика, характеризующая значимость отклонения апекса Солнца, оцененного по движению спутников, от движения Солнца в Галактике. Для удобства в первой строке таблицы показаны параметры апекса Солнца в Галактике из обзора [18], описанные в разделе 1.3.1.

### 1.3.3 Квадрупольный член распределения лучевых скоростей

Приливное влияние на движение соседних галактик должно проявляться в квадрупольном члене распределения скоростей спутников. Соответствующая модель может быть записана в матричной форме как:

$$V_h = -\mathbf{n}^T \mathbf{V}_\odot + \mathbf{n}^T \mathbf{H} \mathbf{n} + \varepsilon, \quad (1.3)$$

где  $V_h$  — наблюдаемая гелиоцентрическая скорость спутника,  $\mathbf{V}_\odot$  — вектор скорости Солнца,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении на спутник,  $\mathbf{H}$  — симметричная матрица, ( $H_{ij} = H_{ji}$ ), с нулевым следом,  $\sum H_{ii} = 0$ , описывающая квадрупольную анизотропию поля скоростей, и  $\varepsilon$  — случайная компонента скорости.

Мы нашли совместные решения для апекса Солнца и квадрупольного члена поля скоростей как для полной выборки галактик,  $0 < D_{MW} < 260$ , так и для подвыборок внутренних,  $D_{MW} < 100$ , и внешних,  $D_{MW} > 100$ , спутников, с учетом и без учета наиболее близких галактик,  $D_{MW} < 30$  кпк, которые должны быть больше всего подвержены влиянию нашей Галактики. Ни в одной из рассмотренных выборок значимость квадрупольного члена не превышает уровня 3 сигма. Наиболее значимое решение,  $\approx 2.8$  сигма, получено для подвыборки из 31 внутреннего спутника,  $0 < D_{MW} < 100$  кпк. Однако, исключение из рассмотрения ближайших галактик,  $D_{MW} < 30$  кпк, полностью уничтожает квадрупольный член, и его отличие от нуля становится мизерным, 1.1 сигма. Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшие отклонения от дипольного распределения связаны с движением ближайших шести спутников нашей Галактики. На динамике этих спутников может сказываться сильное приливное влияние нашей Галактики и динамическое трение в гало Млечного Пути.

## 1.4 Две популяции спутников

Анализ радиальных скоростей спутников Млечного Пути позволяет предположить существование двух кинематически различных популяций.

Внешние спутники (19 объектов), расположенные дальше 100 кпк, демонстрируют случайное распределение лучевых скоростей относительно нашей Га-

Таблица 3 — Дополнительный дипольный член по отношению к движению Солнца в Галактике

| Sample                     | N  | $l$<br>°     | $b$<br>°     | $V$<br>км с <sup>-1</sup> | $t$ |
|----------------------------|----|--------------|--------------|---------------------------|-----|
| $0 < D_{\text{MW}} < 100$  | 31 | $+83 \pm 26$ | $-38 \pm 15$ | $142 \pm 40$              | 3.5 |
| $30 < D_{\text{MW}} < 85$  | 22 | $+70 \pm 17$ | $-34 \pm 11$ | $212 \pm 49$              | 4.3 |
| $35 < D_{\text{MW}} < 81$  | 21 | $+69 \pm 16$ | $-30 \pm 10$ | $226 \pm 50$              | 4.5 |
| $30 < D_{\text{MW}} < 100$ | 25 | $+69 \pm 21$ | $-31 \pm 13$ | $169 \pm 45$              | 3.7 |

лактики с дисперсией  $84 \text{ км с}^{-1}$ . Дипольный член распределения скоростей находится в достаточно хорошем согласии с движением Солнца во Млечном Пути. Это согласуется со стандартными представлениями о кинематике групп галактик и современным космологическим моделированием.

С другой стороны, апекс, определенный по близким спутникам в пределах 100 кпк, демонстрирует значительное отклонение от известного движения Солнца в Галактике. Таблица 3 обобщает информацию об этих отклонениях для четырех подвыборок внутренних спутников. Дополнительный дипольный компонент в распределении скоростей наиболее ярко выражен на уровне 4.5 сигма в кинематике 21 галактики, расположенных на расстояниях от 35 до 81 кпк от центра Галактики. Создается впечатление, что Млечный Путь летит сквозь рой внутренних спутников со скоростью  $226 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  в направлении  $(l, b) = (+69 \pm 16^\circ, -30 \pm 10^\circ)$ . Этот результат кажется удивительным, поскольку спутники в пределах 100 кпк должны быть вириализованы и вероятность сохранения когерентных движений мала.

#### 1.4.1 Первый пролет

На самом деле, мы ожидаем, что скоррелированное движение спутников может сохраниться только при первом прохождении галактик через гало массивной галактики. Этот сценарий подтверждается недавней работой, в которой Hammer et al. [24] проанализировали трёхмерные скорости, угловой момент и полную энергию 40 спутников Млечного Пути, используя данные *Gaia*. Они утверждают, что

ближайшие карлики,  $D_{\text{MW}} < 60$  кпк, не являются долгоживущими спутниками, а вошли в группу Млечного Пути  $\leq 2$  Гуг назад и совершают свой первый пролет вокруг нашей Галактики. Это также согласуется с тем, что звёздное население этих карликовых галактик состоит из небольшой доли молодых звёзд. БМО — наиболее крупная галактика, которая недавно впервые прошла перицентр своей орбиты вокруг нашей Галактики [39]. Считается, что она вошла в вириальную зону Млечного Пути около 1–3 млрд. лет назад. Вместе со своим эскортом [50] БМО может создавать значительный эффект коллективного движения с амплитудой около  $200 \text{ км с}^{-1}$ . Однако, стоит отметить, что, используя собственные движения 52 карликовых сфероидальных галактик, Pace et al. [25] не нашли никаких доказательств того, что большинство спутников Млечного Пути расположено вблизи их перицентра.

Рисунок 1.5 указывает на то, что особенности кинематики внутренних спутников связаны именно с движением БМО. Действительно, максимум коллективного движения спутников наблюдается при рассмотрении слоя из 21 галактики в интервале  $35 \lesssim D_{\text{MW}} \lesssim 80$  кпк, центрированном на БМО.

Однако, простой тест с исключением из рассмотрения БМО и всего эскорта карликовых галактик с близкими скоростями, расстояниями и положением на небе, а именно Tucana IV, Pictor II, Tucana V, Tucana II и ММО, уменьшает амплитуду этого необычного движения, но не меняет картину качественно. Коллективный поток относительно центра Галактики остальных 26 спутников в пределах  $D_{\text{MW}} = 100$  кпк составляет  $136 \pm 44 \text{ км с}^{-1}$ . При исключении Hydrus I, Carina III, Reticulum II, Carina II, Horologium II, Horologium I и Phoenix II как наиболее вероятных членов группы БМО, согласно [50] и [88], значимость коллективного движения внутри  $D_{\text{MW}} < 100$  кпк падает до уровня 2.4 сигма ( $V = 146 \pm 62 \text{ км с}^{-1}$  по 19 галактикам). Этот случай показан на верхней панели рис. 1.6. Если исключить также потенциальных членов свиты БМО: Tucana III, Draco II, Grus II, Reticulum III, Grus I, Pictor I и Hydra II, то значимость коллективного движения уменьшится еще больше, однако, при этом в выборке внутренних спутников останется всего 15 галактик.

Также мы опробовали другой способ — найти спутники, наиболее ответственные за отклонение бегущего апекса относительно близких галактик от апекса Солнца. Чтобы этого добиться, мы ищем галактику, исключение которой из рассмотрения обеспечивает наибольшее подавление дипольного компонента, дополнительного к апексу Солнца в нашей Галактике. Исключив эту галактику из

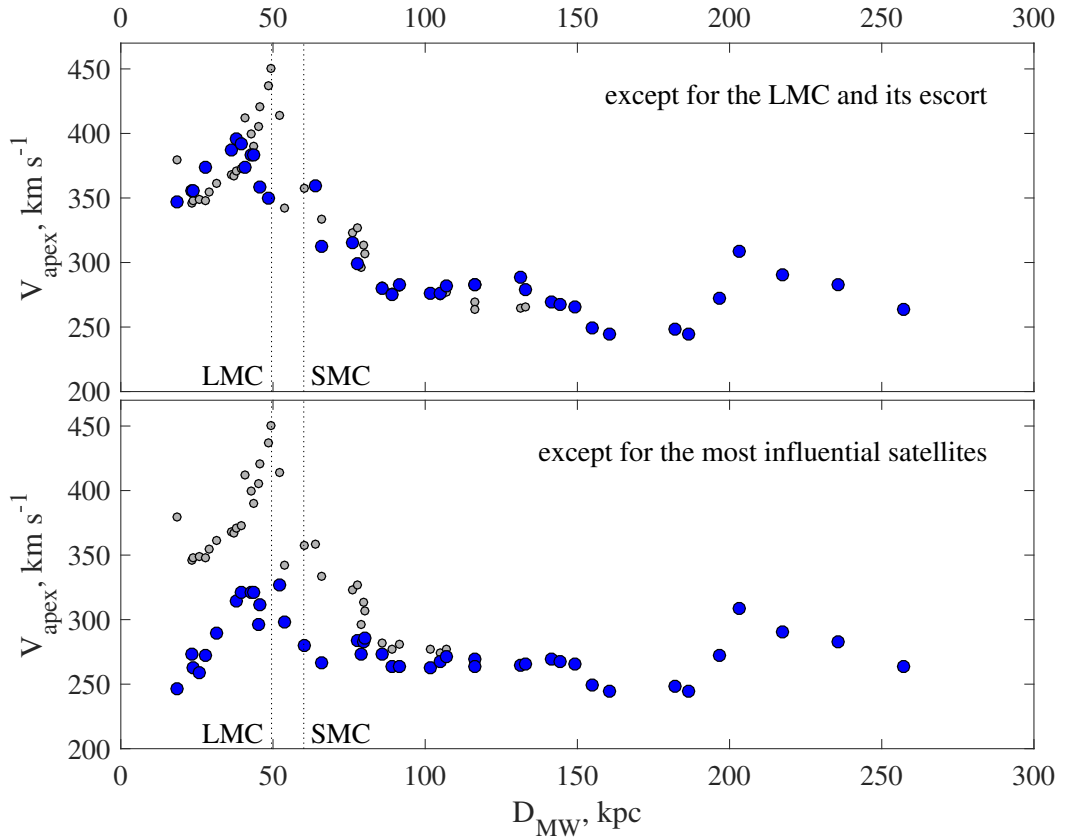


Рисунок 1.6 — Поведение амплитуды сглаженного апекса после удаления некоторых спутников. Маленькие светло-серые точки соответствуют полной выборке, как это показано на правой панели рис. 1.5. *Верхняя панель:* из рассмотрения исключены БМО и 12 наиболее вероятных членов его эскорта. Из графика на верхней панели видно, что эффект падения группы спутников, связанных с БМО, не может полностью объяснить наблюдаемые вариации апекса Солнца. *Нижняя панель:* исключены 8 наиболее сильно влияющих галактик.

рассмотрения, мы итеративно повторяем предыдущий шаг, пока максимальная значимость отклонения не опустится ниже  $t = 2$ . Результирующее поведение сглаженной скорости апекса показано на нижней панели рис. 1.6. Наибольший вклад в отклонение апекса от солнечного вносит Carina II. Её исключение снижает значимость дополнительного диполя с  $t = 4.5$  до 3.6. Галактика с наибольшей отрицательной скоростью среди спутников Млечного Пути, Triangulum II, является вторым по влиянию спутником. Вместе с Bootes I они обеспечивают значимость отклонения от солнечного апекса выше 3 сигм. Дальнейшее исключение Draco, БМО, Segue 2, Carina III и Grus II делает значимость дополнительного диполя меньше  $t = 2$ . Важно подчеркнуть, что 4 из этих 8 галактик входят в группу БМО по данным [50] и [88]. Это поддерживает гипотезу о том, что поведение апекса связано с первым пролетом этой группы галактик вокруг Млечного Пути.

С другой стороны, половина из восьми наиболее влияющих галактик не связана напрямую с БМО, и это может указывать на то, что гравитационное влияние БМО возмущает их движение.

#### 1.4.2 Возможное вращение подсистемы внутренних спутников Млечного Пути

Возможным объяснением наблюдаемого коллективного движения внутренних спутников может быть глобальное вращение этой подсистемы вокруг нашей Галактики. Этот эффект создаст в поле лучевых скоростей узор, имитирующий дипольное распределение, однако, он должен зависеть от расстояния до объектов. Как следствие, дипольное решение будет существенно отличаться от истинного апекса, связанного с движением Солнца в Галактике. Отметим, что из-за проекционных эффектов компонента псевдовектора удельного углового момента, направленная к центру вращения, не вносит никакого вклада в поле радиальных скоростей. Поэтому максимум и минимум наблюдаемого поля скоростей, связанного с вращением, всегда будут перпендикулярны направлению на центр Галактики, другими словами, они будут иметь галактическую долготу  $90$  или  $270^\circ$ . Наблюдаемая ориентация диполя, дополнительного к солнечному апексу (см. Таблицу 3), имеет долготу  $70\text{--}80^\circ$ , что согласуется с предположением о вращении подсистемы спутников.

Эта гипотеза находит подтверждение при изучении плоскостей спутников. Используя собственные движения 11 классических спутников Млечного Пути, Pawlowski & Kroupa [34] обнаружили когерентное выравнивание орбит для большинства (от 7 до 9) из рассматриваемых спутников. Это указывает на то, что обширная полярная структура спутников образует стабилизированную вращением плоскость вокруг Галактики. Более того, Ibata et al. [35] показали, что плоская структура спутников вокруг галактики Андромеды вращается вокруг центральной галактики. Эти открытия убедительно показывают, что значительное число спутников имеет одинаковые динамические свойства орбит и направление углового момента. Таким образом, когерентное вращение спутниковых подсистем может быть широко распространенным явлением.

Простая модель поля радиальных скоростей, учитывающая вращение системы с постоянной круговой скоростью, может быть описана уравнением:

$$V = \mathbf{S} \times \mathbf{n}_{\text{MW}} \cdot \mathbf{n}_{\odot} + \varepsilon, \quad (1.4)$$

где  $V$  — радиальная скорость галактики с поправкой на апекс Солнца в Галактике; для псевдовектора спина,  $\mathbf{S}$ , могут быть определены только две тангенциальные компоненты;  $\mathbf{n}_{\text{MW}}$  и  $\mathbf{n}_{\odot}$  — единичные векторы в направлении на рассматриваемую галактику из центра Млечного Пути и от Солнца, соответственно. Принимая во внимание свойства скалярного тройного произведения, легко показать, что наблюдаемая пекулярная компонента поля скоростей, связанная с вращением системы, убывает обратно пропорционально расстоянию до галактики,  $V \propto S/D_{\text{MW}}$ . В результате для объяснения даже небольшой пекулярной скорости далеких галактик может потребоваться большая скорость вращения. Эта модель хорошо описывает наблюдаемое поле лучевых скоростей спутников. Стандартное отклонение скоростей, равное  $105 \text{ км с}^{-1}$  для подвыборки спутников, находящихся в диапазоне расстояний  $30 < D_{\text{MW}} < 85 \text{ кпк}$ , лишь немного превышает разброс в  $101 \text{ км с}^{-1}$  для дипольного решения. Однако, эта модель требует невероятно высокой круговой скорости, равной  $970 \pm 260 \text{ км с}^{-1}$ , которая не может быть физически обоснована.

Тем не менее, стоит отметить, что тангенциальные скорости, не включенные в наш анализ, несут ключевую информацию, позволяющую отличить вращение от дипольного движения спутников, как подчеркивается в работе Petersen & Peñarrubia [89].

## 1.5 Влияние БМО на солнечный апекс

Одним из возможных объяснений наблюдаемого коллективного движения внутренних спутников может быть влияние БМО на положение Галактики в её гало. Недавние исследования показывают, что полная масса БМО должна быть порядка  $1\text{--}2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , что составляет значительную долю массы гало Млечного Пути. Наличие такого близкого и массивного соседа неизбежно отразится на динамике всей системы [90; 91]. В частности, ожидается, что Млечный Путь будет ускоряться относительно своих окраин за пределами 30 кпк. Используя выборку

из примерно 500 звёзд в далеком гало нашей Галактики, Erkal et al. [44] обнаружили асимметрию в распределении радиальных скоростей, которая согласуется с ускорением внутреннего гало, обусловленным гравитационным влиянием БМО.

В своих исследованиях Petersen & Peñarrubia [89; 92] утверждают, что БМО может влиять на нашу Галактику различными способами. В частности, есть свидетельства того, что диск Млечного Пути движется относительно звёздных трассеров во внешнем гало со скоростью  $32 \pm 4 \text{ км с}^{-1}$  в направлении, которое указывает на более раннее положение БМО на его траектории. Результирующее движение обнаруживается в кинематике звёзд внешнего гало и спутников Млечного Пути.

В нашей работе мы проверяем гипотезу о том, что массивная галактика, движущаяся через гало Млечного Пути, может вызвать заметную дипольную картину в распределении скоростей спутников, подобную той, что наблюдается на нижней панели рис. 1.1. В частности, как было сказано выше, мы изучаем влияние БМО на распределение лучевых скоростей объектов в гало Млечного Пути.

### 1.5.1 Апекс Солнца без возмущения, вызванного БМО

Мы начали изучение влияния БМО на наблюдаемые вариации солнечного апекса с изучения орбит спутников Млечного Пути. Мы используем методику, аналогичную описанной в работе [93], где сначала интегрируются движения спутников Млечного Пути (принимая во внимание полную информацию о 6D фазовом пространстве из [94]) назад по времени с учетом динамического трения БМО в гало Млечного Пути, влияющем на орбиту БМО, и движения нашей Галактики под воздействием со стороны БМО. На следующем шаге мы используем положения и скорости спутников (и Млечного Пути) и интегрируем всю систему вперед до настоящего момента времени, но исключая массу БМО из рассмотрения. Таким образом, после такого интегрирования назад-вперед во времени мы можем найти такую конфигурацию спутников Млечного Пути в фазовом пространстве при отсутствии БМО, что вызывает значительную кинематическую асимметрию в распределении спутников Млечного Пути [см. рис. 7 в 93].

В наших моделях БМО представляет собой одиночное сферическое NFW-гало с масштабной шкалой  $8.5 \text{ кпк} \times (M_{\text{LMC}}/10^{11} M_{\odot})^{0.6}$ , усеченное на 10 масштабных длинах, воспроизводящее наблюдаемую кривую вращения, если масса БМО

составляет около  $(1-3) \times 10^{11} M_{\odot}$  [95]. Мы исследуем диапазон возможных масс БМО  $(0.01-4) \times 10^{11} M_{\odot}$ , где нижний предел массы БМО выбран с целью проверки отсутствия возмущения, вызываемого БМО, на кинематику спутников Млечного Пути.

При интегрировании орбит галактика Млечный Путь представлена многокомпонентной составной потенциальной моделью, включающей сферическое гало тёмной материи, звёздный балдж, тонкий и толстый звёздные диски с параметрами, взятыми из работы McMillan [96]. Таким образом, в этих наших расчетах галактики БМО и Млечный Путь представлены потенциалами, а галактики-спутники рассматриваются как безмассовые пробные частицы. Мы выполняли интергрирование назад во времени на 5 млрд. лет в прошлое, что выводит массивную БМО далеко за пределы вириального радиуса Млечного Пути. В заключение, после интегрирования движения системы вперед по времени без влияния БМО и учета остаточного движения Млечного Пути в момент времени  $t = 0$ , мы использовали данные о спутниках в фазовом пространстве для расчета апекса Солнца.

На рис. 1.7 мы показываем бегущий солнечный апекс, рассчитанный после интегрирования орбит спутников Млечного Пути назад-вперед во времени, предполагая различные массы БМО, как указано на каждой из панелей. Для сравнения, на каждой панели сплошной черной линией показан наблюдаемый солнечный апекс. Заштрихованная область вокруг цветных линий показывает 1-сигма разброс решения, основанного на кинематике спутников Млечного Пути за последние 0.5 млрд. лет при прямом интегрировании. Видно, что как только мы убираем влияние БМО, поведение солнечного апекса существенно меняется. В частности, в моделях с  $M_{\text{LMC}} > 1.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ , внутренние спутники больше не демонстрируют наблюдаемую особенность. Амплитуда солнечного апекса показывает почти плоское поведение в случае  $M_{\text{LMC}} \approx 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , что близко к некоторым оценкам массы БМО [39; 42; 46; 95; 97—99], предполагающим сценарий первого падения БМО в гало нашей Галактики. Отметим также, что большая масса БМО ( $> 2.2 \times 10^{11} M_{\odot}$ ) приводит к более существенному возмущению кинематики спутников Млечного Пути, что отражается в пекулярном поведении бегущего апекса Солнца, что, таким образом, дает нам хорошее ограничение на массу БМО.

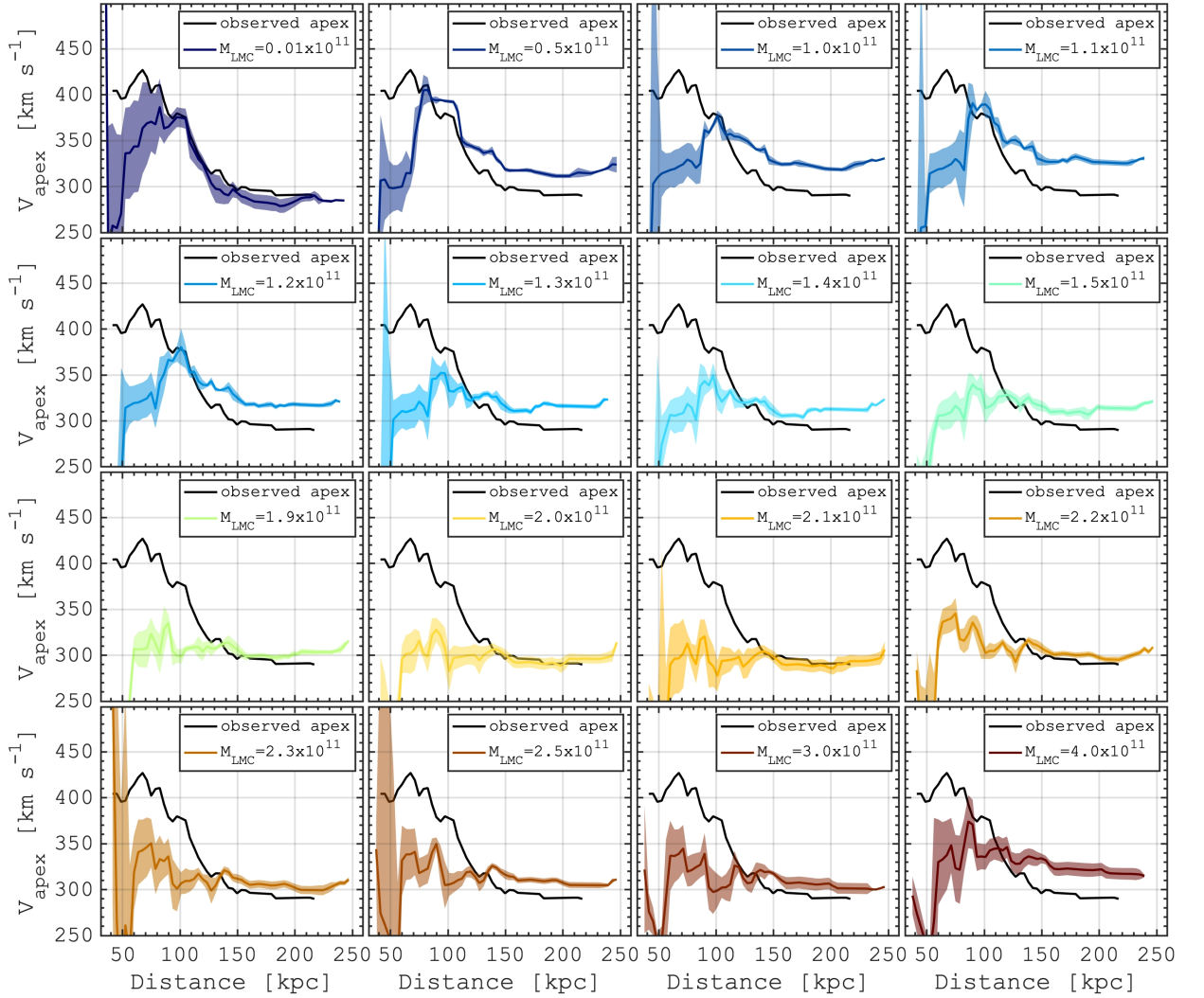


Рисунок 1.7 — Бегущий апекс Солнца на основе интегрирования орбит спутников Млечного Пути. Черные кривые одинаковы на всех панелях и показывают современный бегущий апекс Солнца. Цветные линии на разных панелях показывают вариацию апекса, рассчитанную после интегрирования орбит спутников, на 5 млрд. лет назад и затем вперед до сегодняшнего дня. При интегрировании назад во времени мы задаем определенную массу БМО, указанную в каждой из панелей; после этого мы удаляем БМО из системы и интегрируем орбиты всех спутников вперед. Такой подход позволяет проверить вклад массивного БМО в наблюдаемую кинематику спутников Млечного Пути. Видно, что в случае массивной БМО,  $\approx 1.4\text{--}2.2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , внутренняя особенность апекса ( $< 100\text{--}120$  кпк) уменьшается, что говорит о её обусловленности воздействием со стороны БМО.

### 1.5.2 Отслеживание влияния БМО на апекс в моделировании

Для того, чтобы лучше понять отклик объектов гало на прохождение галактики БМО, мы моделируем динамическую эволюцию дисковой галактики типа Млечного Пути, встроенной в массивное гало тёмной материи, с учетом близкого пролета массивного объекта. В частности, мы провели ряд симуляций с высоким разрешением  $N$ -тел взаимодействий подобных тому, что мы видим в системе Млечного Пути и БМО. Начальные условия для этих моделей взяты из нашего предыдущего анализа. Мы используем положения Млечного Пути и галактики БМО, полученные в результате обратного по времени интегрирования орбит на момент 5 млрд. лет в прошлое. Поскольку обе галактики представлены аналитическим потенциалом, мы использовали их для генерации распределения частиц с помощью программы AGAMA [100]. В этом случае наше моделирование учитывает прямое влияние БМО на гало нашей Галактики, а также движение Млечного Пути в ответ на воздействие со стороны БМО.

В нашем моделировании БМО представлено  $10^6$  частицами, в то время как балдж Млечного Пути, тонкий и толстый звёздные диски состоят из  $5 \times 10^5$  частиц каждый, а тёмное гало Млечного Пути населено  $2 \times 10^7$  частицами. Последнее позволяет проследить детали кинематического отклика популяции частиц гало на первое падение БМО в систему. Моделирование проводилось с использованием нашей параллельной версии tree-grape кода [101; 102] с многопоточным использованием инструкций SSE и AVX, что обеспечивает хорошую производительность и высокую точность решения подобных задач [103—105]. Для интегрирования уравнений динамики частиц использовался алгоритм скачков по времени с постоянным шагом равным 0.1 млн.лет. При моделировании мы использовали стандартный угол раскрытия  $\Theta = 0.5$ . В общей сложности мы провели восемь симуляций с различными массами БМО. Однако, здесь мы представляем только одну модель с  $M_{\text{LMC}} = 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , поскольку она наилучшим образом воспроизводит наблюдаемое поведение солнечного апекса, а также согласуется с рядом недавних работ.

В нашей модели мы не учитываем популяцию галактик-спутников, однако, наличие протяженного “живого” гало тёмной материи позволяет использовать его частицы для исследования кинематического отклика на прохождение массивной галактики, подобной БМО. Поэтому, чтобы сравнить влияние пролета БМО с на-

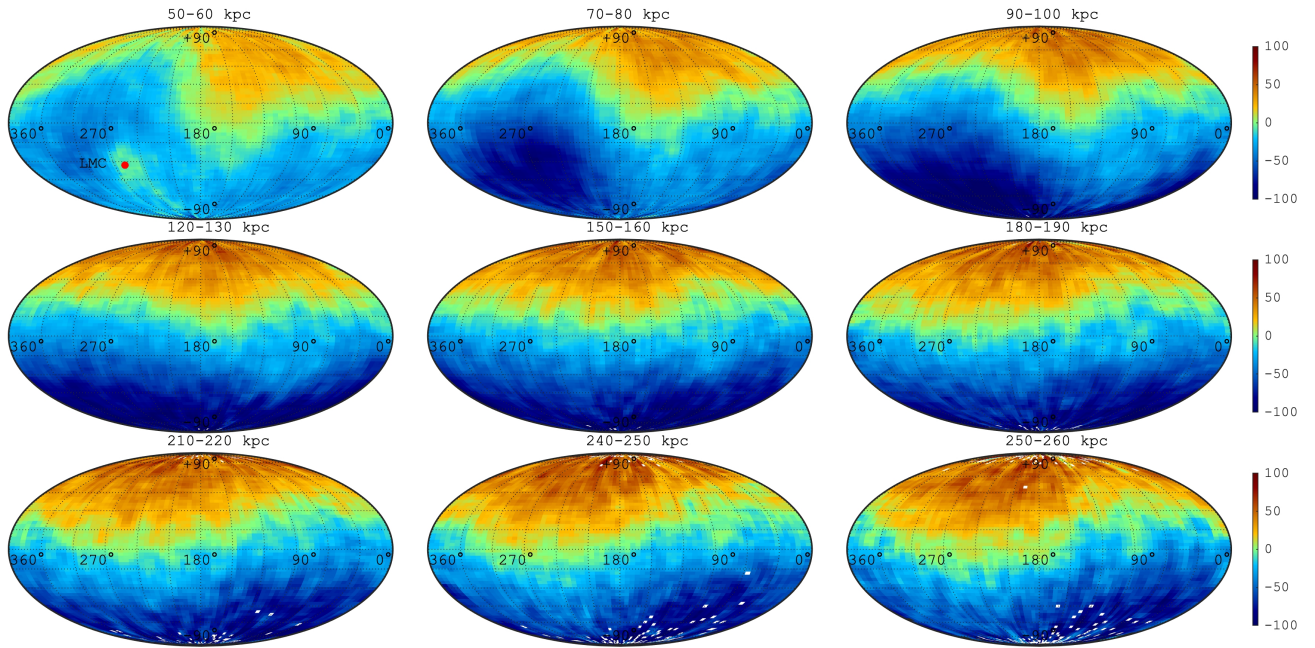


Рисунок 1.8 — Проекции на небо  $(l, b)$  средней радиальной скорости частиц гало Млечного Пути в моделировании  $N$ -тел взаимодействия Млечного Пути и БМО. Каждая панель соответствует распределению скоростей, усредненному для частиц в данном диапазоне галактоцентрических расстояний, как указано на каждой панели. В этом моделировании полная масса БМО равна  $2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , а его местоположение показано на левой верхней панели красным кружком.

блюдаемым распределением скоростей спутников Млечного Пути, мы используем только лучевые скорости частиц тёмной материи.

Сначала мы рассмотрим возмущение гало Млечного Пути по всему небу со стороны БМО. На рис. 1.8 показаны карты средних лучевых скоростей частиц гало в нашем моделировании в момент, когда местоположение БМО-подобного объекта соответствует современным параметрам. Мы отображали карты средней лучевой скорости в нескольких срезах по галактоцентрическим расстояниям, как это указано на каждой из панелей. На рисунке мы наблюдаем картину, о которой ранее сообщалось в нескольких недавних работах [48; 49; 106], в которых изучались движения БМО и Млечного Пути с помощью различных моделирований  $N$ -тел. В нашем моделировании внешнее гало демонстрирует значительные движения внутрь/наружу относительно средней плоскости Млечного Пути, вызванные “пробуждением” внешнего гало за орбитой БМО [43; 107; 108]. Однако, возмущение скоростей во внутренней ( $< 100$ – $120$  кпк) части гало галактики оказывается очень сложным и сильно зависит от положения на небе.

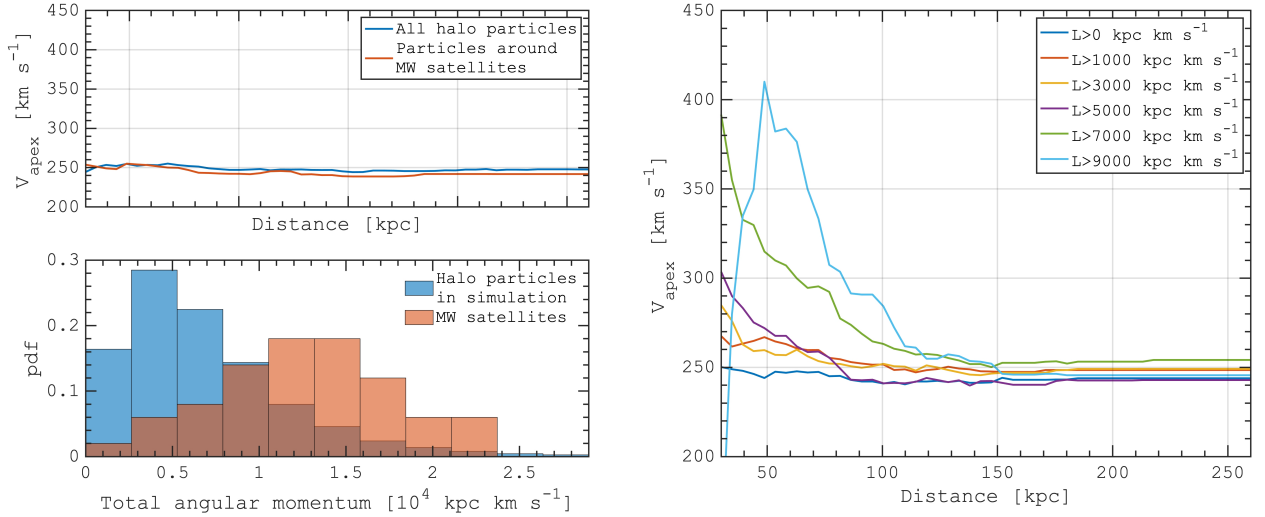


Рисунок 1.9 — Расчет солнечного апекса по частицам гало в моделировании  $N$ -тел взаимодействия Млечного Пути и БМО. *Верхняя левая панель:* Солнечный апекс, рассчитанный с использованием всех частиц тёмной материи (синий) и частиц, расположенных вокруг спутников Млечного Пути (красный). Видно, что пролет БМО никак не проявляется в поведении солнечного апекса, несмотря на существенный кинематический отклик гало (см. рис. 1.8). *Нижняя левая панель:* Сравнение распределения полного углового момента частиц гало в нашем моделировании  $N$ -тел (синий) и спутников Млечного Пути (красный). Распределения указывают на то, что спутники Млечного Пути демонстрируют значительные нерадиальные движения или, иными словами, их орбиты не являются радиально горячими, особенно по сравнению с моделированием  $N$ -тел частиц тёмной материи. *Правая панель:* Солнечный апекс, рассчитанный по частицам в окрестностях спутников Млечного Пути и с суммарным угловым моментом, превышающим заданное значение. На рисунке видно, что наблюдаемое поведение солнечного апекса в зависимости от расстояния проявляется для частиц с существенным угловым моментом, что говорит о кинематической дифференциации воздействия БМО на популяцию частиц гало Млечного Пути.

Поскольку у нас есть все положения и радиальные скорости смоделированных частиц гало Млечного Пути, мы рассчитываем распределение солнечного апекса по всем частицам гало и, поскольку картина радиальных скоростей является функцией координат  $(l, b)$ , (см. рис. 1.8), сравниваем её с сигналом, полученным по частицам, расположенным в непосредственной близости от реальных спутников Млечного Пути. На левой верхней панели рис. 1.9 показано поведение солнечного апекса зависимости от расстояния, построенное на основе всего гало (синий) и частиц, отобранных в круге  $5^\circ$  вокруг реальных спутников Млечного Пути на небе и расположенных не далее 10 кпк от них (красный). Следовательно, для красной кривой мы ожидаем увидеть поведение, подобное тому, что мы наблюдаем среди спутников Млечного Пути. Однако, обе кривые на левой панели не показывают никакого сигнала, что говорит об изотропном усредненном движении частиц гало в нашей модели, даже в присутствии массивного БМО.

Стоит отметить, что после усреднения кинематического отклика наши результаты зависят от внутренних свойств трассера и его способности “чувствовать” возмущение лежащего в основе гравитационного потенциала [91; 93; 106; 109]. Поэтому частицы тёмной материи в нашем моделировании могут иметь распределение кинематических свойств отличное от того, что мы наблюдаем у спутников Млечного Пути. Например, на нижней левой панели рис. 1.9 показаны распределения полного углового момента ( $L$ ) для частиц тёмной материи всего гало (показаны синим) и спутников Млечного Пути (показаны красным). В нашем случае у частиц тёмной материи преобладают радиально “горячие” орбиты с малым угловым моментом, в то время как частицы вокруг спутников Млечного Пути показывают дефицит радиальных орбит и преобладание высоких тангенциальных скоростей и, как следствие, имеют более высокие угловые моменты.

Чтобы проверить, зависит ли наблюдаемое поведение солнечного апекса от кинематических свойств трассеров гало, мы ограничили наш выбор частиц тёмной материи вокруг спутников Млечного Пути частицами, которые имеют полный угловой момент больше определенного значения. На правой панели рис. 1.9 показан солнечный апекс, рассчитанный для различных минимальных значений  $L = 1000, 3000, 5000$  и  $9000$  кпк км с<sup>-1</sup> частиц тёмной материи. Выбор трассеров с существенным угловым моментом приводит к высоким скоростям апекса на малых галактоцентрических расстояниях. В частности, при выборе частиц тёмной материи с  $L > 9000$  кпк км с<sup>-1</sup> радиальные вариации солнечного апекса соответствуют наблюдаемым данным. Такое значение отсечки углового момен-

та позволяет выбрать частицы, вращение которых более соответствует спутникам Млечного Пути (см. левую нижнюю панель рис. 1.9). Внутренние частицы ( $D_{\text{MW}} < 100\text{--}120$  кпк) демонстрируют коллективное движение относительно Галактики порядка  $100\text{--}150$  км с<sup>-1</sup>, в то время как внешнее распределение остается плоским, что хорошо воспроизводит наш рис. 1.5. Поэтому мы предполагаем, что, поскольку спутники Млечного Пути обладают значительным угловым моментом, а не находятся на горячих радиальных орбитах, они в большей восприимчивы к возмущению со стороны пролетающего БМО.

Влияние дифференциального отклика популяций с разной кинематикой на возмущение гравитационного потенциала, которое мы наблюдаем в гало моделируемого Млечного Пути, известно в контексте звёздной динамики галактических дисков. В частности, Debattista et al. [110] показали, что кинематически горячие популяции диска Млечного Пути менее подвержены влиянию формирующегося балджа Млечного Пути по сравнению со звёздами на холодных орбитах [см. также, 111; 112]. Этот же процесс предсказан в диске Млечного Пути в окрестностях спиральных рукавов [113] и подтвержден недавними данными *Gaia*, показывающими, что спиральная структура Млечного Пути наиболее заметна среди молодых и кинематически более холодных звёзд с высоким содержанием металлов [105; 114]. Таким образом, кинематические свойства трассеров гало играют решающую роль в их реакции на возмущения лежащего в основе гравитационного потенциала, включая эффект падение БМО.

## 1.6 Основные результаты Главы 1

В данной главе мы проанализировали кинематику 50 спутников нашей Галактики с известными радиальными скоростями. Мы используем дипольное и квадрупольное разложения поля скоростей в зависимости от расстояния до Млечного Пути. Дипольный член описывает коллективное движение, в основном определяемое движением Солнца в Галактике, а квадрупольный член связан с приливным взаимодействием.

Значимость квадрупольного члена поля скоростей оказывается меньше 3 сигм и полностью определяется кинематикой ближайших спутников,  $D_{\text{MW}} < 30$  кпк. Кажется естественным, что кинематика этих шести карликовых галактик

в наибольшей степени подвержена влиянию приливных сил и динамического трения в гало нашей Галактики.

Вариация бегущего солнечного апекса (дипольный член) с расстоянием обнаруживает разницу в систематическом движении ближних и далеких спутников. Солнечный апекс по отношению к внешним спутникам на расстояниях более 100 кпк равен  $(l, b, V) = (+90 \pm 14^\circ, -10.0 \pm 6.4^\circ, 249 \pm 37 \text{ км с}^{-1})$ . Эта величина хорошо согласуется с известным движением Солнца в Галактике (значимость отклонения составляет 1.7 сигмы). Таким образом, можно сделать вывод, что внешние спутники демонстрируют изотропное распределение лучевых скоростей с нулевой средней скоростью относительно центра Млечного Пути и дисперсией лучевых скоростей, равной  $84 \text{ км с}^{-1}$ , в согласии со стандартными представлениями о кинематике галактик в группах и предсказаниями  $\Lambda$ CDM-модели.

Поведение внутренних спутников на расстояниях менее 100 кпк оказывается более интригующим. Амплитуда апекса, определенная относительно этих галактик, достигает  $450 \pm 54 \text{ км с}^{-1}$ , что значительно превышает скорость Солнца в Галактике. Это соответствует статистически значимому “движению” Млечного Пути со скоростью до  $226 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  относительно его спутников в направлении  $(l, b) = (+69 \pm 16^\circ, -30 \pm 10^\circ)$ .

С одной стороны, почти перпендикулярная ориентация диполя распределения скоростей по направлению к центру Галактики говорит в пользу вращения внутренней подсистемы спутников. Такое поведение в некоторой степени похоже на вращение плоских структур, обнаруженное в галактиках Млечный Путь и Туманность Андромеды [34; 35]. Однако, для объяснения наблюдаемого диполя потребуется чрезвычайно быстрое вращение. По нашим оценкам, круговая скорость должна составлять около  $970 \pm 260 \text{ км с}^{-1}$ , что крайне неправдоподобно. Поэтому наблюдаемое поведение бегущего солнечного апекса нельзя объяснить, принимая во внимание только вращение галактик-спутников Млечного Пути.

Более реалистичным объяснением кажется когерентное движение спутников, вызванное первым прохождением карликовых галактик через гало Млечного Пути.

Поведение сглаженного солнечного апекса позволяет предположить, что особенность поля скоростей близких спутников тесно связана с БМО. Дипольный член распределения скоростей после коррекции за движение Солнца в Галактике, достигает максимума, равного  $226 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  по отношению к слою спутников  $35 \lesssim D_{\text{MW}} \lesssim 80 \text{ кпк}$ , центрированному на БМО. Carina II и Triangulum II вносят

наибольший вклад в эту дополнительную скорость. Стоит отметить, что среди 8 галактик, оказывающих наибольшее возмущающее воздействие на диполь, половина связана с БМО. Это само БМО, а также Carina II, Carina III и Grus II, которые являются членами группы БМО, согласно [50] и [88]. Это поддерживает гипотезу о том, что поведение апекса связано с первым пролетом группы карликовых галактик, связанных с БМО, вокруг Млечного Пути и возмущающим влиянием массивного БМО на кинематику других спутников нашей Галактики.

Используя два различных подхода, мы показали, что наблюдаемая картина лучевых скоростей может быть объяснена, если внутренние спутники были недавно возмущены массивным БМО. Во-первых, моделируя орбитальную эволюцию спутников Млечного Пути в обратном направлении (с учетом БМО) и затем в прямом (без учета БМО), мы “отменяем” эффект возмущения со стороны массивного БМО. Мы обнаружили, что пекулярная дипольная компонента скорости исчезает для внутренней популяции спутников Млечного Пути, если БМО имеет полную массу  $\approx 2 \times 10^{11} M_{\odot}$  (см. рис. 1.7), что указывает на генетическую связь этой кинематической особенности с индуцированным БМО возмущением орбит спутников.

Во-вторых, в самосогласованном моделировании с высоким разрешением  $N$ -тел взаимодействия Млечного Пути и БМО мы обнаружили, что трассеры гало (в нашем случае частицы тёмной материи) демонстрируют наблюдаемое поведение солнечного апекса, когда мы выбираем частицы с большим угловым моментом (см. рис. 1.9). Поскольку спутники Млечного Пути обладают значительной тангенциальной скоростью, а значит, и большим угловым моментом, они также более подвержены влиянию пролета массивного БМО.

## Глава 2. Оценка массы Млечного Пути и Туманности Андромеды

### 2.1 Введение

Анализ кинематики в пределах вириальных зон является основным и иногда единственным доступным методом оценки общей массы гравитирующих систем. Для этой цели используются различные аналоги теоремы вириала [21; 115; 116]. В случае далеких систем для наблюдения доступны только лучевые скорости и положения галактик на небе, что приводит к серьезным неопределённостям в оценках массы. Учет реального трёхмерного распределения спутников уменьшает неопределённость, связанную с их проекцией на небо и, как следствие, может улучшить оценки масс близких групп галактик.

За последние два десятилетия, благодаря космическому телескопу Хаббла и достижениям в области высокоточных методов измерения расстояний, были сделаны прорывы в изучении структуры ближайшей Вселенной. Например, согласно Каталогу диаграмм “цвет-величина” (Color-Magnitude Diagram Catalog [13]) Базы данных внегалактических расстояний (Extragalactic Distances Database [117]), на данный момент расстояния по вершине ветви красных гигантов (TRGB) со средней точностью 3.7% были измерены для примерно 500 близких галактик в пределах 10 Мпк. Благодаря этому мы знаем реальное трёхмерное распределение спутников вокруг гигантских галактик Местного Объёма, и в частности подробную структуру групп вокруг нашей Галактики и Туманности Андромеды (M 31).

В большинстве близких групп центральная галактика доминирует над своим окружением по светимости и массе. Целью данной главы является разработка простого метода с минимальным количеством свободных параметров для оценки массы подобных систем с учетом трёхмерного распределения спутников. Для этой цели можно использовать простую модель точечной массы, окруженной тестовыми частицами. Это именно та модель, которая рассматривалась в работе Bahcall & Tremaine [21]. Таким образом, целью данной работы является развитие их метода проекционной массы, принимая во внимание трёхмерное распределение спутников, и изучение её применимости к близким группам галактик. Поскольку единственной оставшейся неопределённостью является проекция ско-

рости спутника на луч зрения, мы называем этот подход оценкой массы по лучу зрения.

Млечный Путь и Туманность Андромеды служат идеальными лабораториями для тестирования метода. Современные обзоры неба предоставляют исследователям доступ к огромному количеству высокоточных данных, которые, среди прочего, привели к значительному увеличению количества публикаций, посвященных оценкам масс двух доминирующих галактик Местной Группы с использованием различных методов и трассеров. В качестве примера мы перечислим несколько недавних результатов, иллюстрирующих разнообразие подходов.

Моделирование кривой вращения галактики является классическим способом определения параметров её гравитационного потенциала. Zhou et al. [118] построили кривую круговой скорости Млечного Пути от 5 до 25 кпк, используя 54 000 ярких звёзд ветви красных гигантов. Они определили параметры модели, которая включала балдж, тонкий и толстый диски, а также тёмное гало Наварро-Френка-Уайта [119], и оценили полную массу Галактики равную  $(8.5 \pm 1.2) \times 10^{11} M_{\odot}$ , а соответствующий вириальный радиус равным  $192 \pm 9$  кпк.

Шаровые скопления позволяют проследить гравитационный потенциал Галактики на гораздо больших расстояниях, обычно около 40 кпк и вплоть до 100 кпк. Используя Gaia Data Release 2, Vasiliev [120] определил собственные движения практически для всей известной популяции шаровых скоплений Млечного Пути. Объединив их с данными о расстояниях и лучевых скоростях, он проанализировал распределение шаровых скоплений в шестимерном фазовом пространстве. В результате он получил полную массу Галактики внутри 50 кпк  $5.4_{-0.8}^{+1.1} \times 10^{11} M_{\odot}$  и  $8.5_{-2.0}^{+3.3} \times 10^{11} M_{\odot}$  в пределах 100 кпк. Экстраполированные вириальная масса и радиус составляют  $12_{-5}^{+15} \times 10^{11} M_{\odot}$  и  $280_{-50}^{+80}$  кпк, соответственно.

Спутники — единственные трассеры, которые покрывают всю вириализованную область группы. При анализе кинематики спутников крайне важно учитывать возмущения, вызванные прохождением массивной галактики, такой как Большое Магелланово Облако (БМО), что искажает распределение скоростей спутников и, как следствие, приводит к смещенной оценке вириальной массы. Kravtsov et al. [121] разработали новый робастный метод оценки массы,  $M \propto r_{\text{med}} \sigma_{3D}^2$ , откалиброванный по гало подобных Млечному Пути галактик в космологических симуляциях, где  $r_{\text{med}}$  — медиана галоцентрического расстояния, а  $\sigma_{3D}^2$

— дисперсия трёхмерных скоростей спутников. В результате, авторы оценили вириальную массу Млечного Пути, равную  $(9.96 \pm 1.45) \times 10^{11} M_{\odot}$ .

Следующий уровень предполагает исследовать торможение потока Хаббла в гравитационном поле Местной Группы, что позволяет оценивать полную массу группы на масштабах порядка 1 Мпк. К примеру, Karachentsev et al. [15] измерили радиус поверхности нулевой скорости  $R_0 = 0.96 \pm 0.03$  Мпк, что соответствует полной массе  $M_{LG} = (19 \pm 2) \times 10^{11} M_{\odot}$ . Этот вопрос будет более подробно рассмотрен в следующей Главе 3.

Приведенные выше примеры представляют собой лишь малую часть исследований, посвященных пониманию структуры Млечного Пути. Они демонстрируют потенциал тестирования нового метода с использованием различных подходов. Кроме того, новый метод добавляет в коллекцию еще одну независимую оценку массы.

## 2.2 Метод проекционной массы

Рассматривая движение пробных частиц вокруг точечной массы, Bahcall & Tremaine [21] показали, что из-за эффектов проекции оценка массы по теореме вириала  $M_{vir}$  в статистическом смысле является:

**смещенной** — то есть среднее оценок  $M_{vir}$  для одной и той же группы не обязательно равна истинной массе  $M$  для конечного числа тестовых частиц;

**неэффективной** — дисперсия оценок будет большой;

**несостоятельной** — в некоторых случаях  $M_{vir}$  не будет сходиться к истинной массе  $M$  при  $N \rightarrow \infty$ .

Основной причиной неэффективности вириальной оценки массы является неопределённость, вносимая эффектом проекции в оценку расстояния между галактиками. Но, даже игнорируя проекционные эффекты,  $M_{vir}$  остается неэффективной оценкой, так как близкие частицы вносят больший вклад по сравнению с далекими как в оценку кинетической энергии (в виде квадратичной суммы скоростей,  $\sum_i v_i^2$ ), так и в оценку потенциальной энергии (в виде гармонического среднего расстояний,  $\sum_i 1/r_i^2$ ). Так как и далекие и близкие частицы несут одинаковую информацию о центральной массе,  $M$ , то очевидно, что вириальная оценка  $M_{vir}$  неэффективно использует всю доступную информацию.

В качестве альтернативы использования теоремы вириала Bahcall & Tremaine [21] предложили использовать оценку проекционной массы  $M_p$ , основанную непосредственно на наблюдаемых проекционных величинах,

$$GM_p = av_{\text{los}}^2 r_p, \quad (2.1)$$

где  $v_{\text{los}}$  — лучевая скорость тестовой частицы относительно центрального тела и  $r_p$  — расстояние между ними в проекции на небо. Такой способ одинаковым образом использует информацию о движении частиц на всех расстояниях, так как в среднем  $v_{\text{los}}^2 \propto 1/r_p$ . Поправочный коэффициент  $a$  определяется путем усреднения по всем возможным траекториям частиц в системе. В результате для типичного случая наблюдения далекой группы с доминирующей массивной галактикой Bahcall & Tremaine [21] получили:

$$GM_p = \frac{32}{\pi(3 - 2\langle e^2 \rangle)} \langle v_{\text{los}}^2 r_p \rangle, \quad (2.2)$$

где  $e$  — эксцентриситет орбиты тестовой частицы.

Для получения реалистичной оценки массы необходимо делать предположение об орбитах частиц. Наиболее естественным является предположение об изотропности распределения скоростей и  $\langle e^2 \rangle = 1/2$ . В этом случае оценка проекционной массы приобретает вид:

$$GM_I = \frac{16}{\pi} \langle v_{\text{los}}^2 r_p \rangle, \quad (2.3)$$

с дисперсией

$$\text{Var}(\langle GM_I \rangle) = \frac{1}{N} \left( \frac{128}{5\pi^2} - 1 \right) \langle GM_I \rangle^2, \quad (2.4)$$

где  $N$  — число тестовых частиц.

### 2.3 Метод массы на луче зрения

Наша цель — определить поправочный коэффициент,  $a$ , основываясь на выражении вида:

$$GM_{\text{los}} = av_{\text{los}}^2 r, \quad (2.5)$$

где  $v_{\text{los}}$  — лучевая скорость тестовой частицы и  $r$  — её пространственное расстояние от центрального тела.

Здесь и далее мы будем придерживаться обозначений и подхода принятого в работе Bahcall & Tremaine [21]. Среднее некоторой величины  $\xi(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  может быть получено интегрированием по функции распределения  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  в фазовом пространстве сферически симметричной гравитационной системы:

$$\langle \xi \rangle = A \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi \sin \Theta d\Theta \int_0^\infty v_\perp dv_\perp \int_{-\infty}^\infty dv_r \int_0^{2\pi} \xi f d\varphi'. \quad (2.6)$$

Где,  $\Theta$  — полярный угол радиус-вектора  $\mathbf{r}$  в сферических координатах с полярной осью, направленной на наблюдателя;  $\varphi'$  — азимутальный угол вектора скорости  $\mathbf{v}$  в цилиндрической системе, где ось  $z$  направлена вдоль радиус-вектора;  $v_r$  и  $v_\perp$  — компоненты вектора скорости вдоль и поперек радиус-вектора, соответственно; и  $A$  — нормировочный коэффициент.

Согласно теореме Джинса, любое стационарное решение бесстолкновительного уравнения Больцмана зависит от координат фазового пространства только через интегралы движения. Для сферически симметричной системы пробных частиц функция распределения определяется энергией,  $E = GM/r - v^2/2$ , и квадратом момента импульса,  $J^2 = r^2 v_\perp^2$ . Для частицы с определенными значениями энергии  $E_0$  и момента импульса  $J_0$  её можно выразить с помощью дельта-функции Дирака<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}) &= f(E, J) = \delta(E - E_0) \delta(J^2 - J_0^2) \\ &= \delta(GM/r - v^2/2 - E_0) \delta(r^2 v_\perp^2 - J_0^2). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Учитывая свойство дельта-функции,

$$\delta(f(x)) = \sum_i \frac{\delta(x - x_i)}{|f'(x_i)|},$$

---

<sup>1</sup>Энергия  $E_0$  и момент импульса  $J_0$  определяют орбиту спутника в сферически симметричном потенциале, в то время как дельта-функция представляет распределение в фазовом пространстве при условии, что энергия и момент импульса в точности равны этим конкретным значениям.

где  $x_i$  — корни функции  $f(x)$ , уравнение (2.6) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
\langle \xi \rangle &= A \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi \sin \Theta d\Theta \int_0^\infty v_\perp dv_\perp \int_{-\infty}^\infty dv_r \\
&\quad \times \int_0^{2\pi} \xi \delta(GM/r - v^2/2 - E_0) \delta(r^2 v_\perp^2 - J_0^2) d\varphi' \\
&= A \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 dr \int_0^\pi \sin \Theta d\Theta \int_0^{2\pi} \xi \frac{2}{|v_r|} \frac{1}{|2r^2|} d\varphi' \\
&= A \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} dr \int_0^\pi \sin \Theta d\Theta \int_0^{2\pi} \frac{\xi}{|v_r|} d\varphi'
\end{aligned} \tag{2.8}$$

где

$$v_\perp^2 = \frac{J_0^2}{r^2} = \frac{(GM)^2}{2E_0} (1 - e^2) \frac{1}{r^2} \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}
v_r^2 &= 2 \frac{GM}{r} - \frac{J_0^2}{r^2} - 2E_0 \\
&= 2 \frac{GM}{r} - \frac{(GM)^2}{2E_0} (1 - e^2) \frac{1}{r^2} - 2E_0,
\end{aligned} \tag{2.10}$$

и принято во внимание, что максимальный момент импульса для данной энергии  $E_0$  равен  $J_{\max} = GM/(2E_0)^{1/2}$ , и эксцентриситет определяется как  $e^2 = 1 - (J/J_{\max})^2$ . Пределы интегрирования определяются из условия  $v_r(r_{\min}) = v_r(r_{\max}) = 0$  и равны

$$r_{\min} = \frac{GM}{2E_0} (1 - e) \tag{2.11}$$

$$r_{\max} = \frac{GM}{2E_0} (1 + e). \tag{2.12}$$

Bahcall & Tremaine [21] нашли нормировочный коэффициент  $A$  из условия, что среднее единицы равно единице,  $\langle 1 \rangle = 1$

$$A = \left( 4\pi \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dr}{|v_r|} \right)^{-1} = \frac{(2E_0)^{3/2}}{4\pi^2 GM}. \tag{2.13}$$

Используя безразмерную переменную  $x = \frac{2E_0}{GM}r$ , уравнения (2.8)–(2.10) упрощаются к виду:

$$\begin{aligned} r &= \frac{GM}{2E_0}x \\ v_{\perp}^2 &= 2E_0 \frac{1-e^2}{x^2} \\ v_r^2 &= 2E_0 \frac{e^2 - (x-1)^2}{x^2} \\ \langle \xi \rangle &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{1-e}^{1+e} \frac{x dx}{\sqrt{e^2 - (x-1)^2}} \int_0^{\pi} \sin \Theta d\Theta \int_0^{2\pi} \xi d\varphi'. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Откуда становится очевидным, что, хотя мы рассматривали функцию распределения для произвольной фиксированной энергии тестовой частицы  $E_0$ , среднее наблюдаемых величин вида  $\langle v^2 r \rangle \propto 2E_0 \frac{GM}{2E_0} = GM$  зависит только от массы центрального тела и не зависит от  $E_0$ . Соответственно, это позволяет определять массу независимо от распределения частиц по энергиям. Однако, эксцентриситет орбиты остается в выражении.

Как было отмечено Bahcall & Tremaine [21], дисперсия оценки массы в виде, заданном уравнением (2.5), определена и может быть найдена аналогичным способом. Определим величину

$$(GM_{\text{los}})^2 = b(v_{\text{los}}^2 r)^2. \quad (2.15)$$

Тогда её дисперсия будет равна

$$\begin{aligned} \text{Var}(GM_{\text{los}}) &= \text{Var}(av_{\text{los}}^2 r) = a^2 \text{Var}(v_{\text{los}}^2 r) \\ &= a^2 (\langle (v_{\text{los}}^2 r)^2 \rangle - \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle^2) = a^2 \left( \frac{(GM)^2}{b} - \left( \frac{GM}{a} \right)^2 \right) \\ &= \left( \frac{a^2}{b} - 1 \right) (GM_{\text{los}})^2. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Соответственно, дисперсия среднего  $\langle GM \rangle$  равна

$$\text{Var}(\langle GM_{\text{los}} \rangle) = \frac{1}{N} \left( \frac{a^2}{b} - 1 \right) \langle GM_{\text{los}} \rangle^2, \quad (2.17)$$

где  $N$  — число тестовых частиц.

Наш случай нахождения среднего  $\langle v_{\text{los}}^2 r \rangle$  на самом деле включает два сценария: первый, когда наблюдатель находится около центра группы (как в случае Млечного Пути), и второй, когда наблюдатель рассматривает систему со стороны (как в случае со всеми другими близкими группами галактик).

### 2.3.1 Случай Млечного Пути

В случае Млечного Пути мы находимся практически в центре системы относительно распределения спутников. В результате линия зрения практически совпадает с радиальной координатой, что позволяет нам с хорошей точностью аппроксимировать  $v_{\text{los}} \approx v_r$ . Поэтому,

$$\begin{aligned} \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle &= \langle v_r^2 r \rangle = 4\pi A \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r |v_r| dr \\ &= \frac{GM}{\pi} \int_{1-e}^{1+e} \sqrt{e^2 - (x-1)^2} dx = \frac{GM}{2} \langle e^2 \rangle. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Следовательно, оценка массы Млечного Пути по лучу зрения равна

$$GM_{\text{los}} = \frac{2}{\langle e^2 \rangle} \langle v_r^2 r \rangle. \quad (2.19)$$

Для оценки дисперсии получаем значение

$$\langle (v_{\text{los}}^2 r)^2 \rangle = (GM_{\text{los}})^2 \left( \frac{3}{2} e^2 - 1 + (1 - e^2)^{3/2} \right), \quad (2.20)$$

что дает дисперсию оценки массы для нашей Галактики, равную

$$\text{Var}(\langle GM_{\text{los}} \rangle) = \frac{1}{N} \frac{4}{\langle e^2 \rangle} \left( \frac{3}{2} \langle e^2 \rangle - 1 + (1 - \langle e^2 \rangle)^{3/2} \right). \quad (2.21)$$

В случае изотропного распределения скоростей, где  $\langle e^2 \rangle = \frac{1}{2}$ , оценка массы по лучу зрения и её дисперсия приобретают вид

$$GM_{\text{I}} = 4 \langle v_r^2 r \rangle \quad (2.22)$$

$$\text{Var}(\langle GM_{\text{I}} \rangle) = \frac{4(\sqrt{2} - 1)}{N} \langle GM_{\text{I}} \rangle^2 \approx \frac{1.657}{N} \langle GM_{\text{I}} \rangle^2. \quad (2.23)$$

### 2.3.2 Случай близкой группы

Рассмотрим случай, когда наблюдатель находится на достаточном расстоянии от группы. Предположим, что трёхмерное распределение и лучевые скорости спутников известны из наблюдений. Этот случай соответствует близким

группам галактик в Местном Объёме, где для многих галактик были измерены высокоточные расстояния. Проекция скорости на луч зрения равна  $v_{\text{los}} = v_r \cos \Theta - v_{\perp} \sin \varphi' \sin \Theta$ . Уравнение (2.8) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle &= \frac{4\pi A}{3} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r v_r \left( 1 + \frac{v_{\perp}^2}{v_r^2} \right) dr \\ &= \frac{GM}{3\pi} \int_{1-e}^{1+e} \frac{1 - (x-1)^2}{\sqrt{e^2 - (x-1)^2}} dx \\ &= \frac{GM}{6} (2 - \langle e^2 \rangle). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Аналогичным образом для среднего квадрата мы получаем следующее выражение:

$$\langle (v_{\text{los}}^2 r)^2 \rangle = \frac{(GM)^2}{10} (2 - \langle e^2 \rangle). \quad (2.25)$$

Соответствующая оценка массы и её дисперсия равны

$$GM_{\text{los}} = \frac{6}{2 - \langle e^2 \rangle} \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle \quad (2.26)$$

$$\text{Var}(\langle GM_{\text{los}} \rangle) = \frac{1}{N} \left( \frac{36}{10(2 - \langle e^2 \rangle)} - 1 \right) \langle GM \rangle^2. \quad (2.27)$$

Для изотропного распределения орбит  $\langle e^2 \rangle = \frac{1}{2}$  получается

$$GM_{\text{I}} = 4 \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle \quad (2.28)$$

$$\text{Var}(\langle GM_{\text{I}} \rangle) = \frac{7}{5N} \langle GM_{\text{I}} \rangle^2 = \frac{1.4}{N} \langle GM_{\text{I}} \rangle^2. \quad (2.29)$$

Отметим, что несмотря на принципиальное различие в общих выражениях для массы Млечного Пути (уравнение 2.18) и близкой группы (уравнение 2.24), поправочные коэффициенты для изотропного случая, как показывают уравнения (2.22) и (2.28), удивительным образом совпадают.

### 2.3.3 Дополнительные замечания

Watkins et al. [116] представили целое семейство оценок вида  $M \propto \langle v^2 r^\alpha \rangle$ , аналогичное методу проецируемой массы, первоначально введенному Bahcall & Tremaine [21] и позднее расширенному Heisler et al. [115]. Уравнения для оценки

массы выводятся из решений уравнения Джинса, предполагая, что трассеры следуют степенному закону распределения плотности и движутся в гравитационном потенциале, который также имеет степенную форму.

Стоит отметить, что, несмотря на значительный прогресс в обнаружении спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды, их наблюдаемое пространственное распределение по-прежнему сильно подвержено влиянию селекционных эффектов. Эти эффекты особенно заметны для наиболее далеких систем. Как отмечают Watkins et al. [116] в своей работе, это может изменить наблюдаемый наклон степенной зависимости плотности числа трассеров и, следовательно, привести к смещенной оценке массы. Хотя подход, предложенный в данной главе, проще, он обходит эту проблему, усредняя наблюдаемые  $v_{\text{los}}^2 r$  по всем возможным орбитам, независимо от радиального распределения спутников, полученного из наблюдений или основанного на моделях. Это может быть особенно полезно для удаленных систем, где количество известных спутников весьма ограничено. Кроме того, этот подход позволяет вывести явные выражения для погрешности оценки массы.

## 2.4 Сравнение с космологическими симуляциями

Для проверки применимости метода мы протестировали его, используя космологические расчеты высокого разрешения “the High-resolution Environmental Simulations of The Immediate Area” (HESTIA) [122]. Это набор космологических моделей, разработанных для симуляции Местной Группы галактик. Это магнитогидродинамическое моделирование с тёмной материей основано на коде AREPO [123]. Начальные условия выбираются на основе пекулярных скоростей из обзора CosmicFlows-2 близких галактик [124] с использованием обратного приближения Зельдовича [125]. Физика барионов следует модели формирования галактик AURIGA [126].

Моделирование включает область высокого разрешения 3–5 Мпк вокруг аналога Местной Группы, где формируются галактики, похожие на Млечный Путь и Туманность Андромеды. В этой области достигается разрешение по массе  $m_{\text{dm}} = 1.2 \times 10^6$  и разрешение по частицам газа  $m_{\text{gas}} = 1.8 \times 10^5 M_{\odot}$ . Модельные галактики соответствуют наблюдениям с точки зрения различных физических и

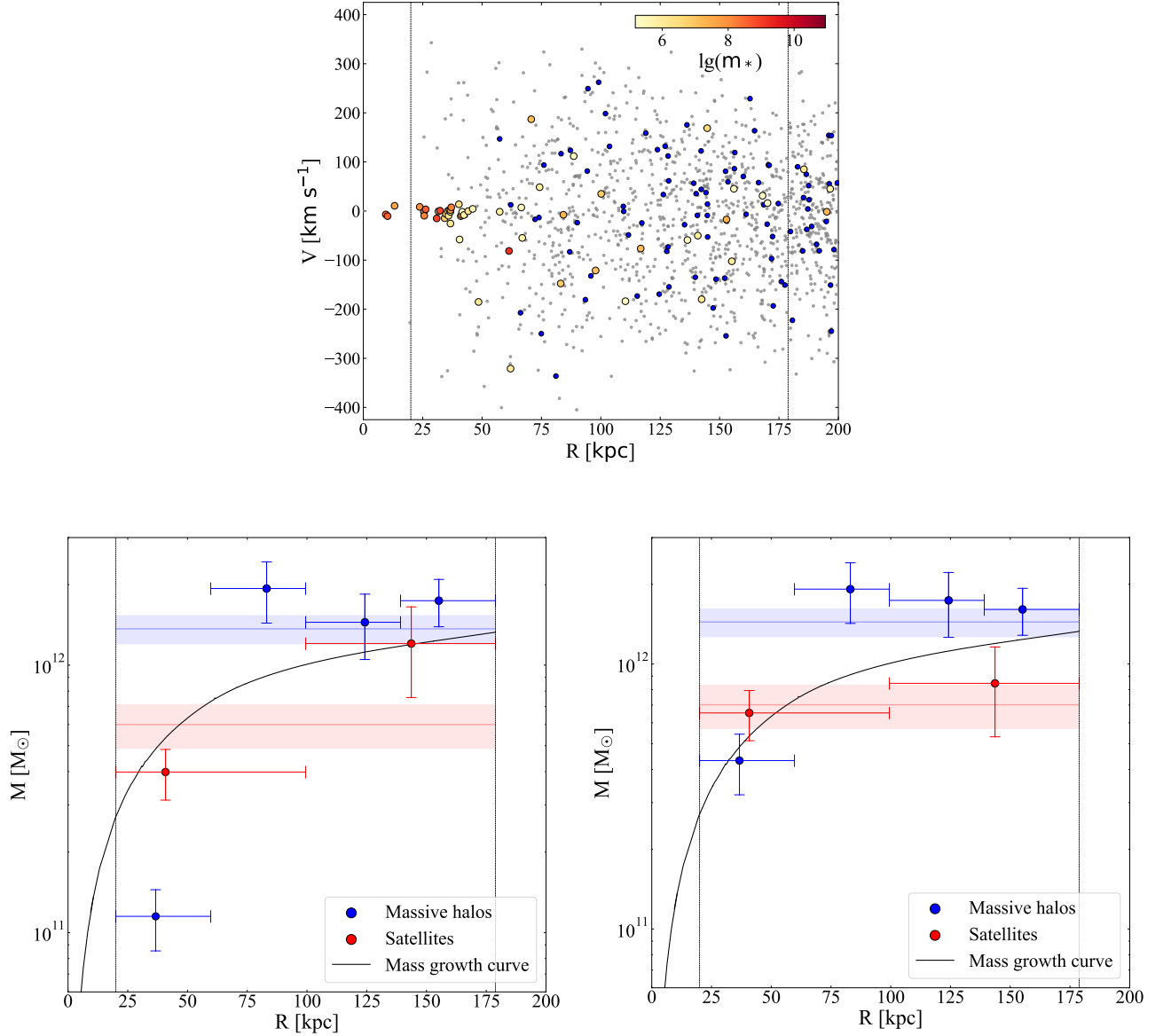


Рисунок 2.1 — *Верхняя панель*: Диаграмма радиальная скорость-расстояние для всех модельных гало, окружающих аналог Млечного Пути в симуляции NESTIA 17\_11. Серые точки представляют распределение гало тёмной материи малой массы. Синие точки соответствуют массивным гало с  $m_{\text{dm}} > 4.3 \times 10^7 M_{\odot}$ . Большие цветные точки обозначают спутникоподобные гало, в которых масса звёзд превышает  $m_* > 1.5 \times 10^5 M_{\odot}$ . Вертикальные линии обозначают выбранную область за пределами 20 кпк и в пределах вириального радиуса 178.9 кпк. *Нижняя левая панель*: Оценки массы для наблюдения из центра массивного гало в диапазоне расстояний [20, 178.9] кпк. Красные точки соответствуют оценкам массы для двух подгрупп спутников, тогда как горизонтальная красная линия — для всех спутников в указанном диапазоне расстояний. Аналогично синие точки обозначают оценки масс, полученные по четырем подгруппам массивных гало, тогда как синяя линия показывает результат для полной выборки. Сплошная черная линия отображает кумулятивный профиль массы  $M(< r)$ , извлеченный непосредственно из моделирования. *Нижняя правая панель*: Аналогично левой панели, но с точки зрения ближайшего массивного гало, имитирующего наблюдения М 31.

морфологических свойств, что делает их полезными для изучения роли окружающей среды в эволюции галактик [122]. Благодаря технике ограниченных симуляций окружение аналога Местной Группы воспроизводит реальные близкие крупномасштабные структуры: скопление, подобное скоплению в Деве, Локальную Пустоту, Локальный Блин и так далее.

NESTIA предоставляет три модели высокого разрешения Местной Группы. Нас в первую очередь интересуют положения в пространстве и пекулярные векторы скорости гало при  $z = 0$ . Все соответствующие величины выражены в единицах моделирования и могут быть перемасштабированы для различных космологических параметров, если необходимо. Рисунок 2.1 иллюстрирует случай второго по массе гало в системе, аналога Млечного Пути, для случая модели 17\_11 NESTIA. Его полная масса составляет  $M_{\text{tot}} = 13.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ , в то время как самое массивное гало, аналог Туманности Андромеды, имеет массу  $M_{\text{tot}} = 15.6 \times 10^{11} M_{\odot}$ . Верхняя панель показывает радиальную скорость окружающих гало как функцию расстояния. Первое, что бросается в глаза — это существенное отличие в распределения спутников по радиальным скоростям и расстояниям от наблюдаемого вокруг Млечного Пути (см. рис. 1.3 из раздела 1.2 или рис. 2.3 в этой главе). “Спутники” NESTIA (гало со звёздами) внутри первых 50 кпк в модели 17\_11 имеют крайне низкую дисперсию радиальных скоростей  $\sigma_V = 36.3 \text{ км с}^{-1}$  по сравнению с более далекими гало  $\sigma_V = 113.3 \text{ км с}^{-1}$ . Это отражает воздействие динамического трения и реорганизации орбит ближайших гало в более круговые, а также влияние меньшей массы, заключенной внутри данного радиуса. Кроме того, в зоне ниже 30–40 кпк наблюдаются значительные селекционные эффекты идентификации гало, что отражается в дефиците гало на коротких расстояниях от центрального тела. Такая картина характерна для всех центральных массивных гало в симуляциях NESTIA.

Для имитации реальных наблюдений, мы поместили наблюдателя в центр одного из этих массивных гало и рассчитали лучевые скорости всех окружающих гало на основе их положений и пекулярных скоростей. Мы фокусируемся на вириальных областях вокруг двух самых массивных гало, аналогов Млечного Пути и Туманности Андромеды. Их вириальные радиусы варьируются от 143 до 189 кпк в зависимости от массы центрального гало. Мы также исключаем из рассмотрения все гало, расположенные в пределах 20 кпк от основного массивного гало. Это решение мотивировано двумя факторами: во-первых, трудностью надёжной идентификации таких объектов в космологических симуляциях в об-

Таблица 4 — Статистика испытаний оценки массы аналогов Млечного Пути и Туманности Андромеды с использованием моделирования HESTIA.

| Sample                                           | $\langle \frac{M_{\rm I}}{\sum M_{\rm halo}} \rangle$ |             | $\sigma$ | Median |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|----------|--------|
| Observations from the outside (the case of M 31) |                                                       |             |          |        |
| Heavy halos                                      | 1.054                                                 | $\pm 0.042$ | 0.103    | 1.055  |
| Satellites                                       | 0.858                                                 | $\pm 0.157$ | 0.384    | 0.848  |
| Observations from the inside (the case of MW)    |                                                       |             |          |        |
| Heavy halos                                      | 1.022                                                 | $\pm 0.048$ | 0.116    | 1.047  |
| Satellites                                       | 0.704                                                 | $\pm 0.129$ | 0.315    | 0.625  |

ластях высокой плотности вокруг центрального массивного гало; и, во-вторых, наблюдательными данными, свидетельствующими о том, что спутники на таких расстояниях фактически погружены в тело центральной галактики, где они подвергаются воздействию сильных приливных сил, динамическому торможению и поглощаются массивной галактикой. В результате мы получаем два набора данных для случая наблюдения спутников заданного гало и для случая наблюдения спутников в соседнем массивном гало. Всего мы получаем шесть наборов данных для каждого сценария. В наших тестах мы применяем оценку массы по лучу зрения, предполагающую изотропные орбиты (Раздел 2.3), к двум выборкам: первая выборка “спутников”, гало которых содержат звёздные частицы с суммарной звёздной массой  $m_* > 1.5 \times 10^5 M_\odot$ , обычно состоит из примерно 30 объектов; вторая выборка тяжелых гало включает все гало с  $m_{\text{dm}} > 4.3 \times 10^7 M_\odot$ , что соответствует нижнему порогу массы для гало, способных к звездообразованию, и обычно содержит около 100 тестовых частиц. Мы сравнили оцененную массу с полной массой всех гало, заключенных в пределах вириального радиуса. Результаты обобщены в Таблице 4. Нижние левая и правая панели рис. 2.1 сравнивают оценки массы с кривой роста массы в пределах вириального радиуса аналога Млечного Пути в симуляции HESTIA 17\_11. Левая панель соответствует положению наблюдателя в центре этого гало, а правая панель отражает точку зрения наблюдения из центра соседнего массивного гало.

Важно отметить, что массы, оцененные для подвыборок на разных расстояниях, следуют кривой роста массы, полученной в моделировании. Из-за ограниченного числа “спутников” оценки массы, основанные на этой подвыборке, демонстрируют значительный разброс. Напротив, включение всех массивных гало значительно улучшает статистику, снижает разброс до 10–12% и повышает на-

дѐжность оценок массы. Как показано в Таблице 4, среднее отношение оцененной массы к истинному значению статистически согласуется с единицей в пределах 1-сигма. Это подтверждает вывод о том, что предлагаемый подход пригоден для оценки массы вириализованных систем и обеспечивает реалистичные измерения.

## 2.5 Применение метода к Местной группе галактик

Местная Группа галактик не нуждается в особом представлении. Это довольно изолированная система с радиусом около 1 Мпк. Ближайшие сопоставимые группы галактик находятся на расстоянии 3–4 Мпк [127]. Местная Группа основана двумя гигантскими спиральными галактиками, разделенными расстоянием 780 кпк, Млечным Путем и Туманностью Андромеды (М 31), которые похожи друг на друга во многих отношениях. Эти гиганты окружены богатыми семействами спутников, которые простираются до 300 кпк. Только около дюжины карликовых галактик известны в Местной группе за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды. Благодаря современным глубоким оптическим обзорам и систематическим поискам наши знания о населении Местной Группы значительно расширились. Список спутников постоянно пополняется новыми членами. Это позволяет проследить их популяцию до крайне низкой светимости, что технически недоступно для более далеких групп галактик. Недавно открытая галактика Ursa Major III [128] имеет светимость  $M_V = +2.2$  зв. величины, что соответствует звѐздной массе всего  $16 M_\odot$ . Подсистемы спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды не перекрываются, что позволяет изучать их независимо, без учета сложных взаимодействий. Для оценки массы используются различные методы и подсистемы, от движения звѐзд и газа в самих галактиках до изучения кинематики шаровых скоплений и спутников, временного аргумента для их орбитального движения, и торможения потока Хаббла на границе Местной Группы [см. недавние обзоры 17; 19; 20]. Все это позволяет нам проследить распределение светящейся и тѐмной материи в Местной группе в масштабе от единиц килопарсек до примерно одного мегапарсека. Существует консенсус, что М 31 является немного более массивной, чем наша Галактика [15; 116; 129], хотя оценки массы для обеих галактик сильно варьируются, иногда приводя к проти-

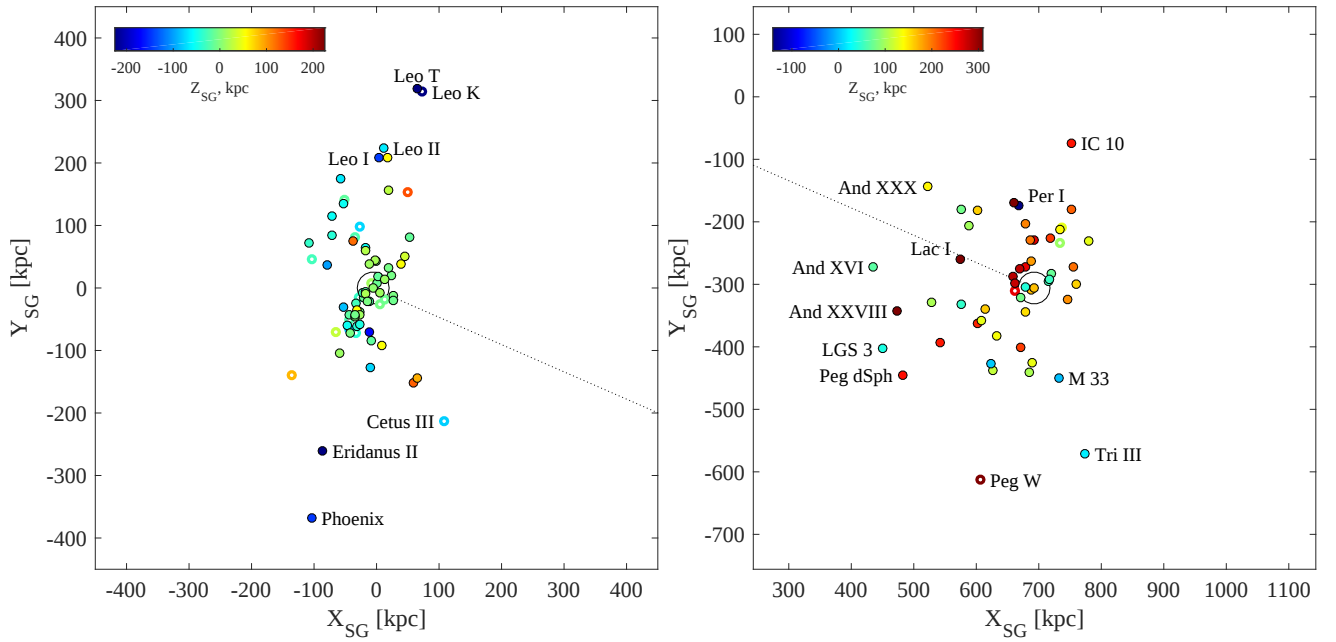


Рисунок 2.2 — 3D-распределение галактик в пределах 450 кпк от Млечного Пути (левая панель) и Туманности Андромеды (правая панель) в декартовых сверхгалактических координатах. Ось  $Z$  обозначена цветом. Галактики с неизвестной лучевой скоростью показаны цветными кольцами. Пунктирная линия соединяет центры Млечного Пути и Туманности Андромеды. Помечены спутники, расположенные дальше 220 кпк от центральной галактики.

воположному выводу [130]. Новые оценки массы остаются важной задачей для понимания свойств нашей Галактики и М 31, и Местной Группы в целом.

Выборка спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды была составлена на основе последней версии базы данных галактик Местного Объёма [72] с учетом недавних работ по изучению космических потоков вокруг близких массивных галактик [81], измерению собственных движений спутников нашей Галактики [23; 25], оценке расстояний по переменным RR Лиры [131], недавним открытиям галактик [например, 82], HyperLeda [132] и баз данных NED, а также многих других работ.

На рисунке 2.2 показано трёхмерное распределение спутников нашей Галактики (левая панель) и Туманности Андромеды (правая панель) в Сверхгалактических координатах (координата  $Z$  обозначена цветом). Знаменитые плоскости спутников отчетливо видны вокруг обеих галактик [133]. Кроме того, спутники М 31 демонстрируют хорошо известный перекося в сторону нашей Галактики [134].

### 2.5.1 Млечный Путь

Благодаря миссии Gaia [135] были измерены собственные движения большинства спутников нашей Галактики, что однозначно позволяет определить все шесть компонентов положения спутника в фазовом пространстве. Эта информация активно используется для уточнения структуры нашей Галактики, оценки её полной массы и анализа особенностей орбит спутников. Следует подчеркнуть, что лучевые скорости спутников измеряются на порядок точнее, чем их собственные движения. Поэтому независимая оценка массы, основанная на простых лучевых скоростях, остается чрезвычайно важной.

Более того, даже простой анализ распределения лучевых скоростей может выявить неожиданные и интересные эффекты. Недавно Makarov et al. [136] (см. Главу 1) обнаружили, что дипольная компонента поля лучевых скоростей показывает неожиданно большую амплитуду  $226 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  коллективного движения близких спутников на расстояниях менее 100 кпк. Эта аномалия вызвана всего восемью галактиками (вычеркнуты красными крестами на рис. 2.3), которые включают Большое Магелланово Облако (БМО) и три галактики из его эскорта. Численное моделирование показывает, что эта картина скорости согласуется с предположением о первом пролете массивного БМО вокруг нашей Галактики и возмущении, которое он создает в движении спутников Млечного Пути. Этот пример показывает важность тщательного отбора “тестовых частиц” для кинематического анализа. Объекты при первом пролете не успевают вириализоваться и поэтому должны быть исключены из рассмотрения при оценке общей массы системы.

На данный момент известно 67 спутников нашей Галактики на расстояниях менее 260 кпк. Их список представлен в разделе 1.2 в Таблице 1. Как видно на рис. 2.3, наблюдается чёткое разделение между хорошо рандомизированными спутниками Млечного Пути до расстояний 260 кпк, что указывает на протяженность вириальной зоны, и тремя галактиками с систематически отрицательной скоростью на расстоянии 400 кпк, которые, вероятно, только впервые входят в гало Млечного Пути. Поэтому, мы ограничили область анализа расстоянием 260 кпк.

Как было показано в Главе 1, основанной на работе [136], после исключения восьми объектов, которые сильнее всего искажают поведение солнечного апекса,

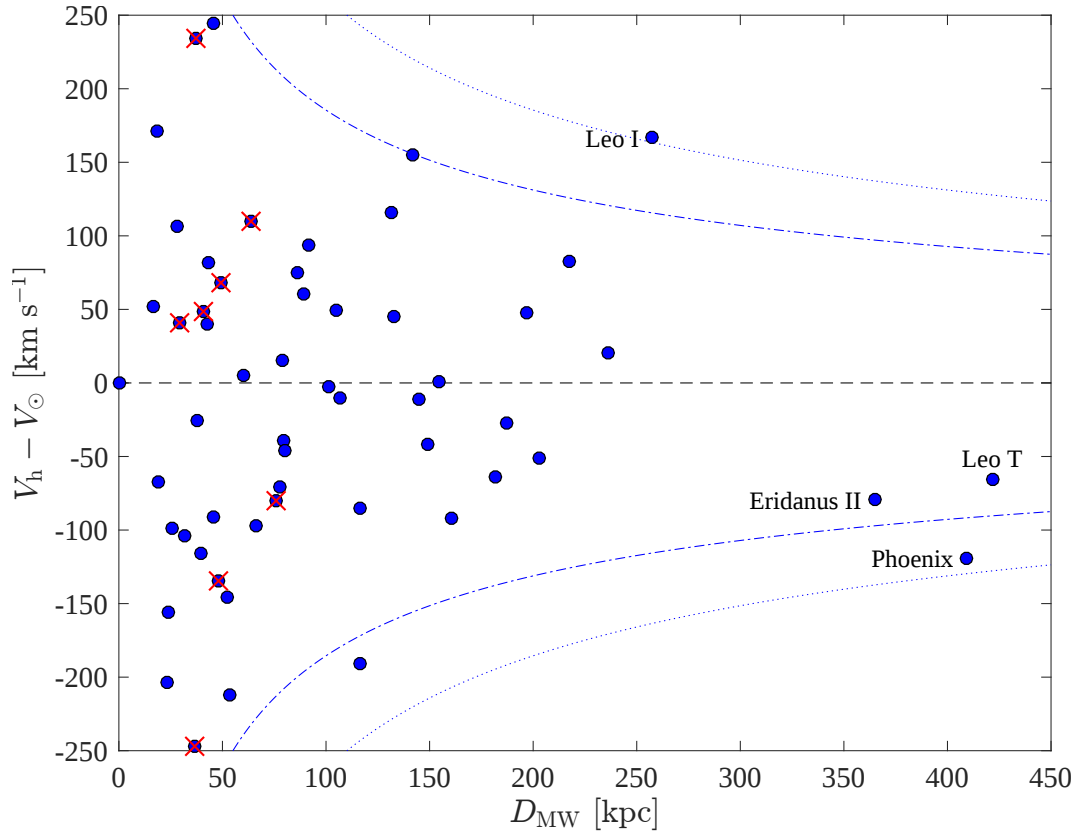


Рисунок 2.3 — Зависимость скорость-расстояние для ближайших галактик относительно центра нашей Галактики. Восемь спутников, которые вызывают наибольшее возмущение в поведении апекса Солнца, отмечены красными крестиками. Круговая скорость и скорость убегания точечной массы  $8 \times 10^{11} M_{\odot}$  показаны штриховыми и пунктирными линиями, соответственно.

наблюдаемое коллективное движение оставшихся спутников согласуется в пределах ошибок с движением Солнца в нашей Галактике. Поэтому в дальнейшем анализе наблюдаемые лучевые скорости были просто скорректированы на вектор скорости Солнца  $(9.5, 250.7, 8.56)$  км с<sup>-1</sup> [75] относительно центра Галактики, определенный по собственному движению Sgr A\*  $(-6.411 \pm 0.008, -0.219 \pm 0.007)$  mas yr<sup>-1</sup> [137] в Галактических координатах и расстоянию  $8249 \pm 9 \pm 45$  пк до центральной сверхмассивной черной дыры [138].

Случай Leo I заслуживает особого внимания. Как можно видеть на рис. 2.3, этот самый далекий спутник на краю вириальной зоны имеет чрезвычайно высокую лучевую скорость. Включение Leo I (всего одной галактики) в анализ приводит к резкому увеличению общей массы Млечного Пути на 33% [116]. В настоящее время не совсем ясно, является ли орбита Leo I эллиптической или гиперболической [139]. Тем не менее, измерения собственного движения показывают, что Leo I, вероятно, связан с Млечным Путем [140], но он находится на чрез-

Таблица 5 — Сводка оценок массы Млечного Пути

| Sample        | range<br>[kpc] | #  | $M_I$<br>[ $\times 10^{11} M_\odot$ ] |
|---------------|----------------|----|---------------------------------------|
| all           | 23–257         | 49 | $8.1 \pm 1.5$                         |
| w/o Leo I     | 23–236         | 48 | $6.9 \pm 1.3$                         |
| w/o 8         | 23–257         | 41 | $8.1 \pm 1.6$                         |
| w/o 8 & Leo I | 23–236         | 40 | $6.7 \pm 1.4$                         |
| $D < 86$ kpc  | 23–86          | 28 | $6.2 \pm 1.5$                         |
| w/o 8         | 23–86          | 20 | $5.5 \pm 1.6$                         |
| $D > 86$ kpc  | 89–257         | 21 | $10.7 \pm 3.0$                        |
| w/o Leo I     | 89–236         | 20 | $7.9 \pm 2.3$                         |

вычайно вытянутой орбите с эксцентриситетом  $0.79^{+0.10}_{-0.09}$  [25]. Тем не менее, мы предпочитаем исключить его из анализа, поскольку он резко выпадает из общего поведения спутников. Его орбита также, очевидно, не удовлетворяет условию изотропии, которое мы используем в последующем анализе. Более того, есть свидетельства приливного “обдирания” в этой галактике [141], указывающие на её бурную предысторию, и, как следствие, Leo I нельзя рассматривать как простую тестовую частицу.

На основе результатов, полученных в разделе 2.3.1, и предполагая изотропное распределение орбит спутников, мы оцениваем массу Млечного Пути, используя различные подвыборки спутников. На рисунке 2.4 представлено поведение бегущей массы по лучу зрения, оцененной по последовательностям из 20 спутников для случая всех галактик (пунктирная линия) и после исключения восьми членов группы с большим коллективным движением (сплошная синяя линия). Как видно, исключение этих восьми галактик не меняет радикально оценки массы, но тенденция роста массы с расстоянием проявляется более отчетливо. Такое поведение является естественным следствием распределения плотности в гало тёмной материи, окружающих галактики. Однако, из-за малой статистики ошибки и случайные флуктуации оказываются довольно большими.

Результаты суммированы в Таблице 5. В ней указаны диапазон галактоцентрических расстояний спутников, размер выборки и соответствующая оценка массы,  $M_I$ , в предположении изотропности орбит. Расстояние 86 кпк выбрано из соображений, что на больших расстояниях движение спутников хорошо рандоми-

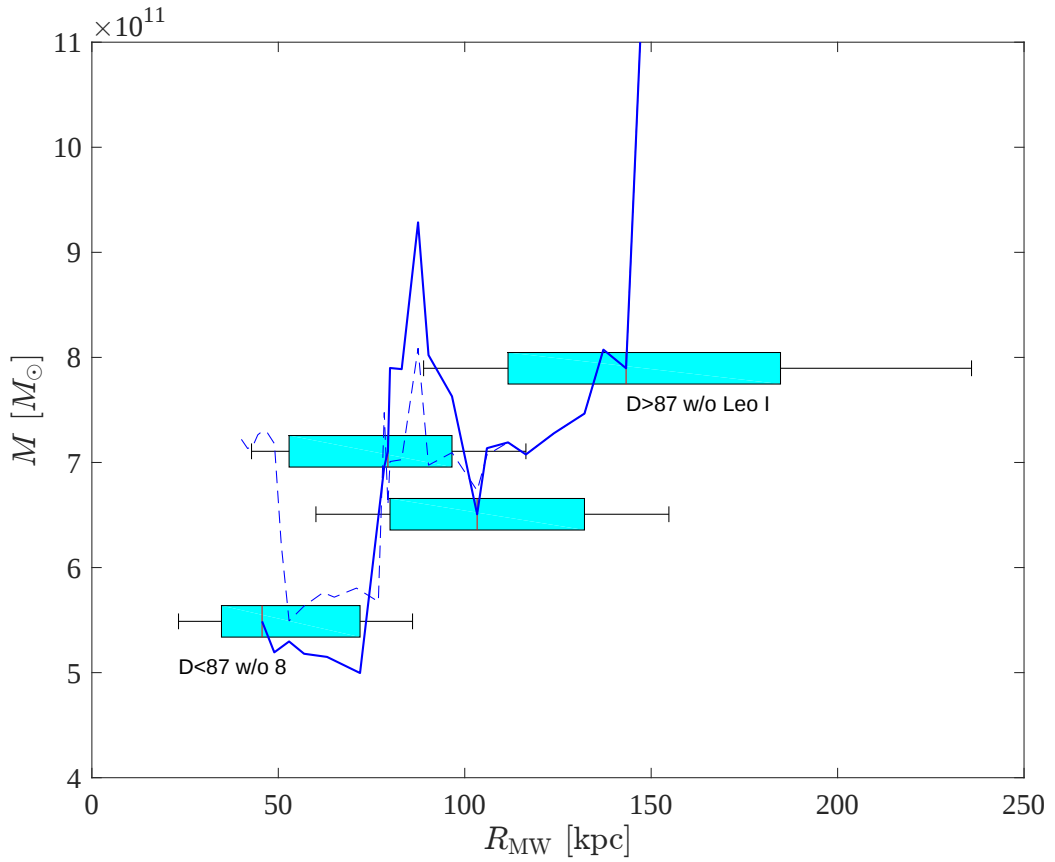


Рисунок 2.4 — Оценки массы Млечного Пути, основанные на подвыборках 20 спутников. Голубые прямоугольники показывают измеренные величины и иллюстрируют непараметрическую статистику распределения спутников по расстоянию. Сплошная синяя линия соответствует текущей массе, оцененной по подвыборкам из 20 спутников, после исключения восьми галактик. В частности, усы указывают минимальное и максимальное расстояние в пределах выборки, прямоугольник обозначает первый и третий квартили, а медиана показана вертикальным отрезком внутри прямоугольника. Первый прямоугольник соответствует выборке ‘ $D < 86$  кpc w/o 8’, а четвертый представляет выборку ‘ $D < 86$  кpc w/o Leo I’ (см. таблицу 5). Сплошная синяя линия обозначает бегущую массу, рассчитанную на основе подвыборок из 20 спутников, за исключением восьми галактик. Пунктирная линия — это бегущая масса для всей выборки.

зировано и не показывает значительных коллективных движений относительно центра Галактики [136], и также эта граница делит выборку спутников на равные части. Очевидно, что Leo I дает значительное увеличение общей массы Галактики, что особенно заметно в случае внешних спутников, где его вклад увеличивает оценку массы на 35%. Основываясь на этом анализе, мы оцениваем массу нашей Галактики в пределах 86 кпк в диапазоне  $[5.5-6.2] \times 10^{11} M_{\odot}$  с ошибкой  $\pm 1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ , а полную массу внутри 240 кпк равную  $(7.9 \pm 2.3) \times 10^{11} M_{\odot}$ .

Разнообразие и обилие новых наблюдательных данных вызвало всплеск оценок массы нашей Галактики. За последнее десятилетие было опубликовано четыре обзора по динамике и массе Млечного Пути. Bland-Hawthorn & Gerhard [18] в своем обзоре “Галактика в контексте” получили среднее значение индивидуальных оценок массы, равное  $(11 \pm 3) \times 10^{11} M_{\odot}$ . На основе компиляции 47 отдельных измерений массы, полученных с использованием семи различных методологий, Wang и др. [17] пришли к выводу, что вириальная масса нашей Галактики по-прежнему определяется с разбросом в два раза и, вероятно, ограничена диапазоном от  $5 \times 10^{11}$  до  $20 \times 10^{11} M_{\odot}$ . В недавнем обзоре Bobylev & Baykova [19] использовали 20 опубликованных измерений общей массы внутри 200 кпк. Они определили среднее значение  $(8.8 \pm 0.6) \times 10^{11} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $2.4 \times 10^{11} M_{\odot}$ . Hunt & Vasiliev [142] утверждают, что оценки массы Млечного Пути сходятся к значению около  $10^{12} M_{\odot}$  с погрешностью около 20–30%.

Основываясь на компиляциях [17] и [19], мы дополнили их данные 12 новыми измерениями, опубликованными после 2020 года. В Таблице 6 представлен список 37 оценок вириальной массы нашей Галактики внутри радиуса 200 кпк за последние 15 лет. Колонки содержат следующую информацию: 1) ссылка на авторов, как представлено на рис. 2.5; 2) масса Галактики,  $M_{\text{vir}}$ , внутри её вириального радиуса 200 кпк; 3) максимальный радиус,  $R_{\text{max}}$ , охватываемый трассерами массы; 4) ссылка на публикацию. Только исследования, анализирующие движение спутников, могут напрямую измерить массу в пределах вириального радиуса. Во всех остальных случаях вириальная масса в пределах  $\sim 200$  кпк оценивается из модели гравитационного потенциала нашей Галактики.

Сравнение наших измерений с данными из литературы показано на рис. 2.5. Измерения сгруппированы по классам используемых методов. Наша оценка массы обозначена вертикальной линией, а её ошибка представлена заштрихованной серой областью. Видно, что наше значение  $(7.9 \pm 2.3) \times 10^{11} M_{\odot}$  в пределах 240 кпк хорошо согласуется с многочисленными оценками, полученными другими авто-

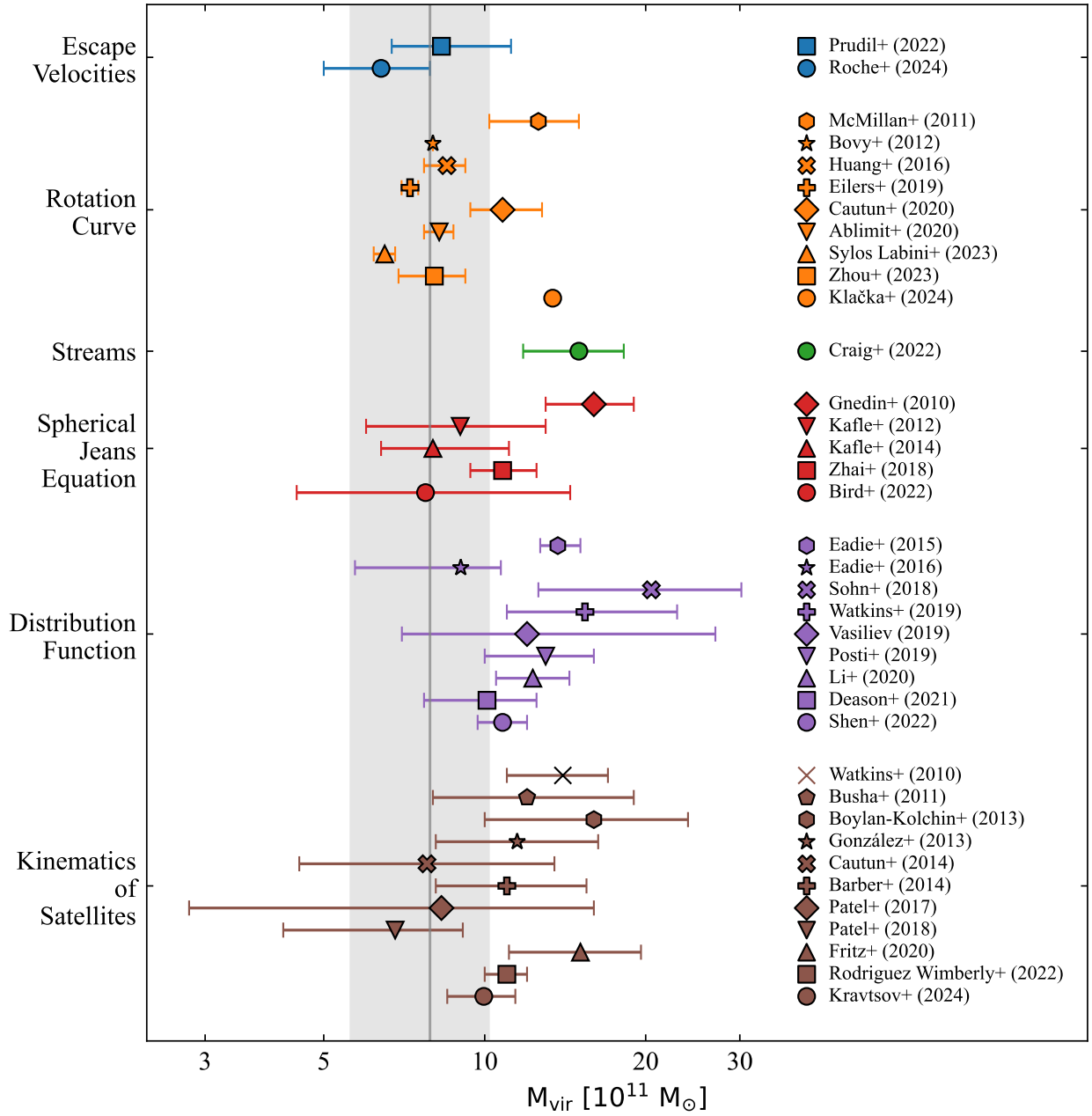


Рисунок 2.5 — Сравнение нашей оценки массы Млечного Пути с недавними измерениями, полученными различными авторами.

рами. Только измерения, основанные на функции распределения в фазовом пространстве, дают систематически более высокие оценки массы. Как отмечено в обзоре [17], это может быть связано с несоответствием модельных и реальных функций распределения, а также с нарушением предположения о стационарном состоянии, вызванным корреляциями фазового пространства и влиянием БМО. После исключения методов, базирующихся на функции распределения в фазовом пространстве, и рассмотрения 28 отдельных измерений мы получаем среднее значение  $(10.3 \pm 0.6) \times 10^{11} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $3.0 \times 10^{11} M_{\odot}$ , и медианное значение  $9.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ , что находится в пределах 1 сигмы от нашей оценки и соответствует случаю, когда в рассмотрение включен Leo I.

Таблица 6 — Компиляция оценок массы Млечного Пути начиная с 2010 года

| Authors                    | $M_{\text{vir}}$<br>$\times 10^{11} M_{\odot}$ |                  | $R_{\text{max}}$<br>kpc | Ref.  |
|----------------------------|------------------------------------------------|------------------|-------------------------|-------|
| Escape Velocities          |                                                |                  |                         |       |
| Prudil et al. (2022)       | 8.3                                            | $+2.9$<br>$-1.6$ | 20                      | [143] |
| Roche et al. (2024)        | 6.4                                            | $+1.5$<br>$-1.4$ | 11                      | [144] |
| Rotation Curve             |                                                |                  |                         |       |
| McMillan (2011)            | 12.6                                           | $\pm 2.4$        | 8                       | [145] |
| Bovy et al. (2012)         | $\sim 8.0$                                     |                  | 14                      | [146] |
| Huang et al. (2016)        | 8.5                                            | $+0.7$<br>$-0.8$ | 25                      | [147] |
| Eilers et al. (2019)       | 7.25                                           | $\pm 0.26$       | 25                      | [148] |
| Cautun et al. (2020)       | 10.8                                           | $+2.0$<br>$-1.4$ | 20                      | [149] |
| Ablimit et al. (2020)      | 8.22                                           | $\pm 0.52$       | 19                      | [150] |
| Zhou et al. (2023)         | 8.05                                           | $\pm 1.15$       | 30                      | [118] |
| Sylos Labini et al. (2023) | 6.5                                            | $\pm 0.3$        | 28                      | [151] |
| Klačka et al. (2024)       | 13.4                                           | $\pm 0.1$        | 25                      | [152] |
| Streams                    |                                                |                  |                         |       |
| Craig et al. (2022)        | 15.0                                           | $\pm 3.2$        |                         | [153] |
| Spherical Jeans Equation   |                                                |                  |                         |       |
| Gnedin et al. (2010)       | 16.0                                           | $\pm 3.0$        | 80                      | [154] |
| Kafle et al. (2012)        | 9.0                                            | $+4.0$<br>$-3.0$ | 60                      | [155] |
| Kafle et al. (2014)        | 8.0                                            | $+3.1$<br>$-1.6$ | 160                     | [156] |
| Zhai et al. (2018)         | 10.8                                           | $+1.7$<br>$-1.4$ | 120                     | [157] |

| Authors                          | $M_{\text{vir}}$<br>$\times 10^{11} M_{\odot}$ | $R_{\text{max}}$<br>kpc | Ref.  |
|----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|-------|
| Bird et al. (2022)               | $[5.5^{+1.5}_{-1.1} - 10.0^{+6.7}_{-3.3}]$     | 70                      | [158] |
| <b>Distribution Function</b>     |                                                |                         |       |
| Eadie et al. (2015)              | 13.7 $^{+1.4}_{-1.0}$                          | 261                     | [159] |
| Eadie et al. (2016)              | 9.02 $^{+1.7}_{-3.3}$                          | 200                     | [160] |
| Sohn et al. (2018)               | 20.5 $^{+9.7}_{-7.9}$                          | 100                     | [161] |
| Watkins et al. (2019)            | 15.4 $^{+7.5}_{-4.4}$                          | 40                      | [162] |
| Vasiliev (2019)                  | 12 $^{+15}_{-5}$                               | 50                      | [120] |
| Posti et al. (2019)              | 13 $\pm 3$                                     | 20                      | [163] |
| Li et al. (2020)                 | 12.3 $^{+2.1}_{-1.8}$                          | 200                     | [164] |
| Deason et al. (2021)             | 10.1 $\pm 2.4$                                 | 100                     | [165] |
| Shen et al. (2022)               | 10.8 $^{+1.2}_{-1.1}$                          | 145                     | [166] |
| <b>Kinematics of Satellites</b>  |                                                |                         |       |
| Watkins et al. (2010)            | 14.0 $\pm 3.0$                                 | 300                     | [116] |
| Busha et al. (2011)              | 12.0 $^{+7.0}_{-4.0}$                          | 300                     | [167] |
| González et al. (2013)           | 11.5 $^{+4.8}_{-3.4}$                          | 200                     | [168] |
| Boylan-Kolchin et al. (2013)     | 16 $^{+8}_{-6}$                                | 261                     | [140] |
| Cautun et al. (2014)             | 7.8 $^{+5.7}_{-3.3}$                           | 200                     | [169] |
| Barber et al. (2014)             | 11.0 $^{+4.5}_{-2.9}$                          | 200                     | [170] |
| Patel et al. (2017)              | 8.3 $^{+7.7}_{-5.5}$                           | 200                     | [171] |
| Patel et al. (2018)              | 6.8 $^{+2.3}_{-2.6}$                           | 200                     | [172] |
| Fritz et al. (2020)              | 15.1 $^{+4.5}_{-4.0}$                          | 300                     | [173] |
| Rodriguez Wimberly et al. (2022) | $\sim 10-12$                                   | 300                     | [174] |
| Kravtsov et al. (2024)           | 9.96 $\pm 1.45$                                | 200                     | [121] |
| <b>this work</b>                 | 7.9 $\pm 2.3$                                  | 236                     | [175] |

**Примечания:**

**Escape Velocities.** Этот метод анализирует хвост распределения скоростей звёзд гало (так называемых высокоскоростных звёзд) для оценки скорости убегания  $v_{\text{esc}}(r) = \sqrt{2|\Phi(r)|}$  из Галактики.

**Rotation Curve** метод основан на измерении круговых скоростей звёзд и газа. Внутренние регионы используют кинематику газа H I или CO, тогда как внешние регионы полагаются на трассеры, такие как красные гиганты и мазеры, в сочетании с собственными движениями по данным Gaia.

**Stellar Streams.** Приливные течения, такие как GD-1 и Sagittarius, являются чувствительными датчиками галактического потенциала. Подгонка орбит и моделирование их динамики ограничивают массу

на промежуточных расстояниях 20—100 кпк. К числу проблем относится необходимость отделения эффектов потенциала хозяйской галактики от возмущений, вызванных субгало.

**Spherical Jeans Equation** связывает радиальную дисперсию скорости  $\sigma_r$ , радиальный профиль плотности  $\rho_*$ , и анизотропию скорости  $\beta$ , трассеров массы с гравитационным потенциалом, в котором они движутся. Предполагается, что система сферически симметрична и находится в устойчивом состоянии.

**Distribution Function** подход моделирует гравитационный потенциал путем реконструкции распределения трассеров (звёзд гало, шаровых скоплений) в фазовом пространстве с использованием интегралов движения или действия.

**Kinematics of Satellites.** Движения спутников и шаровых скоплений тестируют массу внешнего гало. Сюда включены методы, основанные на временном аргументе (для связанных систем, таких как Leo I) и оценки массы по движению трассеров, часто сравниваемые с космологическим моделированием.

## 2.5.2 Туманность Андромеды

Таблица 7 — Список галактик группы Туманности Андромеды

| Name        | Alt Name  | J2000           | $(m - M)_0$<br>mag            | Method | $D$<br>kpc         | $V_h$<br>км с <sup>-1</sup>  |
|-------------|-----------|-----------------|-------------------------------|--------|--------------------|------------------------------|
| PAndAS-05   |           | 000024.1+435535 |                               |        |                    | $-183.0 \pm 7.0$ [176]       |
| And XVIII   |           | 000214.5+450520 | $25.43^{+0.05}_{-0.03}$ [177] | HB     | $1219^{+28}_{-17}$ | $-337.2^{+1.5}_{-1.4}$ [178] |
| PAndAS-04   |           | 000442.9+472142 |                               |        |                    | $-397.0 \pm 7.0$ [176]       |
| And XX      |           | 000730.7+350756 | $24.35 \pm 0.08$ [131]        | RR Lyr | $741 \pm 28$       | $-456.2^{+3.0}_{-3.4}$ [179] |
| IC 10       |           | 002024.5+591730 | $24.50 \pm 0.12$ [180]        | TRGB   | $794 \pm 45$       | $-348.0 \pm 2.9$ [181]       |
| And XXVI    |           | 002345.6+475558 | $24.48^{+0.06}_{-0.07}$ [131] | RR Lyr | $787^{+22}_{-26}$  | $-260.6^{+4.0}_{-3.7}$ [179] |
| And XXV     |           | 003008.9+465107 | $24.38^{+0.07}_{-0.06}$ [131] | RR Lyr | $752^{+25}_{-21}$  | $-107.8^{+1.0}_{-0.9}$ [179] |
| NGC 147     |           | 003350.8+483028 | $24.33 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $735 \pm 21$       | $-193.0 \pm 3.0$ [179]       |
| And III     |           | 003533.8+362952 | $24.29 \pm 0.05$ [131]        | RR Lyr | $721 \pm 17$       | $-344.3 \pm 1.7$ [179]       |
| Cas III     | And XXXII | 003559.4+513335 | $24.52 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $802 \pm 22$       | $-371.6 \pm 0.7$ [182]       |
| And XXX     |           | 003634.9+493848 | $23.74 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $560 \pm 16$       | $-141.4^{+5.8}_{-6.7}$ [179] |
| And XVII    |           | 003707.0+441920 | $24.40 \pm 0.07$ [131]        | RR Lyr | $759 \pm 25$       | $-251.1^{+1.5}_{-1.6}$ [179] |
| And XXVII   |           | 003727.1+452313 | $24.59 \pm 0.12$ [183]        | HB     | $828 \pm 47$       | $-534.8^{+5.4}_{-4.9}$ [179] |
| NGC 185     |           | 003858.0+482010 | $24.06 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $649 \pm 18$       | $-202.0 \pm 3.0$ [179]       |
| NGC 205     |           | 004022.5+414111 | $24.61 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $836 \pm 23$       | $-241.0 \pm 3.0$ [179]       |
| M 32        |           | 004242.1+405259 | $24.44 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $773 \pm 22$       | $-200.0 \pm 6.0$ [179]       |
| <b>M 31</b> |           | 004244.5+411609 | $24.45 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $776 \pm 22$       | $-301.0 \pm 1.0$ [179]       |
| And I       |           | 004540.0+380214 | $24.45 \pm 0.05$ [131]        | RR Lyr | $776 \pm 18$       | $-376.3 \pm 2.2$ [179]       |
| And XI      |           | 004620.0+334805 | $24.38 \pm 0.07$ [131]        | RR Lyr | $752 \pm 25$       | $-427.0^{+2.9}_{-2.8}$ [179] |
| And XII     |           | 004727.0+342229 | $24.28^{+0.08}_{-0.07}$ [131] | RR Lyr | $718^{+27}_{-24}$  | $-557.1 \pm 1.7$ [179]       |
| Bol 520     |           | 005042.4+325559 | $24.00 \pm 0.20$ [184]        | TRGB   | $631 \pm 61$       | $-370.0 \pm 5.0$ [185]       |
| And XIV     |           | 005135.0+294149 | $24.44 \pm 0.06$ [131]        | RR Lyr | $773 \pm 22$       | $-480.6 \pm 1.2$ [179]       |

| Name       | Alt Name   | J2000           | $(m - M)_0$                    | Method | $D$                | $V_h$                         |
|------------|------------|-----------------|--------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------|
|            |            |                 | mag                            |        | kpc                | км с <sup>-1</sup>            |
| And XIII   |            | 005151.0+330016 | 24.57 ± 0.07 [131]             | RR Lyr | 820 ± 27           | -185.4 ± 2.4 [179]            |
| And IX     |            | 005252.8+431200 | 24.60 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 832 ± 23           | -209.4 ± 2.5 [179]            |
| PAndAS-48  |            | 005928.2+312910 | 24.57 ± 0.11 [186]             | HB     | 820 ± 43           | -250.0 ± 5.0 [176]            |
| And XVI    |            | 005929.8+322236 | 23.57 ± 0.08 [131]             | RR Lyr | 518 ± 19           | -367.3 ± 2.8 [179]            |
| PAndAS-50  |            | 010150.6+481819 |                                |        |                    | -323.0 ± 7.0 [176]            |
| LGS 3      | Pisces I   | 010355.0+215306 | 23.91 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 605 ± 14           | -286.5 ± 0.3 [179]            |
| And X      |            | 010633.7+444816 | 24.00 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 631 ± 18           | -164.1 ± 1.7 [179]            |
| And V      |            | 011017.1+473741 | 24.58 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 824 ± 23           | -397.4 ± 1.5 [179]            |
| And XV     |            | 011418.7+380703 | 24.37 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 748 ± 17           | -323.0 ± 1.4 [179]            |
| And II     |            | 011629.8+332509 | 24.12 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 667 $^{+16}_{-16}$ | -193.6 ± 1.0 [179]            |
| And XXIV   |            | 011830.0+462258 | 23.92 ± 0.07 [131]             | RR Lyr | 608 ± 20           | -127.8 $^{+5.3}_{-5.4}$ [179] |
| And XXIX   |            | 011830.0+304520 | 24.26 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 711 ± 20           | -194.4 ± 1.5 [187]            |
| Tri III    | Pisces VII | 012141.3+262332 | 24.81 $^{+0.15}_{-0.13}$ [186] | TRGB   | 916 $^{+65}_{-53}$ | -138.6 ± 0.5 [188]            |
| PAndAS-56  |            | 012303.5+415511 |                                |        |                    | -239.0 ± 8.0 [176]            |
| And XXII   |            | 012740.0+280525 | 24.39 ± 0.07 [131]             | RR Lyr | 755 ± 25           | -129.0 $^{+2.1}_{-2.2}$ [179] |
| PAndAS-57  |            | 012747.5+404047 |                                |        |                    | -186.0 ± 6.0 [176]            |
| PAndAS-58  |            | 012902.1+404708 |                                |        |                    | -167.0 ± 10.0 [176]           |
| And XXIII  |            | 012921.8+384308 | 24.36 ± 0.07 [131]             | RR Lyr | 745 ± 24           | -242.7 ± 1.0 [179]            |
| M 33       |            | 013350.8+303937 | 24.67 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 859 ± 24           | -180.0 ± 1.0 [179]            |
| Per I      | And XXXIII | 030123.6+405918 | 24.24 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 705 ± 20           | -325.9 ± 3.0 [182]            |
| And XXVIII |            | 223241.2+311358 | 24.36 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 745 ± 17           | -326.2 ± 2.7 [187]            |
| Lac I      | And XXXI   | 225816.3+411728 | 24.36 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 745 ± 17           | -198.4 ± 1.1 [182]            |
| Cas dSph   | And VII    | 232631.8+504032 | 24.40 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 759 ± 21           | -307.2 ± 1.3 [179]            |
| Pegasus    | Peg DIG    | 232827.6+144434 | 24.74 ± 0.05 [131]             | RR Lyr | 887 ± 21           | -184.5 ± 0.3 [179]            |
| Peg dSph   | And VI     | 235146.9+243557 | 24.23 ± 0.06 [131]             | RR Lyr | 702 ± 20           | -340.8 ± 1.9 [179]            |
| And XXI    |            | 235447.7+422815 | 24.44 $^{+0.06}_{-0.07}$ [131] | RR Lyr | 773 $^{+22}_{-25}$ | -362.7 ± 0.8 [179]            |
| PAndAS-01  |            | 235712.0+433308 |                                |        |                    | -333.0 ± 21.0 [176]           |
| PAndAS-02  |            | 235755.6+414649 |                                |        |                    | -226.0 ± 4.0 [176]            |
| And XIX    |            | 235855.6+350237 | 24.55 $^{+0.09}_{-0.08}$ [131] | RR Lyr | 813 $^{+34}_{-31}$ | -111.2 $^{+1.2}_{-1.3}$ [179] |

Список галактик группы Туманности Андромеды представлен в Таблице 7. Её колонки содержат следующую информацию: (1) имя галактики, Name; (2) дополнительное имя, Alt Name; (3) экваториальные координаты на эпоху J2000; (4–6) модуль расстояния  $(m - M)_0$  с указанием ошибки и источника данных; (7) метод определения расстояний: Horizontal Branch (HB), RR Lyrae variables (RR Lyr), Tip of the Red Giant Branch (TRGB); (8–9) гелиоцентрическое расстояние  $D$  в кпк; (10–12) гелиоцентрическая лучевая скорость  $V_h$  в км с<sup>-1</sup> и её источник данных.

Распределение по небу 50 известных соседей М 31 в пределах 500 кпк от нее показано на рис. 2.6. В отличие от спутников Млечного Пути, собственные движения в группе Туманности Андромеды известны только для нескольких галактик:

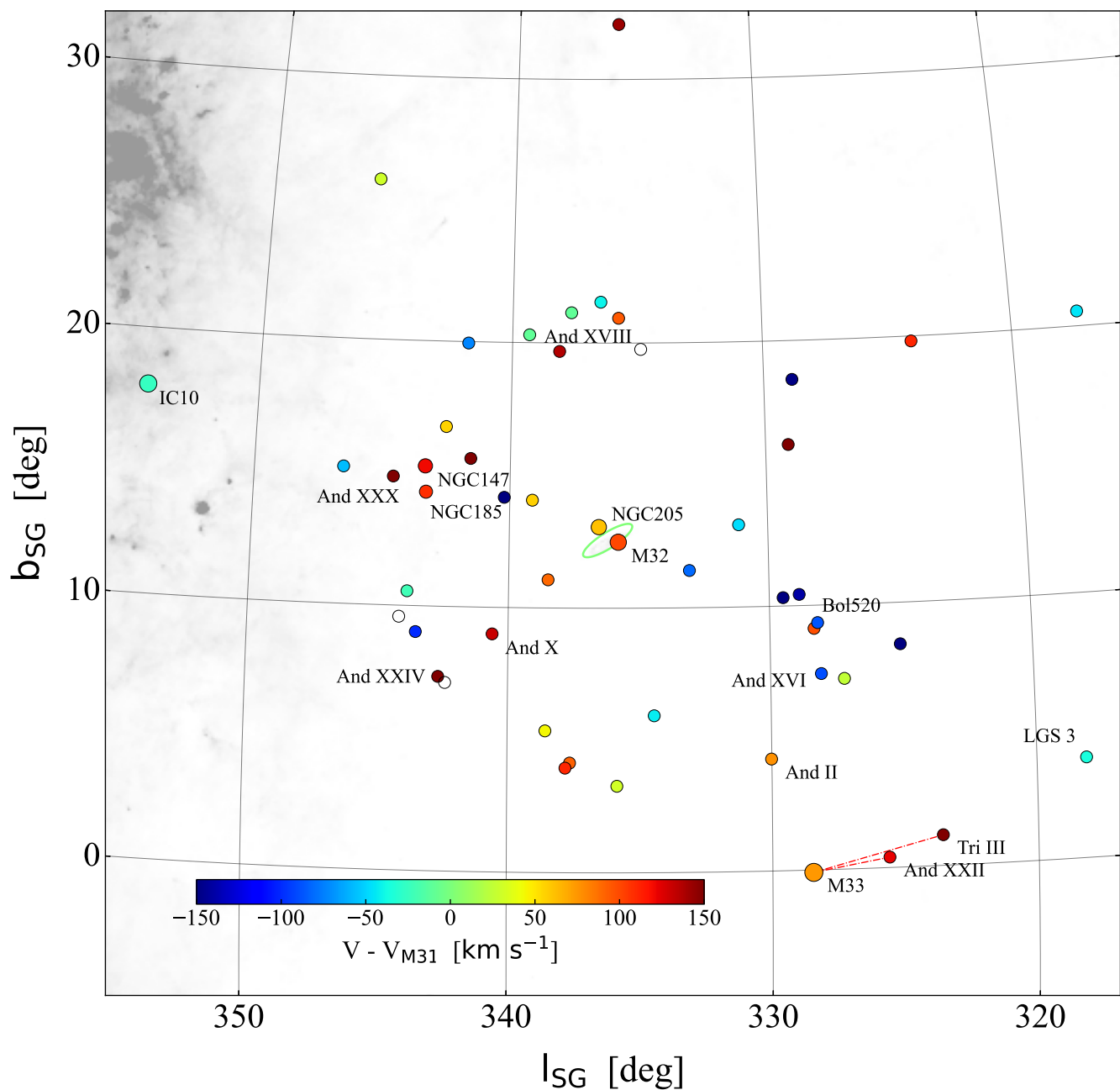


Рисунок 2.6 — Распределение спутников М 31 на небе в проекции Аитова. Туманность Андромеды показана центральным эллипсом. Цвет отражает разницу скоростей относительно центральной галактики. Незакрашенные точки обозначают галактики с неизвестными лучевыми скоростями. Карта межзвёздного поглощения IRAS представлена серыми облаками.

Таблица 8 — Сводка оценок массы М 31

| Sample             | #  | $\sigma_V$         | $M_I$                    |                |                |
|--------------------|----|--------------------|--------------------------|----------------|----------------|
|                    |    | км с <sup>-1</sup> | $\times 10^{11} M_\odot$ |                |                |
| <i>cz</i>          | 47 | 121.1              |                          |                | $22.7 \pm 4.2$ |
| <i>D &amp; cz</i>  | 33 | 114.1              | $18.5 \pm 3.8$           | $16.9 \pm 3.5$ | $21.7 \pm 4.8$ |
| w/o 2 <sup>†</sup> | 31 | 113.6              | $18.5 \pm 3.9$           | $16.9 \pm 3.6$ | $19.5 \pm 4.4$ |
| w/o 3 <sup>‡</sup> | 30 | 112.7              | $17.0 \pm 3.7$           | $15.5 \pm 3.4$ | $17.4 \pm 4.0$ |

<sup>†</sup> после исключения подгруппы М 33

<sup>‡</sup> после исключения подгруппы М 33 и And XXX

М 31 [189; 190], М 33 [189; 191], NGC 185, NGC 147, IC 10 [191] и And III [192]. Однако, тангенциальная скорость определяется с большими ошибками, и значимость таких измерений редко превышает 4 сигма. Поэтому, чтобы оценить массу М 31 по движениям спутников, мы должны по-прежнему полагаться только на их лучевые скорости.

Тангенциальная скорость Туманности Андромеды относительно нашей Галактики также остается весьма спорной (см. рис. 6 в [190]). Salomon et al. [190] пришли к выводу, что сближение этих двух гигантских галактик радиальное. Коррекция наблюдаемой скорости М 31 за движение Солнца в Галактике дает скорость сближения, равную  $-109$  км с<sup>-1</sup>. К сожалению, довольно компактное расположение спутников М 31 на небе не оставляет возможности оценить тангенциальную скорость системы, используя только лучевые скорости. Мы можем проверить только компонент скорости в направлении М 31. Средняя лучевая скорость системы спутников М 31 в пределах 200 кпк составляет  $-105 \pm 20$  км с<sup>-1</sup>, что почти идентично скорости центральной галактики. За пределами 200 кпк средняя скорость спутников начинает расходиться со скоростью М 31, достигая разницы  $\Delta V \approx 35$  км с<sup>-1</sup>, под влиянием М 33, её спутников And XXII и Tri III, и NGC 185. Поэтому для дальнейшего анализа мы предполагаем лобовое сближение нашей Галактики и Туманности Андромеды со скоростью  $V = -109$  км с<sup>-1</sup>.

Мы оценили полную массу Туманности Андромеды, используя критерий массы по лучу зрения, предполагающий изотропное распределение орбит для случая наблюдения системы извне (Раздел 2.3.2). Результаты для различных подвыборок спутников представлены в Таблице 8. В дополнение к размеру выборки (#), дисперсии скоростей ( $\sigma_V$ ) и оценке массы по лучу зрения ( $M_I$ ), в таблице также представлена оценка масса ( $M_I^c$ ) скорректированная за ошибки расстояния (см.

Раздел 2.5.3), и оценка, полученная классическим методом проекционной массы ( $M_I^p$ ), предложенным Bahcall & Tremaine [21]. Описание подвыборок приведено ниже.

Как и в случае нашей Галактики, выборка спутников М 31 для определения массы требует тщательного рассмотрения. Из общего списка 45 спутников вокруг галактики Андромеды в пределах 300 кпк мы исключили все объекты с неизвестными, сомнительными или неточными измерениями расстояний, поскольку они могут быть источником больших систематических ошибок. В их число попадают 8 объектов из обзора Pan-Andromeda Archaeological Survey (PAndAS) без измерений расстояний. Мы также исключили все объекты, чьи ошибки расстояний превышают 5%, а именно: Tri III (6.4%), вероятный спутник М 33 [193]; шаровое скопление Bol 520 (9.6%); IC 10 (5.7%) и And XXVII (5.7%), которые находятся в области высокого поглощения. В таблице 8 эта выборка обозначена как “ $D \& cz$ ”.

Группа Андромеды имеет свой аналог БМО. Как показано в работе [194], М 33 находится вблизи апоцентра своего первого пролета вокруг Туманности Андромеды. Вдоль её траектории тянется шлейф нейтрального водорода. Поэтому мы исключили из рассмотрения М 33 с его свитой, состоящей из And XXII и Tri III<sup>2</sup>, как не удовлетворяющие требованию изотропности их орбит и вириализации в системе. Эта выборка помечена как “w/o 2”, поскольку она исключает 2 галактики. По аналогичной причине мы не включаем в рассмотрение And XVIII на расстоянии  $1.33^{+0.06}_{-0.09}$  Мпк [195], которая находится за Андромедой на расстоянии 579 кпк и еще не достигла вириальной зоны М 31. And XXX имеет чрезвычайно высокую лучевую скорость  $V = 159.6 \text{ км с}^{-1}$  относительно Туманности Андромеды, поэтому в дополнение к подгруппе М 33 мы также исключили её из рассмотрения, так как она могла бы значительно исказить данные. Мы называем эту выборку “w/o 3”.

Мы считаем, что последняя выборка дает наиболее реалистичную оценку массы. Таким образом, наша окончательная выборка содержит 30 спутников в пределах 300 кпк от М 31. Их распределение характеризуется стандартным отклонением лучевой скорости  $\sigma_V = 112.7 \text{ км с}^{-1}$  и средним расстоянием  $\langle r \rangle = 138 \text{ кпк}$  от Туманности Андромеды. Используя метод лучевой скорости для близких групп (раздел 2.3.2), мы оцениваем общую массу Туманности Андромеды равную  $M_I = (17.0 \pm 3.7) \times 10^{11} M_\odot$ . Как и в случае нашей Галактики, и “бегущая”

<sup>2</sup>Tri III уже был исключен на предыдущем этапе из-за недостаточной точности измерения расстояния.

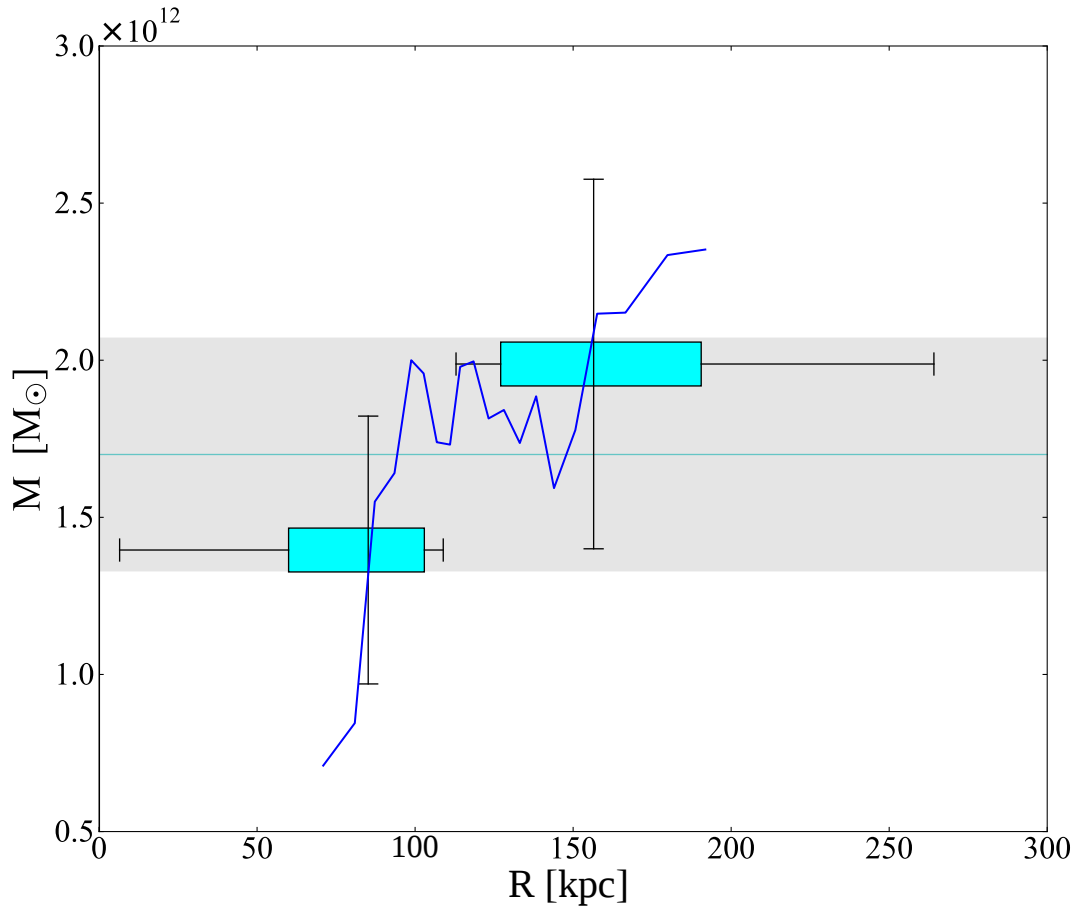


Рисунок 2.7 — Результирующая оценка массы Туманности Андромеды в зависимости от расстояния. Два прямоугольника соответствуют как ближним, так и дальним подвыборкам, каждая из которых содержит 15 спутников. Они дают такое же представление данных, как описано на рис. 2.4. Оценка полной массы  $M = (17.0 \pm 3.7) \times 10^{11} M_{\odot}$  показана голубой линией вместе с её ошибкой (серая заливка). Сплошная синяя линия показывает бегущую оценку массу.

масса и подвыборки близких и более далеких спутников показывают тенденцию к росту массы на расстояниях от 100 до 200–300 кпк (рис. 2.7).

Было бы полезно сравнить этот результат с классическим подходом, основанным на использовании только проекционных расстояний и лучевых скоростей. Используя тот же самый список спутников, метод проекционной массы [21] дает очень близкую оценку массы  $M_1^p = (17.4 \pm 4.0) \times 10^{11} M_{\odot}$ , но с худшей точностью. Однако, данный метод позволяет нам включать в анализ объекты без точных измерений расстояний и повышать точность за счет статистики. Внутри проекционного радиуса 300 кпк от М 31 находится 47 галактик с известными скоростями. Эта выборка обозначена “cz” в таблице 8. Для нее мы получаем оценку проекционной массы  $M_1^p = (22.7 \pm 4.2) \times 10^{11} M_{\odot}$ . Заметно, что точность все еще ниже,

чем в нашем подходе. Это указывает на важность знания распределения спутников в пространстве для более точной оценки массы галактики.

### 2.5.3 Влияние погрешностей измерения расстояния

Предыдущий результат был получен в предположении, что мы знаем расстояния галактик абсолютно точно. К сожалению, случайные ошибки в оценках расстояний приводят к систематическому смещению в измеренном среднем расстоянии спутников от центральной галактики и фиктивному растяжению системы вдоль луча зрения. В результате мы переоценим значение  $v^2 r$  и, как следствие, массу группы галактик. Этот эффект может быть особенно значительным, когда ошибки расстояний станут сопоставимы с характерным размером системы.

Типичная точность измерения расстояний в ближней Вселенной составляет 3–4%. Для спутников нашей Галактики это соответствует типичной ошибке расстояния порядка нескольких килопарсек, что пренебрежимо мало по сравнению с вириальным радиусом Галактики. В случае Туманности Андромеды ситуация хуже. На расстоянии М 31 типичная ошибка составляет 20–30 килопарсек, что составляет порядка 10% от её вириального радиуса.

Чтобы оценить вклад этой систематической неопределённости в массу М 31, мы применяем метод Монте-Карло, который позволяет нам моделировать измерения расстояний и распространение ошибок контролируемым образом. Предполагая гауссово распределение ошибок модуля расстояния, мы случайным образом изменяем измеренный модуль расстояния в соответствии с его точностью измерения для всех галактик в группе, включая саму Туманность Андромеды. Полученные модули затем преобразуются в линейные расстояния стандартным способом. Все это приводит к асимметричному смещению галактик вдоль луча зрения относительно их исходного положения. Оценка массы производится с использованием точно такой же процедуры, как и для реальной группы галактик. На основе 100 000 случайных генераций мы обнаружили, что наблюдаемые ошибки расстояния приводят к эффективному завышению массы на 9.7% со стандартным отклонением 3%. В результате для нашей окончательной выборки из 30 спутников мы получаем скорректированную массу М 31 равную  $M_1^c = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_\odot$ , где ошибка учитывает небольшой разброс, внесенный ошибками измерения рас-

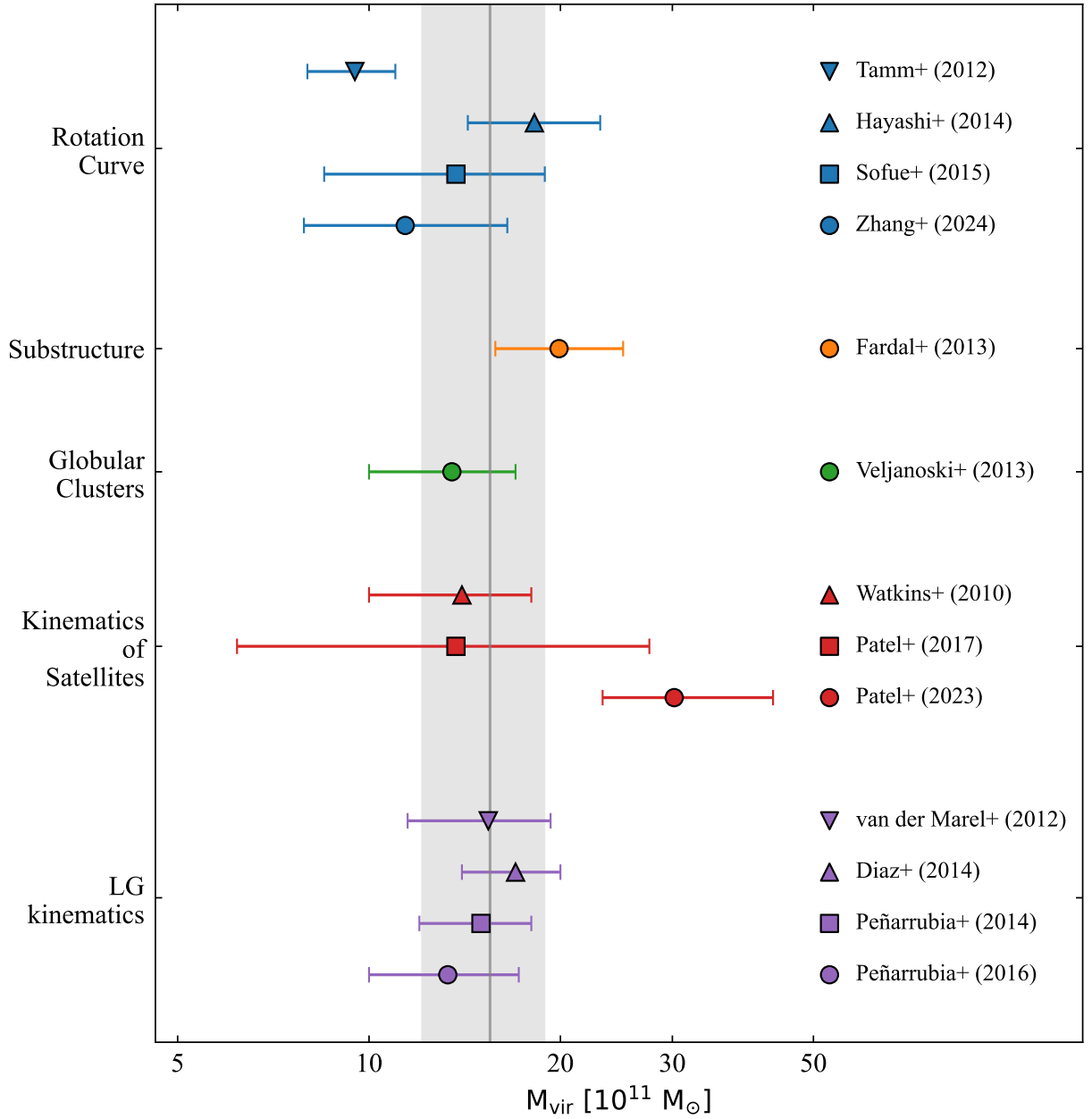


Рисунок 2.8 — Сравнение нашей оценки массы M 31 (серая линия) с недавно опубликованными оценками массы на шкале 200 кпк, полученными с использованием различных методов.

стояний. Как видно на рис. 2.8, основанном на обзоре [20], это значение отлично согласуется с недавними оценками массы М 31 на шкале 300 кпк, среднее значение которой составляет  $(1.61 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $0.34 \times 10^{12} M_{\odot}$ .

С одной стороны, Туманность Андромеды легче наблюдать, чем Млечный Путь, поскольку мы можем видеть её снаружи. Однако, значительно большее расстояние накладывает определенные ограничения. Среди прочих факторов это отражается в меньшем количестве исследований, посвященных оценке массы М 31. За тот же самый период с 2010 года мы собрали всего 13 измерений полной массы Туманности Андромеды в пределах 200 кпк, что в три раза меньше количества оценок, доступных для Млечного Пути. Мы добавили только три новых измерения к обзору [20]. Компиляция оценок вириальной массы Туманности Андромеды представлена в Таблице 9. Она содержит следующую информацию: 1) ссылка на авторов, как представлено на рис. 2.8; 2) масса М 31 внутри вириального радиуса 200–300 кпк; 3) максимальный радиус,  $R_{\max}$ , охватываемый трассерами массы; 4) ссылка на публикацию.

Как показано на рис. 2.8, наше значение  $M_{\mathrm{I}}^c = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_{\odot}$ , обозначенное вертикальной линией с заштрихованной областью, иллюстрирующей точность оценки, прекрасно согласуется с 13 недавними измерениями массы М 31 в пределах 200 кпк. Среднее значение данных из литературы составляет  $(15.8 \pm 1.4) \times 10^{11} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $5.1 \times 10^{11} M_{\odot}$ , и медианой  $14.0 \times 10^{11} M_{\odot}$ .

Таблица 9 — Оценки массы Туманности Андромеды начиная с 2010 года

| Authors                  | $M_{\mathrm{vir}}$<br>$\times 10^{11} M_{\odot}$ | $R_{\max}$<br>kpc | Ref.  |
|--------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|-------|
| <b>Rotation Curve</b>    |                                                  |                   |       |
| Tamm et al. (2012)       | 9.5 $\pm 1.5$                                    | 25                | [196] |
| Hayashi et al. (2014)    | 18.2 $^{+4.9}_{-3.9}$                            | 30                | [197] |
| Sofue (2015)             | 13.7 $\pm 5.2$                                   | 31                | [198] |
| Zhang et al. (2024)      | 11.4 $^{+5.1}_{-3.5}$                            | 125               | [199] |
| <b>Substructure</b>      |                                                  |                   |       |
| Fardal et al. (2013)     | 19.9 $^{+5.2}_{-4.1}$                            |                   | [200] |
| <b>Globular Clusters</b> |                                                  |                   |       |

| Authors                         | $M_{\text{vir}}$<br>$\times 10^{11} M_{\odot}$ |                   | $R_{\text{max}}$<br>kpc | Ref.  |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------|
| Veljanoski et al. (2013)        | 13.5                                           | $\pm 3.5$         | 130                     | [201] |
| <b>Kinematics of Satellites</b> |                                                |                   |                         |       |
| Watkins et al. (2010)           | 14                                             | $\pm 4$           | 300                     | [116] |
| Patel et al. (2017)             | 13.7                                           | $^{+13.9}_{-7.5}$ | 300                     | [202] |
| Patel et al. (2023)             | 30.2                                           | $^{+13.0}_{-6.9}$ | 300                     | [191] |
| <b>this work</b>                | 15.5                                           | $\pm 3.4$         | 292                     | [175] |
| <b>Local Group Kinematics</b>   |                                                |                   |                         |       |
| van der Marel et al. (2012)     | 15.4                                           | $\pm 3.9$         |                         | [203] |
| Diaz et al. (2014)              | 17                                             | $\pm 3$           |                         | [204] |
| Peñarrubia et al. (2014)        | 15                                             | $\pm 3$           |                         | [130] |
| Peñarrubia et al. (2016)        | 13.3                                           | $^{+3.9}_{-3.3}$  |                         | [98]  |

**Примечания:**

**Rotation Curve** измеряет круговые скорости трассеров (звёзд, газа) для определения распределения масс. В случае M 31 наблюдения H $\alpha$  простираются до  $\sim 40$  кпк, выявляя плоскую кривую вращения, что указывает на доминирование темной материи. Оценка вириальной массы в пределах  $\sim 200$  кпк основана на модели гравитационного потенциала M 31.

**Substructure** Приливные течения (например, Giant Stream) накладывают ограничения на массу и форму гало с помощью моделирования  $N$ -тел. Необходимо учитывать свойства прародителя и историю слияний.

**Globular Clusters** (GC) прослеживают массу на промежуточных расстояниях 20–200 кпк. Преимуществом является большое количество известных GC. Однако, основная проблема заключается в различии *in-situ* и недавно образовавшихся скоплений, а также в учете приливных эффектов.

**Kinematics of Satellites** использует скорости и расстояния до карликовых спутников для определения гравитационной массы на расстоянии 100–300 кпк. К проблемам относятся небольшие размеры выборки ( $< 30$  спутников) и потенциальный дисбаланс из-за продолжающихся слияний.

**Local Group Kinematics** Сближение нашей Галактики и Туманности Андромеды дает оценку полной массы с использованием временного аргумента. Современные подходы включают учет собственных движений и возмущения со стороны БМО, но зависят от предполагаемых соотношений масс.

## 2.6 Основные результаты Главы 2

Мы разработали метод оценки массы групп с доминирующей центральной галактикой, основанный на оценке  $v^2 r$ , предложенной Bahcall & Tremaine [21], для

случая известного трёхмерного распределения спутников в системе. Такая ситуация реализуется в близкой Вселенной, где доступны высокоточные расстояния для большого числа галактик. Поскольку единственная неучтенная неопределённость в этом случае связана с проекцией трёхмерной скорости на луч зрения, мы называем этот подход оценкой массы по лучу зрения. Как и в исходной методологии проекционной массы, этот подход требует предположения о природе орбит спутников в системе, которая выражается через средний квадрат эксцентриситета  $\langle e^2 \rangle$ . Мы рассмотрели два случая: наблюдения из центральной галактики (случай Млечного Пути и его спутников) и наблюдения извне системы. Несмотря на существенное различие условий наблюдения, отраженное в уравнениях (2.18) и (2.24), в случае изотропных орбит  $\langle e^2 \rangle = 1/2$  поправочный коэффициент для обоих случаев оказался одинаковым и равным 4 (уравнения (2.22) и (2.28)). Этот коэффициент отличается от наивно ожидаемой поправки 3 для случая случайной проекции вектора скорости.

Сравнение с численными космологическими симуляциями подтвердило применимость метода и показало хорошее соответствие с истинной массой систем в предположении изотропного распределения орбит спутников. Кроме того, эта методология позволяет нам проследить распределение массы системы с расстоянием.

К сожалению, ошибки измерения расстояния могут привести к значительному смещению в оценке массы. Поскольку ошибки расстояния увеличиваются с расстоянием, применимость метода за пределами Местной Группы сильно ограничена и требует более сложного байесовского подхода и совместного рассмотрения предполагаемого распределения спутников и их скоростей для получения более надёжного определения массы.

Применение этой методологии к Местной группе позволило нам оценить массы Млечного Пути и Туманности Андромеды, предполагая изотропное распределение орбит спутников.

Мы оцениваем полную массу нашей Галактики в пределах 240 кпк равную  $M_{\text{MW}} = (7.9 \pm 2.3) \times 10^{11} M_{\odot}$ . Это значение хорошо согласуется с недавними измерениями других авторов. Среднее значение 28 отдельных измерений, выполненных с 2010 года, составляет  $(10.3 \pm 0.6) \times 10^{11} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $3.0 \times 10^{11} M_{\odot}$ , и медианным значением  $9.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ . Аналогичные значения были получены в недавних обзорах. Bland-Hawthorn & Gerhard [18] получили среднее значение индивидуальных оценок массы равное  $(11 \pm 3) \times 10^{11} M_{\odot}$ . Wang et al. [17]

пришли к выводу, что масса нашей Галактики известна с неопределённостью с фактором двойка и ограничена диапазоном от  $5 \times 10^{11}$  и  $20 \times 10^{11} M_{\odot}$ . Bobylev & Baucke [19] определили среднее значение  $(8.8 \pm 0.6) \times 10^{11} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $2.4 \times 10^{11} M_{\odot}$ , используя компиляцию 20 измерений из литературы.

Значительно большая масса нашей Галактики  $(10.7 \pm 3.0) \times 10^{11} M_{\odot}$  получается при включении в рассмотрение Leo I. Его вклад перевешивает все другие спутники и увеличивает общую массу на 35%. Измерения его собственного движения [25; 140] указывают, что Leo I находится на чрезвычайно вытянутой орбите с эксцентриситетом  $\sim 0.8$ . Учет этого эффекта должен немного уменьшить вклад Leo I по сравнению с другими спутниками, но в любом случае его вклад останется значительным. Таким образом, повышение точности измерения трёхмерной скорости и уточнение параметров орбиты Leo I чрезвычайно важно для понимания структуры гало нашей Галактики и оценки её полной массы.

Мы оцениваем общую массу M31 равной  $M = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_{\odot}$  в пределах радиуса 300 кпк. Это значение также отлично согласуется с недавними измерениями. Мы дополнили компиляцию Bhattacharya [20] тремя последними измерениями. Среднее значение массы Туманности Андромеды, полученное на основе публикаций за последние 15 лет, составляет  $(15.8 \pm 1.4) \times 10^{11} M_{\odot}$  с разбросом  $5.1 \times 10^{11} M_{\odot}$ .

Таким образом, измерение полной массы двух основных галактик Местной Группы по кинематике их спутников указывает на то, что Туманность Андромеды в два раза массивнее Млечного Пути,  $M_{M31}/M_{MW} = 2.0 \pm 0.7$ . Похожее соотношение  $M_{M31}/M_{MW} = 1.75^{+0.54}_{-0.28}$  получено недавно Carlesi et al. [129] с использованием контролируемого алгоритма машинного обучения на космологическом моделировании в рамках стандартной  $\Lambda$ CDM-модели и применением его к распределению расстояний и скоростей спутников нашей Галактики и M31. Однако, следует отметить, что Хаббловский поток вне вириальных радиусов Млечного Пути и Туманности Андромеды указывает, что барицентр Местной Группы расположен примерно посередине между этими галактиками. Karachentsev et al. [15] оценили отношение масс нашей Галактики и Туманности Андромеды равным  $M_{M31}/M_{MW} \simeq 4/5$ . К сожалению, ошибки в определении масс остаются достаточно большими, чтобы говорить о статистически значимой разнице между этими значениями.

## Глава 3. Замороженные окраины: холодный Хаббловский поток и масса Местной группы

### 3.1 Введение

Анализ кинематики спутников внутри вириальных зон является основным способом оценки массы галактических систем с использованием различных аналогов теоремы вириала [21]. В случае далеких систем мы можем измерить только лучевые скорости и угловое расстояние между галактиками. Благодаря высокоточным измерениям расстояний мы знаем трёхмерное распределение спутников вокруг Туманности Андромеды (M31), что позволяет нам улучшить оценки её массы. Благодаря миссии Gaia [135] были измерены собственные движения большинства спутников Млечного Пути (MW), однозначно определяющие все 6 компонент фазового пространства для каждого спутника. Эта информация активно используется для уточнения структуры нашей Галактики и оценки её полной массы.

Карликовые галактики, расположенные за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды, предоставляют альтернативный метод оценки полной массы Местной группы по отклонению их скоростей от линейного закона Хаббла. Анализ пекулярных движений галактик является ключевым методом для картирования распределения материи в масштабах от нескольких до сотен мегапарсек. В качестве примера, Tully et al. [205] открыли сверхскопление Ланиакеля, которое включает Местное Сверхскопление, по когерентному “натеканию” галактик в эту область. Измерение радиуса сферы нулевой скорости, также известного как радиус остановки или поворота, стало стандартным методом оценки общей массы Местной группы [15] и других близких групп галактик [81]. Следует подчеркнуть, что внутри радиуса остановки падающие объекты находятся в нелинейном режиме и для описания их движения необходимо использовать более сложные модели. Точное решение для потока Хаббла [206] для сферически-симметричного распределения материи дает нам инструмент для оценки массы на разных расстояниях от гравитирующего центра.

Структура Местной Группы более сложная, чем эта простая модель. Она демонстрирует хорошо известное гантелеобразное распределение спутников во-

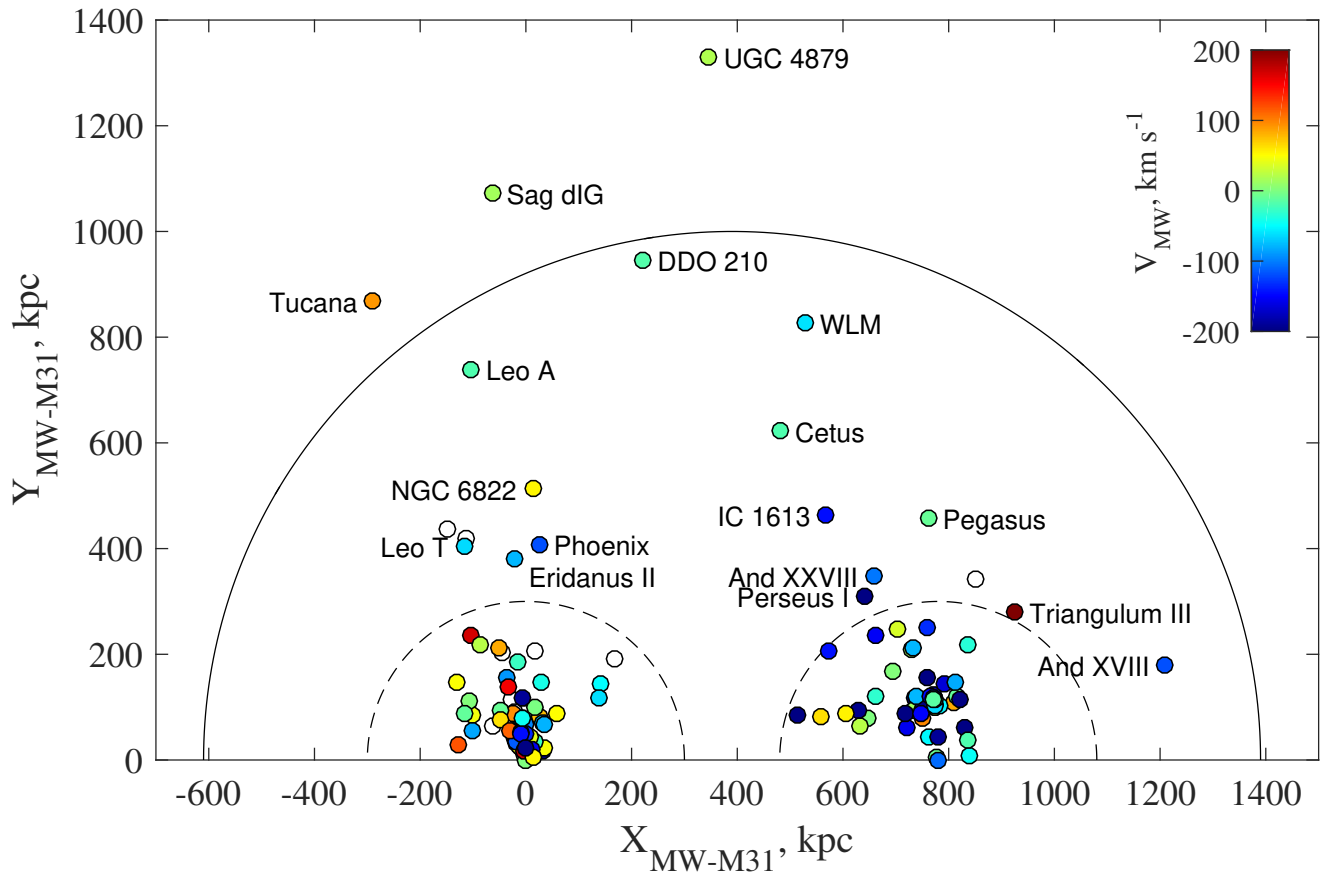


Рисунок 3.1 — Распределение галактик Местной группы в цилиндрической проекции, где ось  $X$  направлена от центра Млечного Пути к центру Галактики Андромеды, а ось  $Y$  соответствует расстоянию от оси  $X$ . Штриховые полукруги радиусом 300 кпк примерно соответствуют размеру вириальных зон вокруг двух основных галактик. Сплошной полукруг радиусом 1 Мпк показывает примерную границу Местной группы. Объекты окрашены в соответствии с их лучевыми скоростями относительно центра нашей Галактики. Незакрашенные точки обозначают карликовые галактики с неизвестными скоростями.

круг двух гигантских галактик сопоставимых масс, Млечного Пути и Туманности Андромеды (см. рис. 3.1). Все остальные члены Местной Группы значительно уступают им по массе и светимости. На сегодняшний день в пределах 1 Мпк относительно барицентра Местной Группы обнаружена 134 галактики<sup>1</sup>. Большинство из них сосредоточено в вириальных зонах вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды. В пределах 300 кпк находится 67 спутников нашей Галактики и 48 спутников Туманности Андромеды внутри объёма такого же размера 300 кпк. Ри-

<sup>1</sup>В это общее число 134 галактик входят группы вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды, компиляция которых была сделана Makarov et al. [175] и представлена в Таблице 1 из раздела 1.2 и в Таблице 7 из раздела 2.5.2, а также дополнительные периферийные члены Местной Группы, собранные в этой главе (см. Таблицу 10).

сунок 3.1 иллюстрирует, что карликовые галактики за пределами вириальных зон сосредоточены в плоскостях, проходящих через две основные галактики и ориентированных примерно перпендикулярно линии, их соединяющей.

Несмотря на это, можно предположить, что отклонения потенциала Местной Группы от сферической симметрии на её периферии относительно невелики. Поэтому, рассматривая движения галактик относительно центра масс Млечного Пути и Туманности Андромеды, можно ожидать, что падение галактик на Местную Группу определяется общей массой системы и направлено к её центру масс. Нашей целью является анализ движения галактик за пределами вириальных зон, оценка общей массы Местной Группы по форме потока Хаббла и попытка проследить изменения профиля массы на периферии системы.

### 3.2 Модель поля скоростей

Несмотря на то, что собственные движения были измерены для большого числа даже отдаленных членов Местной группы, эти данные мало пригодны для нашего анализа. Для галактик, расположенных на расстоянии более 300 кпк, погрешности варьируются от 0.01 до  $0.4 \text{ mas yr}^{-1}$ , со средним значением  $0.14 \text{ mas yr}^{-1}$  [94], что приводит к типичным погрешностям скорости на таких расстояниях в сотни километров в секунду. Собственные движения оказались значимыми на уровне более 3 сигма только для двух галактик, NGC 6822 и WLM. Однако, даже в этих случаях погрешности тангенциальной скорости составляют примерно 35 и  $170 \text{ km s}^{-1}$  для NGC 6822 и WLM, соответственно, что значительно хуже типичной точности измерений лучевой скорости, которая составляет порядка нескольких километров в секунду. Поэтому Battaglia et al. [94] предостерегают читателя, что для удаленных галактик “погрешность тангенциальной скорости все ещё слишком велика для научных приложений”. Ввиду этого, мы сосредоточились исключительно на анализе лучевых скоростей галактик.

На рисунке 3.2 представлена схематическая диаграмма поправок, описанных ниже. Барицентр Местной Группы обозначен как ВС. Маленькие буквы относятся к наблюдаемым величинам, а заглавные буквы обозначают величины относительно барицентра. Синие точки указывают на реальные объекты: MW, M 31 и рассматриваемую галактику. Положение наблюдателя отмечено символом Солн-

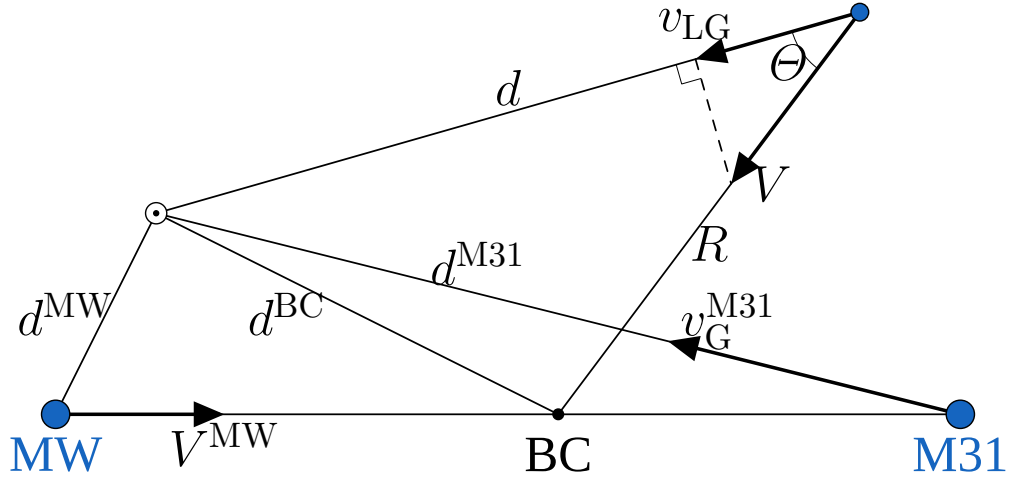


Рисунок 3.2 — Схема расчета поля скоростей в окрестности Местной Группы. Символ  $\odot$  отмечает местоположение наблюдателя. Положения MW, M 31 и исследуемой галактики показаны синими точками. Барицентр (BC) Местной Группы обозначен черной точкой. Векторы расстояния и скорости обозначены согласно описанию в тексте.

ца. Как часть нашей Галактики, наблюдатель не участвует самостоятельно в хаббловском потоке.

Прежде всего, мы учли движение Солнца в Галактике, переведя гелиоцентрические скорости,  $v_h$ , в галактоцентрическую систему.

$$v_G = v_h + \mathbf{V}_\odot \cdot \mathbf{n}, \quad (3.1)$$

где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении на галактику, и  $\mathbf{V}_\odot$  — вектор скорости Солнца  $(V_x, V_y, V_z) = (9.5, 250.7, 8.56)$  км с $^{-1}$  в галактических координатах относительно центра Млечного Пути [75], основанный на 18-летних наблюдениях собственного движения Sgr A\* [137] и расстоянии  $d^{\text{MW}} = 8249 \pm 9 \pm 45$  пк до центральной сверхмассивной черной дыры [138].

Далее, мы предполагаем, что барицентр Местной Группы в первую очередь определяется её двумя доминирующими галактиками и лежит вдоль линии, соединяющей центры Млечного Пути и Туманности Андромеды. Для заданного отношения масс MW к M 31,  $x$ , вектор положения центра масс,  $\mathbf{d}^{\text{BC}}$ , определяется следующим уравнением:

$$\mathbf{d}^{\text{BC}} = \frac{x}{1+x} \mathbf{d}^{\text{MW}} + \frac{1}{1+x} \mathbf{d}^{\text{M31}}, \quad (3.2)$$

где  $\mathbf{d}^{\text{MW}}$  и  $\mathbf{d}^{\text{M31}}$  являются векторами положения MW и M 31, соответственно. Мы приняли расстояние до M 31 равным  $d^{\text{M31}} = 776.2_{-21}^{+22}$  кпк [131], что соответствует расстоянию между центрами галактик равному 780.3 кпк.

Затем, зная вектор скорости Туманности Андромеды относительно нашей Галактики и соотношение масс этих галактик, мы можем определить вектор скорости Млечного Пути относительно барицентра Местной Группы. Гелиоцентрическая скорость М31 известна с хорошей точностью,  $V_h^{M31} = -301.0 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1}$  [179]. После поправки за движение Солнца мы определили её галактоцентрическую скорость равной  $v_G^{M31} = -109 \pm 2 \text{ км с}^{-1}$ . Salomon et al. [190] отмечает, что тангенциальная скорость М31 остается плохо определенной, и делает вывод, что сближение этих двух гигантских галактик радиальное. В соответствии с этим выводом мы также предполагаем, что тангенциальная скорость Туманности Андромеды равна нулю. Таким образом, движение нашей Галактики к барицентру Местной Группы описывается уравнением

$$\mathbf{V}^{MW} = \frac{v_G^{M31}}{1+x} \mathbf{n}^{MW-M31}, \quad (3.3)$$

где единичный вектор,  $\mathbf{n}^{MW-M31} = (\mathbf{d}^{M31} - \mathbf{d}^{MW})/|\mathbf{d}^{M31} - \mathbf{d}^{MW}|$ , определяет направление из центра MW к центру М31. Соответствующая поправка к наблюдаемой лучевой скорости, учитывающая движение Млечного Пути в пределах Местной группы, равна

$$v_{LG} = v_G + \mathbf{V}^{MW} \cdot \mathbf{n}, \quad (3.4)$$

где, как и прежде,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении рассматриваемой галактики.

Затем, предполагая, что внешние члены Местной Группы движутся к её барицентру или от него, мы можем определить их барицентрические скорости, депроецируя лучевые скорости (после применения всех поправок, описанных выше):

$$V = \frac{v_{LG}}{\cos \Theta}. \quad (3.5)$$

Расстояние галактики от барицентра определялось обычным способом:

$$\mathbf{R} = \mathbf{d} - \mathbf{d}^{BC}. \quad (3.6)$$

Аналитическое решение, полученное Baushev [206] для стандартной плоской  $\Lambda$ CDM Вселенной, в которой  $\Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$ , описывает поток Хаббла вокруг концентрации массы как функцию плотности, заключенной в сфере заданного радиуса, и приведено в уравнениях (6), (10) и (14) в исходном исследовании. Следовательно, на основе скорости  $V$  и расстояния  $R$  галактики относительно барицентра Местной Группы мы можем решить обратную задачу — оценить массу,

Таблица 10 — Список галактик вне вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды

| Name           | J2000.0         | $(m - M)_0$       | Method       | $V_h$              | $D_{MW}$ $D_{M31}$ |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------------|
|                |                 | mag               |              | км с <sup>-1</sup> | kpc                |
| WLM            | 000158.1–152740 | 24.96 +0.07 –0.07 | TRGB [13]    | –122.0 ±2.0 [208]  | 981 865            |
| And XVIII      | 000214.5+450520 | 25.43 +0.05 –0.03 | HB [177]     | –337.2 ±1.4 [178]  | 1222 465           |
| Cetus          | 002611.0–110240 | 24.48 +0.10 –0.10 | TRGB [13]    | –83.9 ±1.2 [77]    | 788 691            |
| IC 1613        | 010447.8+020800 | 24.32 +0.05 –0.05 | RR Lyr [131] | –231.0 ±1.0 [209]  | 734 511            |
| Triangulum III | 012141.3+262332 | 24.92 +0.07 –0.07 | TRGB [193]   | 138.6 ±0.5 [188]   | 966 315            |
| Phoenix        | 015106.3–442641 | 23.06 +0.12 –0.12 | TRGB [23]    | –21.2 ±1.0 [210]   | 409 859            |
| Perseus I      | 030123.6+405918 | 24.24 +0.06 –0.06 | RR Lyr [131] | –325.9 ±3.0 [182]  | 711 340            |
| Eridanus II    | 034421.1–433159 | 22.80 +0.10 –0.10 | BHB [211]    | 75.6 ±1.3 [25]     | 365 880            |
| UGC 4879       | 091602.2+525024 | 25.68 +0.03 –0.03 | TRGB [13]    | –29.2 ±1.6 [77]    | 1373 1398          |
| Leo K          | 092406.1+163038 | 23.16 +0.14 –0.55 | CMD [66]     |                    | 434 986            |
| Leo T          | 093453.4+170305 | 23.10 +0.10 –0.10 | TRGB [23]    | 38.1 ±2.0 [23]     | 422 984            |
| Leo A          | 095926.4+304447 | 24.44 +0.11 –0.11 | RR Lyr [212] | 23.9 ±0.1 [23]     | 777 1175           |
| Leo M          | 110521.2+252043 | 23.30 +0.41 –0.09 | CMD [66]     |                    | 460 1025           |
| Sag dIG        | 192959.0–174041 | 25.17 +0.08 –0.08 | TRGB [23]    | –79.0 ±1.0 [208]   | 1074 1365          |
| NGC 6822       | 194457.7–144811 | 23.58 +0.07 –0.07 | TRGB [13]    | –54.5 ±1.7 [77]    | 513 923            |
| DDO 210        | 204651.8–125053 | 24.95 +0.14 –0.14 | TRGB [13]    | –139.5 ±2.0 [213]  | 972 1099           |
| And XXVIII     | 223241.2+311258 | 24.36 +0.05 –0.05 | RR Lyr [131] | –331.1 ±1.8 [214]  | 745 368            |
| Tucana         | 224149.0–642512 | 24.82 +0.03 –0.03 | TRGB [13]    | 194.0 ±4.3 [215]   | 916 1378           |
| Pegasus        | 232834.1+144448 | 24.74 +0.05 –0.05 | RR Lyr [131] | –184.5 ±0.3 [179]  | 888 458            |
| Pegasus W      | 235315.0+220607 | 24.81 +0.14 –0.22 | CMD [216]    |                    | 918 349            |

заклученную в сфере радиусом  $R$ , и восстановить базовое распределение массы. В нашем анализе мы приняли космологические параметры стандартной  $\Lambda$ CDM-модели:  $\Omega_\Lambda = 0.685 \pm 0.007$ ,  $\Omega_M = 0.315 \pm 0.007$ , и  $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup>, основанные на данных миссии Planck [207].

### 3.3 Оценка массы по модели потока Хаббла

На рис. 3.3 показан поток Хаббла ближайших окрестностей, как он будет выглядеть из центроида Местной группы, расположенного строго посередине между Млечным Путем и Туманностью Андромеды. Обращает на себя внимание заметный разрыв между UGC 4879 на расстоянии 1.35 Мпк и следующим

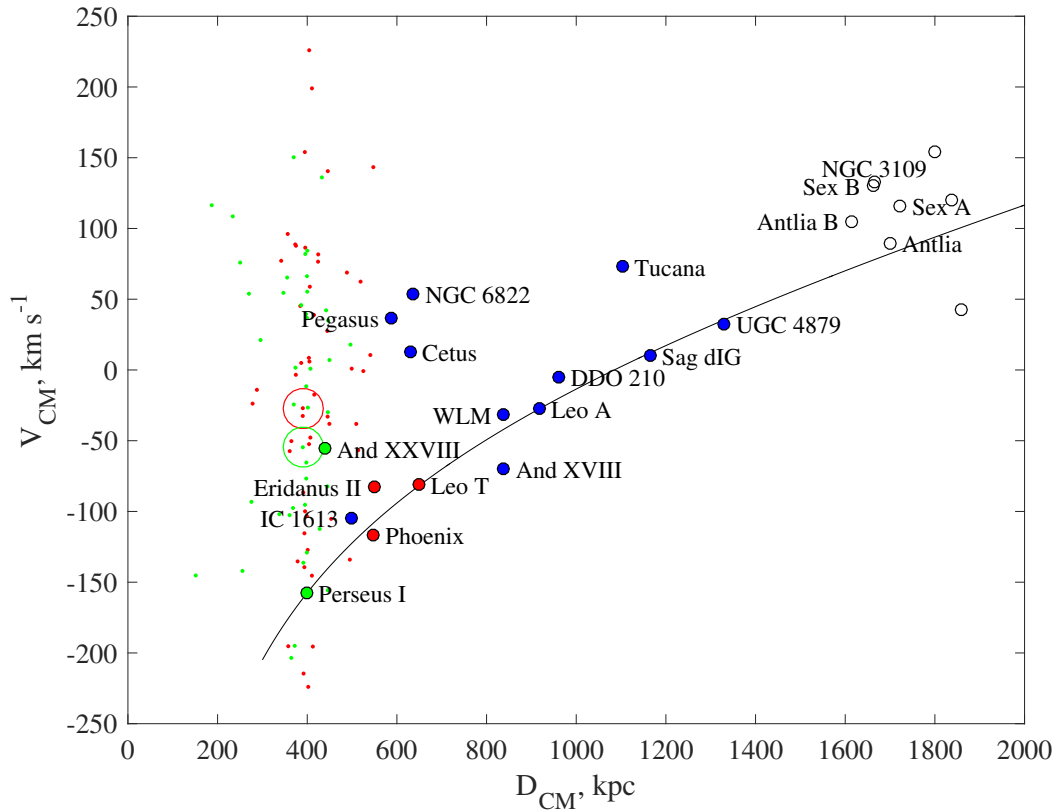


Рисунок 3.3 — Поток Хаббла относительно центроида Местной группы. Большой незакрашенный красный круг соответствует Млечному Пути, маленькие красные точки обозначают его спутники в пределах 300 кпк, а закрашенные красные круги представляют его членов на расстояниях от 300 до 450 кпк. Аналогично, Туманность Андромеды и её спутники показаны зеленым цветом. Галактики, выбранные для анализа, показаны синим цветом. Сплошная линия соответствует модели потока Хаббла вокруг точечной массы  $2.5 \times 10^{12} M_{\odot}$ .

“облаком” объектов за пределами 1.6 Мпк, которое включает Antlia B, Sextants B, NGC 3109, Antlia, Sextans A и т.д. Это дает нам естественный верхний предел для использования модели, поскольку анализ движения этих более далеких галактик может потребовать учета влияния соседних гигантских галактик М 81, М 94, Cen A, NGC 253 и IC 342, расположенных на расстоянии 3–4 Мпк.

На сегодняшний день известно 20 периферийных членов Местной Группы на расстояниях ближе 1400 кпк и за пределами 300 кпк вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды. Их список приведен в таблице 10. В ней представлены названия, координаты J2000.0, модули расстояний с ошибками, методы и источники данных, наблюдаемые гелиоцентрические скорости с ошибками и их источники. В последних двух столбцах указано расстояние от центров Млечного Пути и Туманности Андромеды, соответственно. Для всех этих галактик известны вы-

сокоточные расстояния, в то время как лучевые скорости для трёх из них еще не измерены.

Как видно на рис. 3.3, движение далеких членов Местной Группы довольно регулярно. За исключением шести галактик (And XXVIII, Triangulum III<sup>2</sup>, Pegasus, Cetus, NGC 6822, и Tucana), поле скоростей за пределами вириальных зон 300 кпк вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды достаточно хорошо описывается простой моделью Хаббловского потока [206] вокруг точечной массы.

Мы отметили объекты, лежащие в слое от 300 до 450 кпк от Млечного Пути, красным цветом (Phoenix, Eridanus II и Leo T), и аналогично галактики вокруг Туманности Андромеды — зеленым цветом (Perseus I, Triangulum III и And XXVIII). Фактически, они расположены вблизи вириальных зон, и ближайшая гигантская галактика должна оказывать доминирующее влияние на их движение, и, следовательно, наша простая модель падения на центр масс Местной Группы может не работать. Более того, Triangulum III является спутником М 33 [193]. Соответственно, её нельзя рассматривать как свободно падающую частицу. Поэтому мы не включили эти шесть галактик в анализ. Тем не менее, следует отметить, что четыре из них также довольно хорошо следуют модели (см.рис. 3.3). В результате наша окончательная выборка содержит 11 галактик, расположенных в пределах 1400 кпк от барицентра Местной Группы и на расстояниях более 450 кпк от Млечного Пути и Туманности Андромеды.

В качестве первого приближения мы можем определить положение барицентра Местной Группы на основе индивидуальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды. Оценки полной массы нашей Галактики варьируются в широком диапазоне от 0.4 до  $1.6 \times 10^{12} M_{\odot}$ . Используя 33 измерения в пределах 200 кпк из обзора Wang et al. [17], мы получаем среднее значение  $(1.07 \pm 0.05) \times 10^{12} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $0.3 \times 10^{12} M_{\odot}$ . Bobylev & Baykova [19] получили слегка меньшее значение  $(0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ , на основе 20 недавних исследований. Как правило, измерения массы Туманности Андромеды дают значения в 1.5–2 раза превышающие массу Млечного Пути. Среднее значение семи последних оценок в пределах 300 кпк, собранных Bhattacharya [20], составляет  $(1.61 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$  со стандартным отклонением  $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ .

<sup>2</sup>Triangulum III не показан на рис. 3.3 из-за его экстремально большой пекулярной скорости  $+333 \text{ км с}^{-1}$  относительно центроида Местной Группы.

В Главе 2, основанной на работе [175], был развит метод проекционной массы, предложенный Bahcall & Tremaine [21], с учётом трёхмерного распределения галактик в группе и предположении об изотропном распределении орбит спутников. Это позволило нам получить оценку полной массы Млечного Пути  $M_{\text{MW}} = (0.79 \pm 0.23) \times 10^{12} M_{\odot}$  в пределах 240 кпк, и массу Туманности Андромеды  $M_{\text{M31}} = (1.55 \pm 0.34) \times 10^{12} M_{\odot}$  в пределах 300 кпк.

Приняв отношение масс  $M_{\text{MW}}/M_{\text{M31}} = 2.0$  из последних измерений, мы можем зафиксировать положение центра масс Местной Группы и применить модель потока Хаббла. Семь из одиннадцати галактик дают согласованные оценки полной массы Местной Группы со средним значением  $M_{\text{LG}} = (2.43 \pm 0.21) \times 10^{12} M_{\odot}$  и удивительно малым разбросом, всего  $\sigma_M = 0.57 \times 10^{12} M_{\odot}$ . Важным моментом является хорошее совпадение этой оценки массы и суммы индивидуальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды  $M_{\text{MW}+\text{M31}} = (2.34 \pm 0.41) \times 10^{12} M_{\odot}$ , полученных с использованием совершенно независимых подходов. Это говорит о том, что метод, основанный на модели Хаббловского потока, эффективен, и дает результат, близкий к ожидаемой массе. Более того, из этого следует, что, по сути, вся масса Местной Группы сосредоточена вокруг двух основных галактик.

Естественным продолжением анализа является нахождение положения центра масс системы, которое минимизирует наблюдаемый разброс оценок полной массы. Учитывая предыдущий результат, что сумма индивидуальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды, выведенная из кинематики спутников, совпадает с массой Местной Группы, полученной из движения её внешних членов, мы можем быть уверены, что центр масс системы лежит на линии, соединяющей эти две гигантские галактики. Варьируя отношение масс  $M_{\text{MW}}/M_{\text{M31}}$  и, следовательно, положение барицентра, мы можем значительно, в 1.5 раза, уменьшить разброс оценок массы Местной Группы до  $\sigma_M = 0.39 \times 10^{12} M_{\odot}$ . В этом случае полная масса составляет  $M_{\text{LG}} = (2.42 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$  (см. рис. 3.4).

Минимальный разброс достигается для отношения масс MW к M 31 равном  $M_{\text{MW}}/M_{\text{M31}} = 0.74 \pm 0.10$ , что помещает барицентр на расстояние в  $447 \pm 26$  кпк от центра Млечного Пути и подразумевает движение Млечного Пути со скоростью  $62.6 \pm 2.6 \text{ км с}^{-1}$  в направлении барицентра. Это позволяет нам оценить индивидуальные массы  $M_{\text{MW}} = (1.06 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}$  и  $M_{\text{M31}} = (1.42 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$ . Результаты оценок массы Местной Группы и отношения масс MW к M 31 более подробно обсуждаются в разделе 3.5.

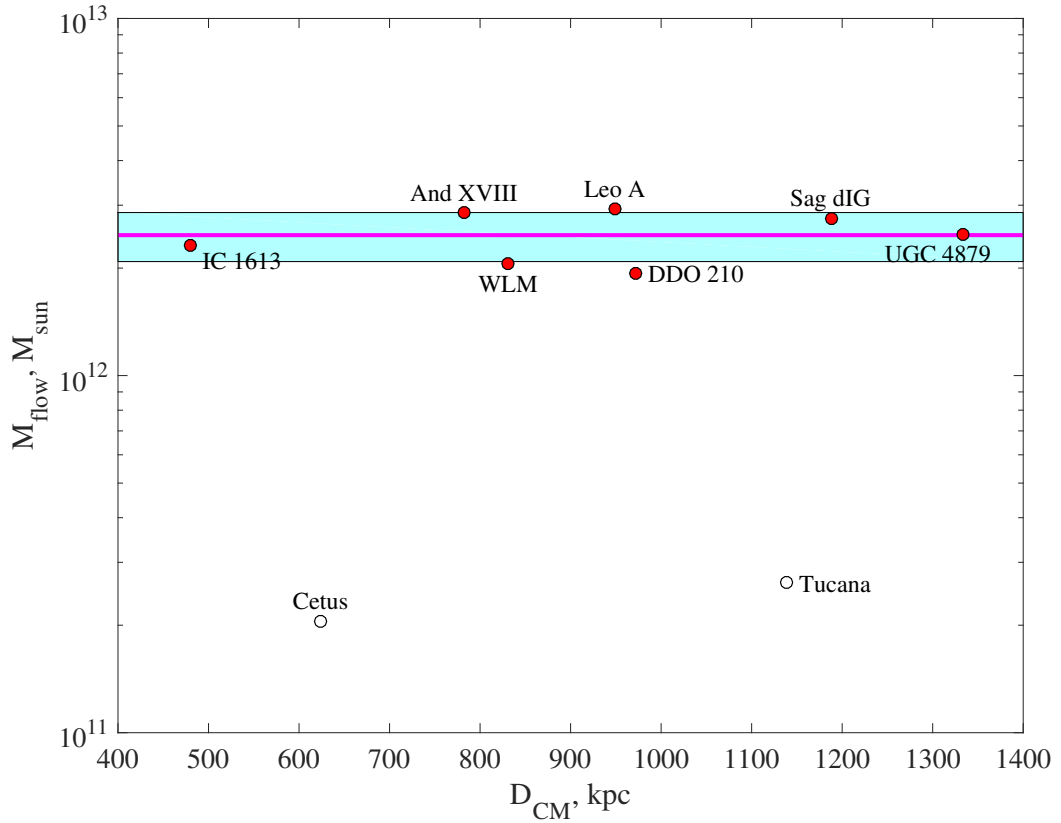


Рисунок 3.4 — Полная масса Местной Группы из модели потока Хаббла в зависимости от расстояния до центра масс Местной группы, что минимизирует разброс оценок массы.

Мы не обнаруживаем статистически значимого тренда массы в зависимости от расстояния от центра масс Местной Группы. Это указывает на то, что в широком диапазоне расстояний от 400 кпк до 1.4 Мпк полная масса системы ограничена в областях порядка 400 кпк, фактически внутри вириальных зон вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды.

### 3.4 Сравнение с моделированием HESTIA

Мы сравнили полученные результаты с  $\Lambda$ CDM-моделированием Местной группы, известным как моделирование HESTIA [122]. Расчеты HESTIA представляют собой магнитогидродинамическое моделирование Местной Группы в окружении, которое довольно точно имитирует структуры в наблюдаемой Вселенной. Моделирование проводилось с использованием модели формирования галактик AURIGA [126]. Начальные условия определялись через картирование гравитаци-

онного окружения на  $z = 0$ , реконструированного с помощью фильтра Винера из обзора пекулярных скоростей CosmicFlows-2 [124], с использованием обратного приближения Зельдовича [125].

Моделирование приводит к локальной группе, состоящей из двух спиральных галактик, массы которых ( $0.8\text{--}1.2 \times 10^{12} M_{\odot}$ ), соотношение масс ( $\sim 1:1$ ) и взаимное расстояние ( $\sim 700\text{--}800$  кпк) согласуются с измеренными наблюдательными свойствами. Более того, такие свойства, как круговая скорость, размер и история звездообразования, также находятся в пределах наблюдаемых значений. Расположение скопления, похожего на Деву, а также других космографических особенностей, таких как Местная Пустота, Местный Лист и филамент, на больших расстояниях являются естественным результатом моделирования с ограничением по Локальной Вселенной. Поскольку это моделирование с высоким разрешением (достигающее разрешения по массе  $m_{\text{dm}} = 1.2 \times 10^6$  и  $m_{\text{gas}} = 1.8 \times 10^5 M_{\odot}$  для тёмной материи и газа, соответственно), Местная Группа (и пространство за её пределами) также окружена населением маломассивных карликовых галактик.

На рисунке 3.5 мы показываем пример диаграммы скорость–расстояние в окрестности аналога Местной группы, полученной в моделировании высокого разрешения HESTIA 09\_18. Этот график имитирует реальные наблюдения, когда наблюдатель находится в центре второго по массе гало в группе, а “наблюдаемые” лучевые скорости и расстояния гало пересчитываются на центр масс системы согласно Разделу 3.2. Гало со звёздами,  $M_* \geq 1.5 \times 10^5$ , показаны цветными кругами только за пределами вириальных зон 300 кпк вокруг двух самых массивных гало. Большие круги показывают гало на расстоянии  $D \geq 450$  кпк от центральных гало. Они соответствуют реальным галактикам, используемым для оценки массы Местной Группы. Маленькие цветные кружки представляют собой “спутники” в окрестностях двух центральных галактик,  $300 \leq D \leq 450$  кпк. Вириальные зоны двух массивных гало перекрываются и располагаются на расстоянии около 400 кпк относительно центра масс. Сразу за вириальными зонами можно увидеть хорошо выраженный поток объектов, по мере их падения на группу. Выше этого потока есть ряд выбросов, представляющих, среди прочего, *backsplash*<sup>3</sup> объекты. Звездообразующие гало хорошо отслеживают общее поведение всех гало. Можно видеть, что моделирование довольно хорошо воспроизводит наблюдаемую диаграмму скорость–расстояние. Основное отличие модели-

<sup>3</sup>Термин *backsplash* описывает галактику, ранее находившуюся внутри вириального радиуса группы галактик, но вышедшую за пределы этого радиуса при движении к апоцентру.

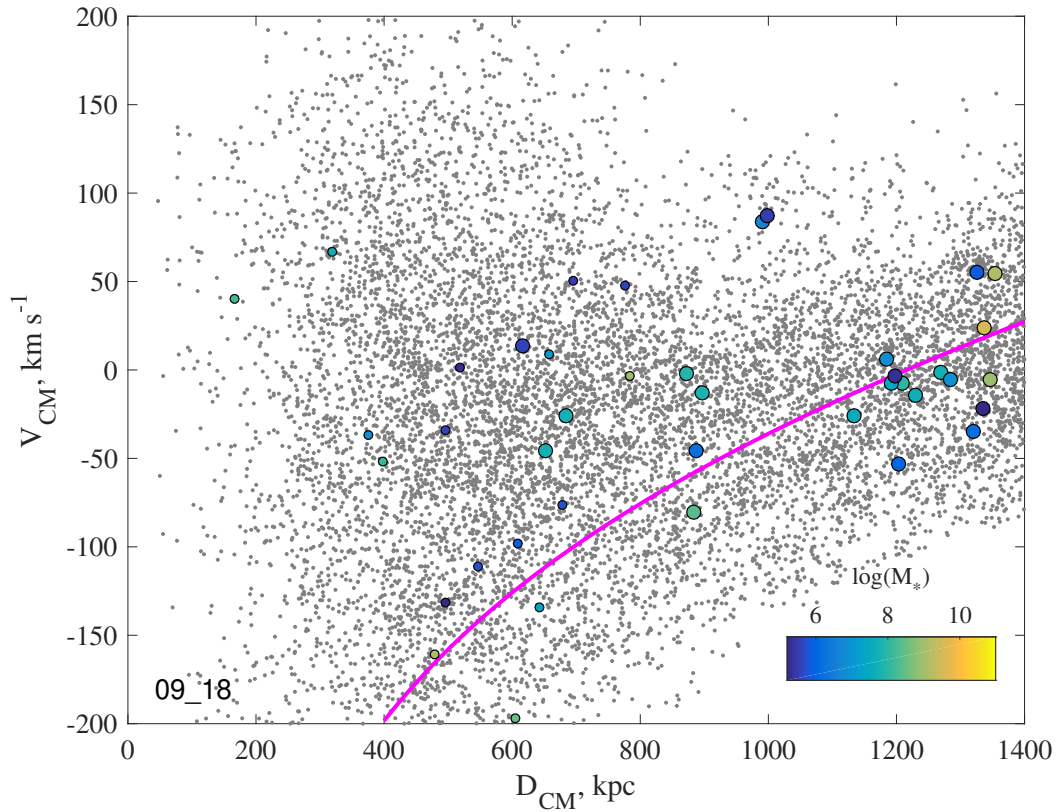


Рисунок 3.5 — Хаббловский поток в окрестности аналога Местной группы в симуляциях высокого разрешения NESTIA 09\_18. Цветные круги обозначают гало со звёздными частицами,  $M_* \geq 1.5 \times 10^5 M_\odot$ , но только за пределами вириальных зон 300 кпк вокруг двух самых массивных гало. Большие круги соответствуют удаленным членам  $D \geq 450$  кпк от аналогов MW и M31, тогда как маленькие круги обозначают более близкие объекты.

рования от Местной Группы заключается в значительно большем разбросе скоростей падающих галактик. Типичное значение в моделировании составляет около  $70 \text{ km s}^{-1}$  по сравнению с  $15 \text{ km s}^{-1}$  для галактик, следующих холодному потоку Хаббла за пределами вириальных зон в Местной Группе.

### 3.5 Обсуждение

Прежде всего, важно подчеркнуть существование двух различных популяций галактик, расположенных за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды. Две трети известных галактик следуют регулярному потоку Хаббла относительно барицентра Местной Группы. Разброс лучевых скоро-

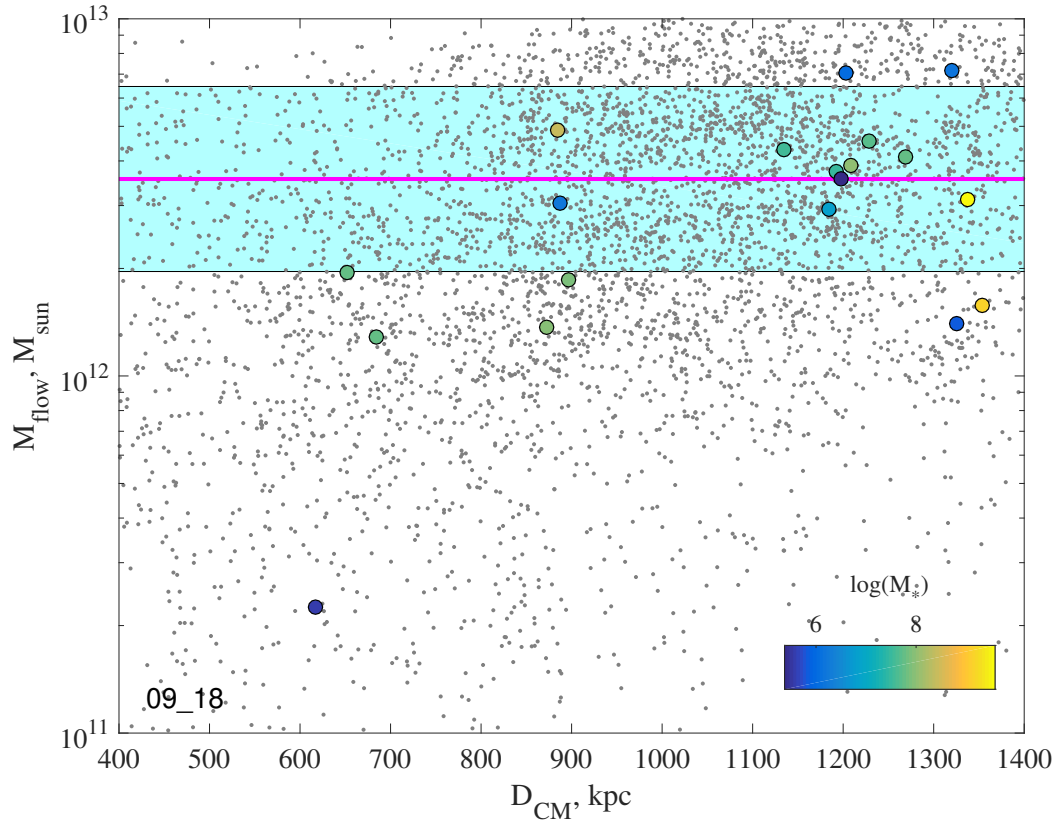


Рисунок 3.6 — Оценка массы системы из потока Хаббла, как на рис. 3.4, но с использованием данных моделирования HESTIA.

Таблица 11 — Сравнение масс, полученных из разных моделей

| Set   | $M_1 + M_2$                | $M(r < 1)$ |      | $\langle M_{\text{flow}} \rangle$ | $\sigma$ |
|-------|----------------------------|------------|------|-----------------------------------|----------|
|       | $\times 10^{12} M_{\odot}$ |            |      | $\times 10^{12} M_{\odot}$        |          |
| 09_18 | 2.76                       | 3.33       | 4980 | $3.27 \pm 0.04$                   | 2.62     |
|       | $M_* \geq 1.5 \times 10^5$ |            | 21   | $3.51 \pm 0.41$                   | 1.95     |
| 17_11 | 2.89                       | 3.33       | 4902 | $3.54 \pm 0.04$                   | 3.42     |
|       | $M_* \geq 1.5 \times 10^5$ |            | 15   | $4.87 \pm 1.00$                   | 4.37     |
| 37_11 | 1.40                       | 2.08       | 4028 | $2.72 \pm 0.03$                   | 2.18     |
|       | $M_* \geq 1.5 \times 10^5$ |            | 27   | $2.36 \pm 0.29$                   | 1.68     |

стей вокруг этого потока составляет всего  $15 \text{ км с}^{-1}$ , что может быть частично связано с неопределённостями в измерениях расстояний. Остальные галактики демонстрируют иную кинематику, как обсуждается ниже.

На чрезвычайно холодный поток Хаббла в близкой Вселенной обратили внимание Karachentsev & Makarov [217] и Karachentsev et al. [218]. Используя высокоточные расстояния, определенные по вершине ветви красных гигантов (TRGB), до близких ( $\sim 3$  Мпк) изолированных галактик, авторы обнаружили, что дисперсия лучевых скоростей относительно хаббловского разбегания галактик составляет всего  $25\text{--}30 \text{ км с}^{-1}$ . Ekholm et al. [219] нашли дисперсию скоростей  $38 \text{ км с}^{-1}$  в диапазоне расстояний  $1\text{--}8$  Мпк, используя цефеидные расстояния. Такое регулярное и холодное хаббловское расширение на фоне крайне неоднородного распределения галактик в близкой Вселенной казалось непостижимым. Внимание к этой проблеме восходит к работе Sandage et al. [220] 1972 года. Baryshev et al. [221] предположили, что эта загадка объясняется адиабатическим охлаждением хаотических движений галактик в областях доминирования тёмной энергии. Напротив, незначительный вклад  $\Lambda$  в формирование профиля плотности и поля скоростей вокруг скоплений галактик был отмечен еще в работе Lahav et al. [222] 1991 года. Используя космологическое моделирование с ограничениями по локальной Вселенной, Hoffman et al. [223] показали, что тёмная энергия никак не проявляется в динамике локальной Вселенной, а дисперсия  $\lesssim 60 \text{ км с}^{-1}$  в диапазоне расстояний от 0.75 до  $2\text{--}3$  Мпк обнаруживается более чем в половине случаев. Таким образом, они пришли к выводу, что проблема холодного потока Хаббла связана не с тёмной энергией, а со средней плотностью материи вокруг объектов.

Размер нашей выборки довольно мал: только 7 из 11 рассмотренных галактик следуют холодному потоку Хаббла. Однако, стоит отметить, что 4 из 6 спутников, расположенных вблизи вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды, исключенных из анализа из-за их близости к этим массивным галактикам, также хорошо следуют этому холодному потоку. Это дает дополнительное подтверждение реальности эффекта.

Важно подчеркнуть, что мы наблюдаем холодный поток Хаббла с дисперсией скорости всего  $15 \text{ км с}^{-1}$  внутри сферы нулевой скорости Местной Группы на расстояниях от 400 до 1400 кпк. Если это не статистическая аномалия, то столь малое хаотическое движение вызывает удивление, даже несмотря на тот факт, что ближайшие массивные соседи находятся на расстоянии  $3\text{--}4$  Мпк от Местной Группы. Современные космологические модели предсказывают постоянный при-

ток материи в группы и скопления галактик. Но даже в космологических расчетах, таких как *NESTIA*, которые достаточно хорошо воспроизводят окрестности Местной Группы, результирующие потоки не столь холодные.

Однако, не все галактики подчиняются холодному хаббловскому потоку. Положения и скорости четырех галактик не могут быть описаны моделью ни при каких разумных параметрах. По-видимому, это может указывать на то, что они не находятся на стадии первого падения в Местную Группу и уже испытывали взаимодействие с её членами ранее.

*Tucana* — изолированная карликовая сфероидальная (dSph) галактика на границе Местной Группы. *Makarova & Makarov [224]* обнаружили, что она не проявляет никаких признаков остаточного звездообразования за последние 2 млрд. лет и, следовательно, существенно отличается от других изолированных dSph-галактик, *KKR 25*, *KK 258* и *KKs 3*, а также от *And XVIII*, которая расположена в пределах Местной Группы, но далеко за пределами вириальной зоны *M 31*. Звездообразование в *Tucana* типично для dSph-спутников гигантских галактик, которые потеряли свой газ из-за лобового давления газа и приливного взаимодействия с массивной галактикой. Отметим, что *And XVIII* идеально следует потоку Хаббла.

*Cetus*, как и *Tucana*, является изолированной dSph-галактикой, расположенной в пределах Местной Группы. Он не следует соотношению морфологии и плотности Местной группы. *Taibi et al. [225]* отмечают приливные структуры во внешней части галактики, хотя их присутствие трудно согласовать с временем его возможного прохождения вокруг *M 31*, а орбита *Cetus* через Местную Группу указывает на то, что он находится в апоцентре [226]. *Gallart et al. [227]* предположил, что лучевые скорости *Tucana* и *Cetus* совместимы с предположением о том, что они находились близко к барицентру Местной Группы в прошлом, вероятно, когда они только сформировались. Аналогичным образом, *Teyssier et al. [228]* предположили, что *Tucana*, *Cetus* и *NGC 6822*, возможно, являются *backsplash* галактиками, основываясь на их текущих наблюдаемых положениях и лучевых скоростях. Данные, представленные в исследовании [229], подтверждают сценарий, согласно которому прохождение северо-западного облака *H i* создало “приливной рукав” к юго-востоку от *NGC 6822* и спровоцировало недавнюю активность звездообразования во всей галактике. В то же время, *McConnachie et al. [230]* обнаружили, что *NGC 6822* с большой вероятностью являлась изолированной галактикой и находится на этапе первого падения, основываясь на орбитальных свойствах, по-

лученных по собственным движениям самых ярких звёзд по данным Gaia Data Release 2.

Kniazev et al. [231] изучили звёздную составляющую очень слабых внешних областей Pegasus dwarf (Peg DIG), а также его газовую компоненту. Авторы исключили возможное приливное происхождение или сценарий обдирания под действием лобового давления и предположили, что Pegasus dwarf впервые падает на Местную Группу, поскольку, по-видимому, он не подвергался возмущающему воздействию со стороны других галактик. Однако, стоит также отметить, что, согласно упомянутым выше исследованиям, NGC 6822 и Peg DIG являются объектами с преобладанием тёмной материи.

Таким образом, четыре “аномалии”, Cetus, Tucana, Peg DIG и NGC 6822, отличаются от других изученных внешних галактик. Причины могут заключаться в их эволюции в Местной Группе (backsplash галактики), а также в деталях их формирования и звездообразования (объекты с преобладанием тёмной материи).

Приведенные выше аргументы дают нам основания полагать, что мы получаем надёжную оценку полной массы Местной Группы  $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_{\odot}$  по кинематике её периферийных членов. Идея использования отклонений от идеального линейного хаббловского потока для оценки полной массы Местной Группы восходит к работам Lynden-Bell [232] и Sandage [233]. Радиус сферы нулевой скорости, определяемый по разбеганию близких галактик, многократно использовался для этой цели. Karachentsev et al. [15] измерили  $R_0 = (0.96 \pm 0.03)$  Мпк, что соответствует полной массе  $M_{LG} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$ . Kashibadze & Karachentsev [81] получили еще меньшие значения  $R_0 = (0.91 \pm 0.05)$  Мпк и  $M_{LG} = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$ , и отметили парадоксальную ситуацию, когда общая масса оказывается меньше суммы вириальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды. В нашей работе мы более тщательно учитываем влияние тёмной энергии и используем аналитическую модель потока Хаббла [206], которая дает более точную оценку полной массы Местной Группы. Это, в свою очередь, разрешает вышеупомянутый парадокс. Benisty et al. [234] уточнили определение поверхностей нулевого ускорения и нулевой скорости для общего распределения масс на космологическом фоне, управляемом космологической постоянной. Они оценивают полную массу Местной Группы равную  $M_{LG} = (2.47 \pm 0.08) \times 10^{12} M_{\odot}$ , что полностью соответствует нашему значению.

Другим классическим подходом к взвешиванию Местной Группы является так называемый временной аргумент, предложенный Kahn & Woltjer [235].

Он основан на предположении, что наблюдаемая конфигурация Млечного Пути и Туманности Андромеды является результатом их первого сближения при движении по радиальным кеплеровским орбитам в течение жизни Вселенной. Этот метод обычно дает значительно большую оценку массы Местной Группы, около  $5 \times 10^{12} M_{\odot}$ , по сравнению с другими методами [236]. Так, к примеру, Benisty et al. [237] оценивают полную массу равную  $(3.7 \pm 0.5) \times 10^{12} M_{\odot}$ , принимая во внимание собственное движение М 31, предоставленное миссией Gaia. Однако, тщательное рассмотрение влияния Большого Магелланова Облака снижает это значение до  $(2.3 \pm 0.7) \times 10^{12} M_{\odot}$  [238], что делает оценку массы по временному аргументу сопоставимым с другими оценками и, в свою очередь, согласуется в пределах ошибок с нашим значением.

Мы хотели бы подчеркнуть два важных результата нашей работы: 1) отсутствие значимого тренда в оценке полной массы Местной Группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк; 2) равенство массы Местной Группы  $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_{\odot}$ , оцененной по потоку Хаббла, сумме индивидуальных масс Млечного Пути и Туманности Андромеды,  $M_{MW+M31} = (2.34 \pm 0.41) \times 10^{12} M_{\odot}$  [175], измеренных по кинематике их спутников. Это указывает на то, что почти вся масса Местной Группы сосредоточена в вириальных зонах её двух основных галактик. Karachentsev [16] и Karachentsev et al. [15] ранее подчеркивали равенство вириальных масс групп галактик в масштабах 200–300 кпк с их полными массами внутри сферы нулевой скорости радиусом около 1 Мпк. Это, вероятно, справедливо и для более крупных структур, таких как скопление галактик в Деве [239].

Тот факт, что вся масса сосредоточена вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды, позволяет нам определить их отношение масс  $M_{MW}/M_{M31} = 0.74 \pm 0.10$ , найдя барицентр Местной Группы, минимизирующий разброс оценок массы по модели потока Хаббла. Это соответствует индивидуальным массам  $M_{MW} = (1.06 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}$  и  $M_{M31} = (1.42 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$  для Млечного Пути и Туманности Андромеды соответственно. Данная оценка массы нашей Галактики несколько больше массы, оцененной по кинематике её спутников, за исключением Leo I,  $(0.79 \pm 0.23) \times 10^{12} M_{\odot}$  [175] (см. Главу 2), хотя они и остаются совместимыми в пределах ошибок измерений. Однако, если включить в рассмотрение Leo I, масса нашей Галактики увеличится до  $(1.07 \pm 0.30) \times 10^{12} M_{\odot}$ , что идеально соответствует оценке из положения барицентра. Это также согласуется с многочисленными измерениями массы Млечного Пути в пределах 200 килопарсек, выполненными другими авторами и собранными в недавних обзорах. Компиляция [17] дает

среднее значение  $\langle M_{\text{MW}} \rangle = 1.07 \times 10^{12} M_{\odot}$  с разбросом  $\sigma_{\text{MW}} = 0.30 \times 10^{12} M_{\odot}$ , а [19] указывает на среднее значение  $\langle M_{\text{MW}} \rangle = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$  с дисперсией  $\sigma_{\text{MW}} = 0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ . Масса М 31, оцененная по положению барицентра, также хорошо согласуется с кинематикой её спутников в пределах 300 кпк, как по литературным данным,  $\langle M_{\text{M31}} \rangle = 1.61 \times 10^{12} M_{\odot}$ ,  $\sigma_{\text{M31}} = 0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$  [20], так и по нашим измерениям,  $M_{\text{M31}} = (1.55 \pm 0.34) \times 10^{12} M_{\odot}$  [175] (см. Главу 2).

Барицентр Местной Группы, определенный по семи карликам, расположен на расстоянии  $447 \pm 26$  кпк от центра нашей Галактики в направлении на центр Туманности Андромеды, что соответствует относительному расстоянию  $0.57 \pm 0.03$ , принимая расстояние между двумя галактиками равным 780.3 кпк. Этот результат прекрасно согласуется со значением  $0.55 \pm 0.05$ , полученным Karachentsev et al. [15], которые использовали 30 соседних галактик на расстояниях от 0.7 до 3.0 Мпк. Принимая во внимание скорость сближения Млечного Пути и Туманности Андромеды, равную  $-109 \pm 2$  км с $^{-1}$ , мы находим, что наша Галактика движется со скоростью  $62.6 \pm 2.6$  км с $^{-1}$  по направлению к барицентру Местной Группы  $(l, b) = (+121.7^\circ \pm 2.2^\circ, -21.5^\circ \pm 1.5^\circ)$ . Объединяя это с движением Солнца в Галактике, получаем вектор скорости Солнца относительно барицентра Местной Группы равным  $(V_x, V_y, V_z) = (-21.1 \pm 3.5, +300.3 \pm 3.4, -14.3 \pm 1.4)$  в галактических координатах, что в сферических координатах соответствует  $(l, b, V) = (+94.0^\circ \pm 0.7^\circ, -2.7^\circ \pm 0.3^\circ, 301.3 \pm 3.3$  км с $^{-1}$ ). Это значение прекрасно согласуется с положением апекса Солнца относительно центроида Местной группы,  $(+93^\circ \pm 2^\circ, -4^\circ \pm 2^\circ, 316 \pm 5$  км с $^{-1}$ ), определенным Karachentsev & Makarov [51].

### 3.6 Основные результаты Главы 3

Мы проанализировали движения 11 периферийных членов Местной Группы на расстояниях от 400 до 1400 кпк от её центра. Положения и скорости семи из них идеально описываются аналитической моделью потока Хаббла вокруг сферической концентрации массы в рамках стандартной плоской  $\Lambda$ CDM модели Вселенной [206]. Оставшиеся четыре галактики, скорее всего, ранее подверглись влиянию других членов Местной Группы и не могут рассматриваться как свободно падающие частицы. Далее мы суммируем наши выводы.

- Несмотря на гантелеобразную структуру Местной Группы, сферически-симметричная модель потока Хаббла [206] относительно барицентра системы дает очень хорошее описание поля скоростей внутри её сферы нулевой скорости вплоть до границ вириальных зон вокруг Млечного Пути и Туманности Андромеды.
- Поток Хаббла в окрестностях Местной группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк является чрезвычайно холодным, с дисперсией лучевой скорости всего  $15 \text{ км с}^{-1}$ . На самом деле это верхний предел, поскольку погрешности в оценках расстояния должны вносить существенный вклад в это значение.
- Космологическое  $\Lambda$ CDM-моделирование, ограниченное по Местной Вселенной, предсказывает гораздо больший разброс поля скоростей, порядка  $70 \text{ км с}^{-1}$ , за пределами вириальных радиусов Млечного Пути и Туманности Андромеды.
- Большинство оценок массы, полученных на основе скорости и положения отдельных галактик относительно барицентра Местной Группы, хорошо согласуются друг с другом, с чрезвычайно малым разбросом  $\sigma_M = 0.39 \times 10^{12} M_\odot$ . Это позволяет нам оценить полную массу Местной Группы равную  $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_\odot$ .
- Не наблюдается статистически значимого изменения массы Местной Группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк.
- Модель потока Хаббла прекрасно согласуется с суммой полных масс нашей Галактики и Туманности Андромеды, оцененных по кинематике их спутников. Из этого мы заключаем, что почти вся масса Местной Группы сосредоточена внутри областей радиусом 400 кпк вокруг этих двух гигантских спиралей, фактически в пределах их вириальных радиусов.
- Барицентр Местной Группы, определенный из условия минимизации разброса оценок масс, соответствует отношению масс Млечного Пути и Туманности Андромеды равному  $M_{MW}/M_{M31} = 0.74 \pm 0.10$ . Наша Галактика движется к барицентру со скоростью  $62.6 \pm 2.6 \text{ км с}^{-1}$ . Таким образом, апекс Солнца относительно барицентра Местной Группы равен  $(l, b, V) = (+94.0^\circ \pm 0.7^\circ, -2.7^\circ \pm 0.3^\circ, 301 \pm 3 \text{ км с}^{-1})$  в галактических координатах.

## Заключение

Резюмируем основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования.

1. Анализ поведения апекса Солнца относительно 50 спутников нашей Галактики с известными радиальными скоростями выявил аномально высокую скорость относительно внутренних спутников на расстояниях менее 100 кпк, достигающую  $450 \pm 54 \text{ км с}^{-1}$ , что значительно превышает скорость Солнца в Галактике. Это соответствует коллективному движению спутников со скоростью  $226 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  относительно Млечного Пути.
2. Анализ показывает, что данная аномалия поля скоростей близких спутников тесно связана с Большим Магеллановым Облаком (БМО). Это поддерживает гипотезу о том, что поведение апекса связано с первым пролетом БМО и группы карликовых галактик, связанных с ним, вокруг Млечного Пути, и возмущающим влиянием, оказываемым массивным БМО на кинематику других спутников нашей Галактики.
3. Самосогласованное моделирование с высоким разрешением  $N$ -тел показало, что наблюдаемая картина лучевых скоростей может быть объяснена, если орбиты внутренних спутников были недавно возмущены БМО, имеющим полную массу  $\approx 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ . Трассеры гало демонстрируют наблюдаемое поведение солнечного апекса для частиц с большим угловым моментом.
4. Солнечный апекс по отношению к внешним спутникам на расстояниях более 100 кпк равен  $(l, b, V) = (+90 \pm 14^{\circ}, -10.0 \pm 6.4^{\circ}, 249 \pm 37 \text{ км с}^{-1})$ , что хорошо согласуется с известным движением Солнца в Галактике. Соответственно, внешние спутники демонстрируют изотропное распределение лучевых скоростей с нулевой средней скоростью относительно центра Млечного Пути и дисперсией лучевых скоростей, равной  $84 \text{ км с}^{-1}$  в согласии со стандартными представлениями о кинематике галактик в группах и предсказаниями  $\Lambda$ CDM-модели.
5. Квадрупольный член поля скоростей оказывается статистически незначимым, и полностью определяется кинематикой шести ближайших спут-

ников,  $D_{\text{MW}} < 30$  кпк, в наибольшей степени подверженных влиянию приливных сил и динамического трения в гало нашей Галактики.

6. Разработан метод измерения массы группы с доминирующей центральной галактикой с учетом трёхмерных расстояний спутников в системе. Метод базируется на идее, предложенной Bahcall & Tremaine [21], использовать соотношение  $v^2 r$  в качестве индикатора массы и усреднении по всем возможным орбитам спутников. Как и в исходной методологии, данный подход требует предположения о природе орбит спутников в системе, которая выражается через средний квадрат эксцентриситета  $\langle e^2 \rangle$ .
7. Сравнение с численным космологическим  $\Lambda$ CDM-моделированием подтвердило применимость метода и показало хорошее соответствие с истинной массой систем в предположении изотропного распределения орбит спутников.
8. Показано, что ошибки измерения расстояний приводят к систематическому смещению в оценке массы. При современной точности измерений расстояний применимость метода за пределами Местной Группы сильно ограничена.
9. Используя данную методологию и в предположении изотропности распределение орбит спутников, мы оценили массу Млечного Пути равную  $M_{\text{MW}} = (7.9 \pm 2.3) \times 10^{11} M_{\odot}$  в пределах 240 кпк и массу Туманности Андромеды равную  $M_{\text{M31}} = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_{\odot}$  в пределах радиуса 300 кпк. Эти значения хорошо согласуются с недавними измерениями, полученными другими авторами.
10. Анализ движения периферийных членов Местной Группы, за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды, показал, что положения и скорости относительно барицентра Местной Группы большинства галактик (7 из 11) идеально описываются аналитической моделью потока Хаббла вокруг сферической концентрации массы в рамках стандартной плоской  $\Lambda$ CDM модели Вселенной [206].
11. Оставшиеся четыре галактики, скорее всего, ранее подверглись влиянию других членов Местной Группы и не могут рассматриваться как свободно падающие частицы.
12. Поток Хаббла в окрестностях Местной группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк является чрезвычайно холодным, с дисперсией лучевой скорости всего  $15 \text{ км с}^{-1}$ . На самом деле это верхний предел, по-

сколькo погрешности в оценках расстояния должны вносить существенный вклад в это значение.

13. Космологическое  $\Lambda$ CDM-моделирование, ограниченное по Местной Вселенной, предсказывает гораздо больший разброс поля скоростей, порядка  $70 \text{ км с}^{-1}$ , за пределами вириальных радиусов Млечного Пути и Туманности Андромеды.
14. Большинство оценок массы, полученных на основе скорости и положения отдельных галактик относительно барицентра Местной Группы, хорошо согласуются друг с другом, с чрезвычайно малым разбросом  $\sigma_M = 0.39 \times 10^{12} M_\odot$ . Это позволяет нам оценить полную массу Местной Группы равную  $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_\odot$ .
15. Не наблюдается статистически значимого изменения массы Местной Группы в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк.
16. Модель потока Хаббла прекрасно согласуется с суммой полных масс нашей Галактики и Туманности Андромеды, оцененных по кинематике их спутников. Из этого мы заключаем, что почти вся масса Местной Группы сосредоточена внутри областей радиусом 400 кпк вокруг этих двух гигантских спиралей, фактически в пределах их вириальных радиусов.
17. Барицентр Местной Группы, определенный из условия минимизации разброса оценок масс, соответствует отношению масс Млечного Пути и Туманности Андромеды равному  $M_{MW}/M_{M31} = 0.74 \pm 0.10$ . Наша Галактика движется к барицентру со скоростью  $62.6 \pm 2.6 \text{ км с}^{-1}$ . Апекс Солнца относительно барицентра Местной Группы равен  $(l, b, V) = (+94.0^\circ \pm 0.7^\circ, -2.7^\circ \pm 0.3^\circ, 301 \pm 3 \text{ км с}^{-1})$  в галактических координатах.

## Список литературы

1. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters [Текст] / Planck Collaboration [и др.] // A&A. — 2020. — Сент. — Т. 641. — А6. — arXiv: [1807.06209 \[astro-ph.CO\]](#).
2. Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae [Текст] / S. Perlmutter [и др.] // ApJ. — 1999. — Июнь. — Т. 517, № 2. — С. 565—586. — arXiv: [astro-ph/9812133 \[astro-ph\]](#).
3. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant [Текст] / A. G. Riess [и др.] // AJ. — 1998. — Сент. — Т. 116, № 3. — С. 1009—1038. — arXiv: [astro-ph/9805201 \[astro-ph\]](#).
4. Zwicky, F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln [Текст] / F. Zwicky // Helvetica Physica Acta. — 1933. — Янв. — Т. 6. — С. 110—127.
5. Dark matter in galaxies [Текст] / A. V. Zasov [и др.] // Physics Uspekhi. — 2017. — Апр. — Т. 60, № 1. — С. 3. — arXiv: [1710.10630 \[astro-ph.GA\]](#).
6. Allen, S. W. Cosmological Parameters from Observations of Galaxy Clusters [Текст] / S. W. Allen, A. E. Evrard, A. B. Mantz // ARA&A. — 2011. — Сент. — Т. 49, № 1. — С. 409—470. — arXiv: [1103.4829 \[astro-ph.CO\]](#).
7. Clusters of galaxies [Текст] / A. A. Vikhlinin [и др.] // Physics Uspekhi. — 2014. — Апр. — Т. 57, № 4. — С. 317—341.
8. A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter [Текст] / D. Clowe [и др.] // ApJ. — 2006. — Сент. — Т. 648, № 2. — С. L109—L113. — arXiv: [astro-ph/0608407 \[astro-ph\]](#).
9. Peebles, P. J. E. The large-scale structure of the universe [Текст] / P. J. E. Peebles. — 1980.
10. Zel'Dovich, Y. B. Reprint of 1970A&A.....5...84Z. Gravitational instability: an approximate theory for large density perturbations. [Текст] / Y. B. Zel'Dovich // A&A. — 1970. — Март. — Т. 500. — С. 13—18.
11. Ramachandra, N. S. Multi-stream portrait of the cosmic web [Текст] / N. S. Ramachandra, S. F. Shandarin // MNRAS. — 2015. — Сент. — Т. 452, № 2. — С. 1643—1653. — arXiv: [1412.7768 \[astro-ph.CO\]](#).

12. *Peebles, P. J. E.* Nearby galaxies as pointers to a better theory of cosmic evolution [Текст] / P. J. E. Peebles, A. Nusser // *Nature*. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 465, № 7298. — С. 565—569. — arXiv: [1001.1484 \[astro-ph.CO\]](#).
13. The Extragalactic Distance Database: The Color-Magnitude Diagrams/Tip of the Red Giant Branch Distance Catalog [Текст] / G. S. Anand [и др.] // *AJ*. — 2021. — АВГ. — Т. 162, № 2. — С. 80. — arXiv: [2104.02649 \[astro-ph.GA\]](#).
14. *Karachentsev, I. D.* Missing dark matter in the local universe [Текст] / I. D. Karachentsev // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — АПР. — Т. 67, № 2. — С. 123—134. — arXiv: [1204.3377 \[astro-ph.CO\]](#).
15. The Hubble flow around the Local Group [Текст] / I. D. Karachentsev [и др.] // *MNRAS*. — 2009. — МАРТ. — Т. 393, № 4. — С. 1265—1274. — arXiv: [0811.4610 \[astro-ph\]](#).
16. *Karachentsev, I. D.* The Local Group and Other Neighboring Galaxy Groups [Текст] / I. D. Karachentsev // *AJ*. — 2005. — ЯНВ. — Т. 129, № 1. — С. 178—188. — arXiv: [astro-ph/0410065 \[astro-ph\]](#).
17. The mass of our Milky Way [Текст] / W. Wang [и др.] // *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*. — 2020. — МАЙ. — Т. 63, № 10. — С. 109801. — arXiv: [1912.02599 \[astro-ph.GA\]](#).
18. *Bland-Hawthorn, J.* The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties [Текст] / J. Bland-Hawthorn, O. Gerhard // *ARA&A*. — 2016. — СЕНТ. — Т. 54. — С. 529—596. — arXiv: [1602.07702 \[astro-ph.GA\]](#).
19. *Bobylev, V. V.* Modern Estimates of the Mass of the Milky Way [Текст] / V. V. Bobylev, A. T. Baykova // *Astronomy Reports*. — 2023. — АВГ. — Т. 67, № 8. — С. 812—823.
20. *Bhattacharya, S.* Weighing Andromeda: Mass estimates of the M<sub>31</sub> galaxy [Текст] / S. Bhattacharya // arXiv e-prints. — 2023. — МАЙ. — arXiv:2305.03293. — arXiv: [2305.03293 \[astro-ph.GA\]](#).
21. *Bahcall, J. N.* Methods for determining the masses of spherical systems. I. Test particles around a point mass. [Текст] / J. N. Bahcall, S. Tremaine // *ApJ*. — 1981. — МАРТ. — Т. 244. — С. 805—819.
22. *Simon, J. D.* The Faintest Dwarf Galaxies [Текст] / J. D. Simon // *ARA&A*. — 2019. — АВГ. — Т. 57. — С. 375—415. — arXiv: [1901.05465 \[astro-ph.GA\]](#).

23. *McConnachie, A. W.* Revised and New Proper Motions for Confirmed and Candidate Milky Way Dwarf Galaxies [Текст] / A. W. McConnachie, K. A. Venn // *AJ*. — 2020. — Сент. — Т. 160, № 3. — С. 124. — arXiv: [2007.05011 \[astro-ph.GA\]](#).
24. Gaia EDR3 Proper Motions of Milky Way Dwarfs. II Velocities, Total Energy, and Angular Momentum [Текст] / F. Hammer [и др.] // *ApJ*. — 2021. — Дек. — Т. 922, № 2. — С. 93. — arXiv: [2109.11557 \[astro-ph.GA\]](#).
25. *Pace, A. B.* Proper Motions, Orbits, and Tidal Influences of Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies [Текст] / A. B. Pace, D. Erkal, T. S. Li // *ApJ*. — 2022. — Дек. — Т. 940, № 2. — С. 136. — arXiv: [2205.05699 \[astro-ph.GA\]](#).
26. *Kunkel, W. E.* The Magellanic Plane [Текст] / W. E. Kunkel, S. Demers // *The Galaxy and the Local Group*. Т. 182. — 01.1976. — С. 241.
27. *Lynden-Bell, D.* Dwarf galaxies and globular clusters in high velocity hydrogen streams. [Текст] / D. Lynden-Bell // *MNRAS*. — 1976. — Март. — Т. 174. — С. 695—710.
28. *Kroupa, P.* The great disk of Milky-Way satellites and cosmological substructures [Текст] / P. Kroupa, C. Theis, C. M. Boily // *A&A*. — 2005. — Февр. — Т. 431. — С. 517—521. — arXiv: [astro-ph/0410421 \[astro-ph\]](#).
29. *Metz, M.* The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies [Текст] / M. Metz, P. Kroupa, H. Jerjen // *MNRAS*. — 2007. — Янв. — Т. 374, № 3. — С. 1125—1145. — arXiv: [astro-ph/0610933 \[astro-ph\]](#).
30. *Pawlowski, M. S.* The VPOS: a vast polar structure of satellite galaxies, globular clusters and streams around the Milky Way [Текст] / M. S. Pawlowski, J. Pflamm-Altenburg, P. Kroupa // *MNRAS*. — 2012. — Июнь. — Т. 423, № 2. — С. 1109—1126. — arXiv: [1204.5176 \[astro-ph.GA\]](#).
31. Confirmation of Faint Dwarf Galaxies in the M81 Group [Текст] / K. Chiboucas [и др.] // *AJ*. — 2013. — Нояб. — Т. 146, № 5. — С. 126. — arXiv: [1309.4130 \[astro-ph.CO\]](#).
32. Two Planes of Satellites in the Centaurus A Group [Текст] / R. B. Tully [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Апр. — Т. 802, № 2. — С. L25. — arXiv: [1503.05599 \[astro-ph.GA\]](#).

33. Tracing satellite planes in the Sculptor group. I. Discovery of three faint dwarf galaxies around NGC 253 [Текст] / D. Martínez-Delgado [и др.] // A&A. — 2021. — Август. — Т. 652. — А48. — arXiv: [2106.08868 \[astro-ph.GA\]](#).
34. *Pawlowski, M. S.* The rotationally stabilized VPOS and predicted proper motions of the Milky Way satellite galaxies [Текст] / M. S. Pawlowski, P. Kroupa // MNRAS. — 2013. — Ноябрь. — Т. 435, № 3. — С. 2116—2131. — arXiv: [1309.1159 \[astro-ph.CO\]](#).
35. A vast, thin plane of corotating dwarf galaxies orbiting the Andromeda galaxy [Текст] / R. A. Ibata [и др.] // Nature. — 2013. — Январь. — Т. 493, № 7430. — С. 62—65. — arXiv: [1301.0446 \[astro-ph.CO\]](#).
36. *Pawlowski, M. S.* It's time for some plane speaking [Текст] / M. S. Pawlowski // Nature Astronomy. — 2021. — Декабрь. — Т. 5. — С. 1185—1187.
37. *Aubert, D.* The origin and implications of dark matter anisotropic cosmic infall on  $\sim L_*$  haloes [Текст] / D. Aubert, C. Pichon, S. Colombi // MNRAS. — 2004. — Август. — Т. 352, № 2. — С. 376—398. — arXiv: [astro-ph/0402405 \[astro-ph\]](#).
38. The distribution of satellite galaxies: the great pancake [Текст] / N. I. Libeskind [и др.] // MNRAS. — 2005. — Октябрь. — Т. 363, № 1. — С. 146—152. — arXiv: [astro-ph/0503400 \[astro-ph\]](#).
39. Are the Magellanic Clouds on Their First Passage about the Milky Way? [Текст] / G. Besla [и др.] // ApJ. — 2007. — Октябрь. — Т. 668, № 2. — С. 949—967. — arXiv: [astro-ph/0703196 \[astro-ph\]](#).
40. Simulations of the Magellanic Stream in a First Infall Scenario [Текст] / G. Besla [и др.] // ApJ. — 2010. — Октябрь. — Т. 721, № 2. — С. L97—L101. — arXiv: [1008.2210 \[astro-ph.GA\]](#).
41. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars [Текст] / G. Besla [и др.] // MNRAS. — 2012. — Апрель. — Т. 421, № 3. — С. 2109—2138. — arXiv: [1201.1299 \[astro-ph.GA\]](#).
42. Third-epoch Magellanic Cloud Proper Motions. I. Hubble Space Telescope/WFC3 Data and Orbit Implications [Текст] / N. Kallivayalil [и др.] // ApJ. — 2013. — Февр. — Т. 764, № 2. — С. 161. — arXiv: [1301.0832 \[astro-ph.CO\]](#).

43. All-sky dynamical response of the Galactic halo to the Large Magellanic Cloud [Текст] / С. Conroy [и др.] // *Nature*. — 2021. — Апр. — Т. 592, № 7855. — С. 534—536. — arXiv: [2104.09515 \[astro-ph.GA\]](#).
44. Detection of the LMC-induced sloshing of the Galactic halo [Текст] / D. Erkal [и др.] // *MNRAS*. — 2021. — Сент. — Т. 506, № 2. — С. 2677—2684. — arXiv: [2010.13789 \[astro-ph.GA\]](#).
45. Modelling the Tucana III stream - a close passage with the LMC [Текст] / D. Erkal [и др.] // *MNRAS*. — 2018. — Дек. — Т. 481, № 3. — С. 3148—3159. — arXiv: [1804.07762 \[astro-ph.GA\]](#).
46. The total mass of the Large Magellanic Cloud from its perturbation on the Orphan stream [Текст] / D. Erkal [и др.] // *MNRAS*. — 2019. — Авг. — Т. 487, № 2. — С. 2685—2700. — arXiv: [1812.08192 \[astro-ph.GA\]](#).
47. *Garrow, T.* The effects of dwarf galaxies on the orbital evolution of galactic globular clusters [Текст] / T. Garrow, J. J. Webb, J. Bovy // *MNRAS*. — 2020. — Нояб. — Т. 499, № 1. — С. 804—813. — arXiv: [2007.13752 \[astro-ph.GA\]](#).
48. Hunting for the Dark Matter Wake Induced by the Large Magellanic Cloud [Текст] / N. Garavito-Camargo [и др.] // *ApJ*. — 2019. — Окт. — Т. 884, № 1. — С. 51. — arXiv: [1902.05089 \[astro-ph.GA\]](#).
49. Quantifying the Stellar Halo's Response to the LMC's Infall with Spherical Harmonics [Текст] / E. C. Cunningham [и др.] // *ApJ*. — 2020. — Июль. — Т. 898, № 1. — С. 4. — arXiv: [2006.08621 \[astro-ph.GA\]](#).
50. *Jethwa, P.* A Magellanic origin of the DES dwarfs [Текст] / P. Jethwa, D. Erkal, V. Belokurov // *MNRAS*. — 2016. — Сент. — Т. 461, № 2. — С. 2212—2233. — arXiv: [1603.04420 \[astro-ph.GA\]](#).
51. *Karachentsev, I. D.* The Galaxy Motion Relative to Nearby Galaxies and the Local Velocity Field [Текст] / I. D. Karachentsev, D. A. Makarov // *AJ*. — 1996. — Февр. — Т. 111. — С. 794.
52. Our Peculiar Motion Away from the Local Void [Текст] / R. B. Tully [и др.] // *ApJ*. — 2008. — Март. — Т. 676, № 1. — С. 184—205. — arXiv: [0705.4139 \[astro-ph\]](#).
53. Cosmicflows-3: Two Distance-Velocity Calculators [Текст] / E. Kourkchi [и др.] // *AJ*. — 2020. — Февр. — Т. 159, № 2. — С. 67. — arXiv: [1912.07214 \[astro-ph.CO\]](#).

54. Eight Ultra-faint Galaxy Candidates Discovered in Year Two of the Dark Energy Survey [Текст] / A. Drlica-Wagner [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Ноябрь. — Т. 813, № 2. — С. 109. — arXiv: [1508.03622 \[astro-ph.GA\]](#).
55. A Catalog of Neighboring Galaxies [Текст] / I. D. Karachentsev [и др.] // *AJ*. — 2004. — Апрель. — Т. 127, № 4. — С. 2031—2068.
56. Clean Kinematic Samples in Dwarf Spheroidals: An Algorithm for Evaluating Membership and Estimating Distribution Parameters When Contamination is Present [Текст] / M. G. Walker [и др.] // *AJ*. — 2009. — Февр. — Т. 137, № 2. — С. 3109—3138. — arXiv: [0811.1990 \[astro-ph\]](#).
57. On the Nature of Ultra-faint Dwarf Galaxy Candidates. I. DES1, Eridanus III, and Tucana V [Текст] / B. C. Conn [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Янв. — Т. 852, № 2. — С. 68. — arXiv: [1712.01439 \[astro-ph.GA\]](#).
58. Discovery of an Ultra-faint Stellar System near the Magellanic Clouds with the DECam Local Volume Exploration Survey [Текст] / W. Cerny [и др.] // *ApJ*. — 2021. — Март. — Т. 910, № 1. — С. 18. — arXiv: [2009.08550 \[astro-ph.GA\]](#).
59. Deep Subaru Hyper Suprime-Cam Observations of Milky Way Satellites Columba I and Triangulum II [Текст] / J. L. Carlin [и др.] // *AJ*. — 2017. — Дек. — Т. 154, № 6. — С. 267. — arXiv: [1710.06444 \[astro-ph.GA\]](#).
60. The Dark Energy Survey view of the Sagittarius stream: discovery of two faint stellar system candidates [Текст] / E. Luque [и др.] // *MNRAS*. — 2017. — Июнь. — Т. 468, № 1. — С. 97—108. — arXiv: [1608.04033 \[astro-ph.GA\]](#).
61. The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXVI. The Calibration of Population II Secondary Distance Indicators and the Value of the Hubble Constant [Текст] / L. Ferrarese [и др.] // *ApJ*. — 2000. — Февр. — Т. 529, № 2. — С. 745—767. — arXiv: [astro-ph/9908192 \[astro-ph\]](#).
62. A Redshift Survey of IRAS Galaxies. VII. The Infrared and Redshift Data for the 1.936 Jansky Sample [Текст] / M. A. Strauss [и др.] // *ApJS*. — 1992. — Ноябрь. — Т. 83. — С. 29.
63. Evidence That Hydra I is a Tidally Disrupting Milky Way Dwarf Galaxy [Текст] / J. R. Hargis [и др.] // *ApJ*. — 2016. — Февр. — Т. 818, № 1. — С. 39. — arXiv: [1509.06391 \[astro-ph.GA\]](#).

64. The hidden giant: discovery of an enormous Galactic dwarf satellite in Gaia DR2 [Текст] / G. Torrealba [и др.] // MNRAS. — 2019. — Сент. — Т. 488, № 2. — С. 2743—2766. — arXiv: [1811.04082 \[astro-ph.GA\]](#).
65. Kinematics of Antlia 2 and Crater 2 from the Southern Stellar Stream Spectroscopic Survey (S<sup>5</sup>) [Текст] / A. P. Ji [и др.] // ApJ. — 2021. — Ноябрь. — Т. 921, № 1. — С. 32. — arXiv: [2106.12656 \[astro-ph.GA\]](#).
66. Discovery and Characterization of Two Ultrafaint Dwarfs outside the Halo of the Milky Way: Leo M and Leo K [Текст] / K. B. W. McQuinn [и др.] // ApJ. — 2024. — Июнь. — Т. 967, № 2. — С. 161. — arXiv: [2307.08738 \[astro-ph.GA\]](#).
67. A New Distant Milky Way Globular Cluster in the Pan-STARRS1 3 $\pi$  Survey [Текст] / B. P. M. Laevens [и др.] // ApJ. — 2014. — Май. — Т. 786, № 1. — С. L3. — arXiv: [1403.6593 \[astro-ph.GA\]](#).
68. Kirby, E. N. Spectroscopic Confirmation of the Dwarf Galaxies Hydra II and Pisces II and the Globular Cluster Laevens 1 [Текст] / E. N. Kirby, J. D. Simon, J. G. Cohen // ApJ. — 2015. — Сент. — Т. 810, № 1. — С. 56. — arXiv: [1506.01021 \[astro-ph.GA\]](#).
69. Two Ultra-faint Milky Way Stellar Systems Discovered in Early Data from the DECam Local Volume Exploration Survey [Текст] / S. Mau [и др.] // ApJ. — 2020. — Февр. — Т. 890, № 2. — С. 136. — arXiv: [1912.03301 \[astro-ph.GA\]](#).
70. Simon, J. D. The Kinematics of the Ultra-faint Milky Way Satellites: Solving the Missing Satellite Problem [Текст] / J. D. Simon, M. Geha // ApJ. — 2007. — Ноябрь. — Т. 670, № 1. — С. 313—331. — arXiv: [0706.0516 \[astro-ph\]](#).
71. Grillmair, C. J. Four New Stellar Debris Streams in the Galactic Halo [Текст] / C. J. Grillmair // ApJ. — 2009. — Март. — Т. 693, № 2. — С. 1118—1127. — arXiv: [0811.3965 \[astro-ph\]](#).
72. Observational database for studies of nearby universe [Текст] / E. I. Kaisina [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2012. — Янв. — Т. 67, № 1. — С. 115—122.
73. Uncovering the orbit of the hercules dwarf galaxy [Текст] / A. L. Gregory [и др.] // MNRAS. — 2020. — Авг. — Т. 496, № 2. — С. 1092—1104. — arXiv: [1912.00156 \[astro-ph.GA\]](#).
74. Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole [Текст] / GRAVITY Collaboration [и др.] // A&A. — 2018. — Июль. — Т. 615. — С. L15. — arXiv: [1807.09409 \[astro-ph.GA\]](#).

75. A new kinematic model of the Galaxy: analysis of the stellar velocity field from Gaia Data Release 3 [Текст] / V. S. Akhmetov [и др.] // MNRAS. — 2024. — Май. — Т. 530, № 1. — С. 710—729. — arXiv: [2307.08527 \[astro-ph.GA\]](#).
76. The distance to the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy from the red giant branch tip [Текст] / L. Monaco [и др.] // MNRAS. — 2004. — Сент. — Т. 353, № 3. — С. 874—878. — arXiv: [astro-ph/0406350 \[astro-ph\]](#).
77. The dynamics of isolated Local Group galaxies [Текст] / E. N. Kirby [и др.] // MNRAS. — 2014. — Март. — Т. 439, № 1. — С. 1015—1027. — arXiv: [1401.1208 \[astro-ph.GA\]](#).
78. The pristine dwarf-galaxy survey - III. Revealing the nature of the Milky Way globular cluster Sagittarius II [Текст] / N. Longeard [и др.] // MNRAS. — 2021. — Май. — Т. 503, № 2. — С. 2754—2762. — arXiv: [2005.05976 \[astro-ph.GA\]](#).
79. Segue 3: An Old, Extremely Low Luminosity Star Cluster in the Milky Way's Halo [Текст] / R. Fadelly [и др.] // AJ. — 2011. — Сент. — Т. 142, № 3. — С. 88. — arXiv: [1107.3151 \[astro-ph.GA\]](#).
80. Gaia DR 2 and VLT/FLAMES search for new satellites of the LMC [Текст] / T. K. Fritz [и др.] // A&A. — 2019. — Март. — Т. 623. — A129. — arXiv: [1805.07350 \[astro-ph.GA\]](#).
81. *Kashibadze, O. G.* Cosmic flow around local massive galaxies [Текст] / O. G. Kashibadze, I. D. Karachentsev // A&A. — 2018. — Янв. — Т. 609. — A11. — arXiv: [1709.09420 \[astro-ph.CO\]](#).
82. Milky Way Satellite Census. I. The Observational Selection Function for Milky Way Satellites in DES Y3 and Pan-STARRS DR1 [Текст] / A. Drlica-Wagner [и др.] // ApJ. — 2020. — Апр. — Т. 893, № 1. — С. 47. — arXiv: [1912.03302 \[astro-ph.GA\]](#).
83. The edge of the Galaxy [Текст] / A. J. Deason [и др.] // MNRAS. — 2020. — Авг. — Т. 496, № 3. — С. 3929—3942. — arXiv: [2002.09497 \[astro-ph.GA\]](#).
84. *Einasto, J.* On the Construction of a Composite Model for the Galaxy and on the Determination of the System of Galactic Parameters [Текст] / J. Einasto // Trudy Astrofizicheskogo Instituta Alma-Ata. — 1965. — Янв. — Т. 5. — С. 87—100.

85. *Navarro, J. F.* The Structure of Cold Dark Matter Halos [Текст] / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White // *ApJ*. — 1996. — Май. — Т. 462. — С. 563. — arXiv: [astro-ph/9508025](#) [[astro-ph](#)].
86. *Reid, M. J.* The Proper Motion of Sagittarius A\*. II. The Mass of Sagittarius A\* [Текст] / M. J. Reid, A. Brunthaler // *ApJ*. — 2004. — Дек. — Т. 616, № 2. — С. 872—884. — arXiv: [astro-ph/0408107](#) [[astro-ph](#)].
87. *Reid, M. J.* Micro-arcsecond astrometry with the VLBA [Текст] / M. J. Reid // *A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry*. Т. 248 / под ред. W. J. Jin, I. Platais, M. A. C. Perryman. — 07.2008. — С. 141—147. — (Proceedings of the International Astronomical Union , Volume 3 , Symposium S248: A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry).
88. The Missing Satellites of the Magellanic Clouds? Gaia Proper Motions of the Recently Discovered Ultra-faint Galaxies [Текст] / N. Kallivayalil [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Нояб. — Т. 867, № 1. — С. 19. — arXiv: [1805.01448](#) [[astro-ph.GA](#)].
89. *Petersen, M. S.* Detection of the Milky Way reflex motion due to the Large Magellanic Cloud infall [Текст] / M. S. Petersen, J. Peñarrubia // *Nature Astronomy*. — 2021. — Янв. — Т. 5. — С. 251—255. — arXiv: [2011.10581](#) [[astro-ph.GA](#)].
90. And Yet it Moves: The Dangers of Artificially Fixing the Milky Way Center of Mass in the Presence of a Massive Large Magellanic Cloud [Текст] / F. A. Gómez [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Апр. — Т. 802, № 2. — С. 128. — arXiv: [1408.4128](#) [[astro-ph.GA](#)].
91. The Clustering of Orbital Poles Induced by the LMC: Hints for the Origin of Planes of Satellites [Текст] / N. Garavito-Camargo [и др.] // *ApJ*. — 2021. — Дек. — Т. 923, № 2. — С. 140. — arXiv: [2108.07321](#) [[astro-ph.GA](#)].
92. *Petersen, M. S.* Reflex motion in the Milky Way stellar halo resulting from the Large Magellanic Cloud infall [Текст] / M. S. Petersen, J. Peñarrubia // *MNRAS*. — 2020. — Май. — Т. 494, № 1. — С. L11—L16. — arXiv: [2001.09142](#) [[astro-ph.GA](#)].
93. *Correa Magnus, L.* Measuring the Milky Way mass distribution in the presence of the LMC [Текст] / L. Correa Magnus, E. Vasiliev // *MNRAS*. — 2022. — Апр. — Т. 511, № 2. — С. 2610—2630. — arXiv: [2110.00018](#) [[astro-ph.GA](#)].

94. Gaia early DR3 systemic motions of Local Group dwarf galaxies and orbital properties with a massive Large Magellanic Cloud [Текст] / G. Battaglia [и др.] // A&A. — 2022. — ЯНВ. — Т. 657. — А54. — arXiv: [2106.08819 \[astro-ph.GA\]](#).
95. *Vasiliev, E.* Tango for three: Sagittarius, LMC, and the Milky Way [Текст] / E. Vasiliev, V. Belokurov, D. Erkal // MNRAS. — 2021. — Февр. — Т. 501, № 2. — С. 2279—2304. — arXiv: [2009.10726 \[astro-ph.GA\]](#).
96. *McMillan, P. J.* The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way [Текст] / P. J. McMillan // MNRAS. — 2017. — Февр. — Т. 465, № 1. — С. 76—94. — arXiv: [1608.00971 \[astro-ph.GA\]](#).
97. *Kallivayalil, N.* Is the SMC Bound to the LMC? The Hubble Space Telescope Proper Motion of the SMC [Текст] / N. Kallivayalil, R. P. van der Marel, C. Alcock // ApJ. — 2006. — Дек. — Т. 652, № 2. — С. 1213—1229. — arXiv: [astro-ph/0606240 \[astro-ph\]](#).
98. A timing constraint on the (total) mass of the Large Magellanic Cloud [Текст] / J. Peñarrubia [и др.] // MNRAS. — 2016. — Февр. — Т. 456, № 1. — С. L54—L58. — arXiv: [1507.03594 \[astro-ph.GA\]](#).
99. *Erkal, D.* Limit on the LMC mass from a census of its satellites [Текст] / D. Erkal, V. A. Belokurov // MNRAS. — 2020. — Июль. — Т. 495, № 3. — С. 2554—2563. — arXiv: [1907.09484 \[astro-ph.GA\]](#).
100. *Vasiliev, E.* AGAMA: action-based galaxy modelling architecture [Текст] / E. Vasiliev // MNRAS. — 2019. — ЯНВ. — Т. 482, № 2. — С. 1525—1544. — arXiv: [1802.08239 \[astro-ph.GA\]](#).
101. *Fukushige, T.* GRAPE-6A: A Single-Card GRAPE-6 for Parallel PC-GRAPE Cluster Systems [Текст] / T. Fukushige, J. Makino, A. Kawai // PASJ. — 2005. — Дек. — Т. 57. — С. 1009—1021. — arXiv: [astro-ph/0504407 \[astro-ph\]](#).
102. Numerical code for multi-component galaxies: from N-body to chemistry and magnetic fields [Текст] / S. A. Khoperskov [и др.] // Journal of Physics Conference Series. Т. 510. — 05.2014. — С. 012011. — (Journal of Physics Conference Series). — arXiv: [1502.02935 \[physics.comp-ph\]](#).
103. A Malin 1 ‘cousin’ with counter-rotation: internal dynamics and stellar content of the giant low surface brightness galaxy UGC 1922 [Текст] / A. S. Saburova [и др.] // MNRAS. — 2018. — Дек. — Т. 481, № 3. — С. 3534—3547. — arXiv: [1809.04333 \[astro-ph.GA\]](#).

104. Escapees from the bar resonances. Presence of low-eccentricity metal-rich stars at the solar vicinity [Текст] / S. Khoperskov [и др.] // A&A. — 2020. — Июнь. — Т. 638. — A144. — arXiv: [1911.12424 \[astro-ph.GA\]](#).
105. *Khoperskov, S.* Chemo-kinematics of the Milky Way spiral arms and bar resonances: Connection to ridges and moving groups in the solar vicinity [Текст] / S. Khoperskov, O. Gerhard // A&A. — 2022. — Июль. — Т. 663. — A38. — arXiv: [2111.15211 \[astro-ph.GA\]](#).
106. *Erkal, D.* Equilibrium models of the Milky Way mass are biased high by the LMC [Текст] / D. Erkal, V. A. Belokurov, D. L. Parkin // MNRAS. — 2020. — Ноябрь. — Т. 498, № 4. — С. 5574—5580. — arXiv: [2001.11030 \[astro-ph.GA\]](#).
107. The Pisces Plume and the Magellanic wake [Текст] / V. Belokurov [и др.] // MNRAS. — 2019. — Сент. — Т. 488, № 1. — С. L47—L52. — arXiv: [1904.07909 \[astro-ph.GA\]](#).
108. Revisiting Dynamical Friction: The Role of Global Modes and Local Wakes [Текст] / T. Tamfal [и др.] // ApJ. — 2021. — Июль. — Т. 916, № 1. — С. 55. — arXiv: [2007.13763 \[astro-ph.GA\]](#).
109. On the Effect of the Large Magellanic Cloud on the Orbital Poles of Milky Way Satellite Galaxies [Текст] / M. S. Pawlowski [и др.] // ApJ. — 2022. — Июнь. — Т. 932, № 1. — С. 70. — arXiv: [2111.05358 \[astro-ph.GA\]](#).
110. Separation of stellar populations by an evolving bar: implications for the bulge of the Milky Way [Текст] / V. P. Debattista [и др.] // MNRAS. — 2017. — Авг. — Т. 469, № 2. — С. 1587—1611. — arXiv: [1611.09023 \[astro-ph.GA\]](#).
111. The disc origin of the Milky Way bulge. Dissecting the chemo-morphological relations using N-body simulations and APOGEE [Текст] / F. Fragkoudi [и др.] // A&A. — 2018. — Сент. — Т. 616. — A180. — arXiv: [1802.00453 \[astro-ph.GA\]](#).
112. Disk origin of the Milky Way bulge: the necessity of the thick disk [Текст] / P. Di Matteo [и др.] // A&A. — 2019. — Авг. — Т. 628. — A11. — arXiv: [1901.00777 \[astro-ph.GA\]](#).
113. Stellar metallicity variations across spiral arms in disk galaxies with multiple populations [Текст] / S. Khoperskov [и др.] // A&A. — 2018. — Март. — Т. 611. — С. L2. — arXiv: [1801.08711 \[astro-ph.GA\]](#).

114. The chemical signature of the Galactic spiral arms revealed by Gaia DR3 [Текст] / E. Poggio [и др.] // A&A. — 2022. — Окт. — Т. 666. — С. L4. — arXiv: [2206.14849 \[astro-ph.GA\]](#).
115. *Heisler, J.* Estimating the masses of galaxy groups: alternatives to the virial theorem. [Текст] / J. Heisler, S. Tremaine, J. N. Bahcall // ApJ. — 1985. — Ноябрь. — Т. 298. — С. 8—17.
116. *Watkins, L. L.* The masses of the Milky Way and Andromeda galaxies [Текст] / L. L. Watkins, N. W. Evans, J. H. An // MNRAS. — 2010. — Июль. — Т. 406, № 1. — С. 264—278. — arXiv: [1002.4565 \[astro-ph.GA\]](#).
117. The Extragalactic Distance Database [Текст] / R. B. Tully [и др.] // AJ. — 2009. — Авг. — Т. 138, № 2. — С. 323—331.
118. The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5-25 kpc Using Luminous Red Giant Branch Stars [Текст] / Y. Zhou [и др.] // ApJ. — 2023. — Апр. — Т. 946, № 2. — С. 73. — arXiv: [2212.10393 \[astro-ph.GA\]](#).
119. *Navarro, J. F.* The assembly of galaxies in a hierarchically clustering universe [Текст] / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White // MNRAS. — 1995. — Июль. — Т. 275, № 1. — С. 56—66. — arXiv: [astro-ph/9408067 \[astro-ph\]](#).
120. *Vasiliev, E.* Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2 [Текст] / E. Vasiliev // MNRAS. — 2019. — Апр. — Т. 484, № 2. — С. 2832—2850. — arXiv: [1807.09775 \[astro-ph.GA\]](#).
121. *Kravtsov, A.* Effect of the Large Magellanic Cloud on the kinematics of Milky Way satellites and virial mass estimate [Текст] / A. Kravtsov, S. Winney // The Open Journal of Astrophysics. — 2024. — Июнь. — Т. 7. — С. 50. — arXiv: [2405.06017 \[astro-ph.GA\]](#).
122. The HESTIA project: simulations of the Local Group [Текст] / N. I. Libeskind [и др.] // MNRAS. — 2020. — Окт. — Т. 498, № 2. — С. 2968—2983. — arXiv: [2008.04926 \[astro-ph.GA\]](#).
123. *Weinberger, R.* The AREPO Public Code Release [Текст] / R. Weinberger, V. Springel, R. Pakmor // ApJS. — 2020. — Июнь. — Т. 248, № 2. — С. 32. — arXiv: [1909.04667 \[astro-ph.IM\]](#).
124. Cosmicflows-2: The Data [Текст] / R. B. Tully [и др.] // AJ. — 2013. — Окт. — Т. 146, № 4. — С. 86. — arXiv: [1307.7213 \[astro-ph.CO\]](#).

125. Reconstructing cosmological initial conditions from galaxy peculiar velocities - I. Reverse Zeldovich Approximation [Текст] / T. Doumler [и др.] // MNRAS. — 2013. — Апр. — Т. 430, № 2. — С. 888—901. — arXiv: [1212.2806 \[astro-ph.CO\]](#).
126. The Auriga Project: the properties and formation mechanisms of disc galaxies across cosmic time [Текст] / R. J. J. Grand [и др.] // MNRAS. — 2017. — Май. — Т. 467, № 1. — С. 179—207. — arXiv: [1610.01159 \[astro-ph.GA\]](#).
127. *McCall, M. L.* A Council of Giants [Текст] / M. L. McCall // MNRAS. — 2014. — Май. — Т. 440, № 1. — С. 405—426. — arXiv: [1403.3667 \[astro-ph.GA\]](#).
128. The Discovery of the Faintest Known Milky Way Satellite Using UNIONS [Текст] / S. E. T. Smith [и др.] // ApJ. — 2024. — ЯНВ. — Т. 961, № 1. — С. 92. — arXiv: [2311.10147 \[astro-ph.GA\]](#).
129. *Carlesi, E.* Estimation of the masses in the local group by gradient boosted decision trees [Текст] / E. Carlesi, Y. Hoffman, N. I. Libeskind // MNRAS. — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 513, № 2. — С. 2385—2393. — arXiv: [2204.03334 \[astro-ph.CO\]](#).
130. A dynamical model of the local cosmic expansion [Текст] / J. Peñarrubia [и др.] // MNRAS. — 2014. — СЕНТ. — Т. 443, № 3. — С. 2204—2222. — arXiv: [1405.0306 \[astro-ph.GA\]](#).
131. The Hubble Space Telescope Survey of M31 Satellite Galaxies. I. RR Lyrae-based Distances and Refined 3D Geometric Structure [Текст] / A. Savino [и др.] // ApJ. — 2022. — ОКТ. — Т. 938, № 2. — С. 101. — arXiv: [2206.02801 \[astro-ph.GA\]](#).
132. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances [Текст] / D. Makarov [и др.] // A&A. — 2014. — ОКТ. — Т. 570. — A13. — arXiv: [1408.3476 \[astro-ph.GA\]](#).
133. *Pawlowski, M. S.* Phase-Space Correlations among Systems of Satellite Galaxies [Текст] / M. S. Pawlowski // Galaxies. — 2021. — СЕНТ. — Т. 9, № 3. — С. 66. — arXiv: [2109.02654 \[astro-ph.GA\]](#).
134. The Three-dimensional Structure of the M31 Satellite System; Strong Evidence for an Inhomogeneous Distribution of Satellites [Текст] / A. R. Conn [и др.] // ApJ. — 2013. — АПР. — Т. 766, № 2. — С. 120. — arXiv: [1301.7131 \[astro-ph.CO\]](#).

135. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties [Текст] / Gaia Collaboration [и др.] // A&A. — 2018. — Август. — Т. 616. — А1. — arXiv: [1804.09365 \[astro-ph.GA\]](#).
136. The LMC impact on the kinematics of the Milky Way satellites: clues from the running solar apex [Текст] / D. Makarov [и др.] // MNRAS. — 2023. — Май. — Т. 521, № 3. — С. 3540—3552. — arXiv: [2303.06175 \[astro-ph.GA\]](#).
137. *Reid, M. J.* The Proper Motion of Sagittarius A\*. III. The Case for a Supermassive Black Hole [Текст] / M. J. Reid, A. Brunthaler // ApJ. — 2020. — Март. — Т. 892, № 1. — С. 39. — arXiv: [2001.04386 \[astro-ph.GA\]](#).
138. Improved GRAVITY astrometric accuracy from modeling optical aberrations [Текст] / GRAVITY Collaboration [и др.] // A&A. — 2021. — Март. — Т. 647. — А59. — arXiv: [2101.12098 \[astro-ph.GA\]](#).
139. *Bajkova, A. T.* Galactic orbits of selected companions of the Milky Way [Текст] / A. T. Bajkova, V. V. Bobylev // Astronomy Reports. — 2017. — Сент. — Т. 61, № 9. — С. 727—738. — arXiv: [1707.04168 \[astro-ph.GA\]](#).
140. The Space Motion of Leo I: The Mass of the Milky Way's Dark Matter Halo [Текст] / M. Boylan-Kolchin [и др.] // ApJ. — 2013. — Май. — Т. 768, № 2. — С. 140. — arXiv: [1210.6046 \[astro-ph.CO\]](#).
141. *Pacucci, F.* Extreme Tidal Stripping May Explain the Overmassive Black Hole in Leo I: A Proof of Concept [Текст] / F. Pacucci, Y. Ni, A. Loeb // ApJ. — 2023. — Окт. — Т. 956, № 2. — С. L37. — arXiv: [2309.02487 \[astro-ph.GA\]](#).
142. *Hunt, J. A. S.* Milky Way dynamics in light of Gaia [Текст] / J. A. S. Hunt, E. Vasiliev // New Astronomy Reviews. — 2025. — Июнь. — Т. 100. — С. 101721. — arXiv: [2501.04075 \[astro-ph.GA\]](#).
143. Milky Way archaeology using RR Lyrae and type II Cepheids. II. High-velocity RR Lyrae stars and Milky Way mass [Текст] / Z. Prudil [и др.] // A&A. — 2022. — Август. — Т. 664. — А148. — arXiv: [2206.00417 \[astro-ph.GA\]](#).
144. The Escape Velocity Profile of the Milky Way from Gaia DR3 [Текст] / C. Roche [и др.] // ApJ. — 2024. — Сент. — Т. 972, № 1. — С. 70. — arXiv: [2402.00108 \[astro-ph.GA\]](#).
145. *McMillan, P. J.* Mass models of the Milky Way [Текст] / P. J. McMillan // MNRAS. — 2011. — Июль. — Т. 414, № 3. — С. 2446—2457. — arXiv: [1102.4340 \[astro-ph.GA\]](#).

146. The Milky Way's Circular-velocity Curve between 4 and 14 kpc from APOGEE data [Текст] / J. Bovy [и др.] // *ApJ*. — 2012. — Ноябрь. — Т. 759, № 2. — С. 131. — arXiv: [1209.0759 \[astro-ph.GA\]](#).
147. The Milky Way's rotation curve out to 100 kpc and its constraint on the Galactic mass distribution [Текст] / Y. Huang [и др.] // *MNRAS*. — 2016. — Дек. — Т. 463, № 3. — С. 2623—2639. — arXiv: [1604.01216 \[astro-ph.GA\]](#).
148. The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc [Текст] / A.-C. Eilers [и др.] // *ApJ*. — 2019. — Янв. — Т. 871, № 1. — С. 120. — arXiv: [1810.09466 \[astro-ph.GA\]](#).
149. The milky way total mass profile as inferred from Gaia DR2 [Текст] / M. Cautun [и др.] // *MNRAS*. — 2020. — Май. — Т. 494, № 3. — С. 4291—4313. — arXiv: [1911.04557 \[astro-ph.GA\]](#).
150. The Rotation Curve, Mass Distribution, and Dark Matter Content of the Milky Way from Classical Cepheids [Текст] / I. Ablimit [и др.] // *ApJ*. — 2020. — Май. — Т. 895, № 1. — С. L12. — arXiv: [2004.13768 \[astro-ph.GA\]](#).
151. Mass Models of the Milky Way and Estimation of Its Mass from the Gaia DR3 Data Set [Текст] / F. Sylos Labini [и др.] // *ApJ*. — 2023. — Март. — Т. 945, № 1. — С. 3. — arXiv: [2302.01379 \[astro-ph.GA\]](#).
152. *Klačka, J.* Milky Way: New Galactic mass model for orbit computations [Текст] / J. Klačka, M. Šturm, E. Puha // arXiv e-prints. — 2024. — Июль. — arXiv:2407.12551. — arXiv: [2407.12551 \[astro-ph.GA\]](#).
153. An estimate of the mass of the Milky Way from the Magellanic Stream [Текст] / P. A. Craig [и др.] // *MNRAS*. — 2022. — Дек. — Т. 517, № 2. — С. 1737—1749.
154. The Mass Profile of the Galaxy to 80 kpc [Текст] / O. Y. Gnedin [и др.] // *ApJ*. — 2010. — Сент. — Т. 720, № 1. — С. L108—L112. — arXiv: [1005.2619 \[astro-ph.GA\]](#).
155. Kinematics of the Stellar Halo and the Mass Distribution of the Milky Way Using Blue Horizontal Branch Stars [Текст] / P. R. Kafle [и др.] // *ApJ*. — 2012. — Дек. — Т. 761, № 2. — С. 98. — arXiv: [1210.7527 \[astro-ph.GA\]](#).
156. On the Shoulders of Giants: Properties of the Stellar Halo and the Milky Way Mass Distribution [Текст] / P. R. Kafle [и др.] // *ApJ*. — 2014. — Окт. — Т. 794, № 1. — С. 59. — arXiv: [1408.1787 \[astro-ph.GA\]](#).

157. The mass of the Galactic dark matter halo from  $\sim 9000$  LAMOST DR5 K giants [Текст] / M. Zhai [и др.] // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Август. — Т. 18, № 9. — С. 113.
158. Milky Way mass with K giants and BHB stars using LAMOST, SDSS/SEGUE, and Gaia: 3D spherical Jeans equation and tracer mass estimator [Текст] / S. A. Bird [и др.] // MNRAS. — 2022. — Октябрь. — Т. 516, № 1. — С. 731—748. — arXiv: [2207.08839](https://arxiv.org/abs/2207.08839) [[astro-ph.GA](#)].
159. *Eadie, G. M.* Estimating the Galactic Mass Profile in the Presence of Incomplete Data [Текст] / G. M. Eadie, W. E. Harris, L. M. Widrow // ApJ. — 2015. — Июнь. — Т. 806, № 1. — С. 54. — arXiv: [1503.07176](https://arxiv.org/abs/1503.07176) [[astro-ph.GA](#)].
160. *Eadie, G. M.* Bayesian Mass Estimates of the Milky Way: The Dark and Light Sides of Parameter Assumptions [Текст] / G. M. Eadie, W. E. Harris // ApJ. — 2016. — Октябрь. — Т. 829, № 2. — С. 108. — arXiv: [1608.04757](https://arxiv.org/abs/1608.04757) [[astro-ph.GA](#)].
161. Absolute Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) of Distant Milky Way Globular Clusters: Galactocentric Space Velocities and the Milky Way Mass [Текст] / S. T. Sohn [и др.] // ApJ. — 2018. — Июль. — Т. 862, № 1. — С. 52. — arXiv: [1804.01994](https://arxiv.org/abs/1804.01994) [[astro-ph.GA](#)].
162. Evidence for an Intermediate-mass Milky Way from Gaia DR2 Halo Globular Cluster Motions [Текст] / L. L. Watkins [и др.] // ApJ. — 2019. — Март. — Т. 873, № 2. — С. 118. — arXiv: [1804.11348](https://arxiv.org/abs/1804.11348) [[astro-ph.GA](#)].
163. *Posti, L.* Mass and shape of the Milky Way's dark matter halo with globular clusters from Gaia and Hubble [Текст] / L. Posti, A. Helmi // A&A. — 2019. — Январь. — Т. 621. — A56. — arXiv: [1805.01408](https://arxiv.org/abs/1805.01408) [[astro-ph.GA](#)].
164. Constraining the Milky Way Mass Profile with Phase-space Distribution of Satellite Galaxies [Текст] / Z.-Z. Li [и др.] // ApJ. — 2020. — Май. — Т. 894, № 1. — С. 10. — arXiv: [1912.02086](https://arxiv.org/abs/1912.02086) [[astro-ph.GA](#)].
165. The mass of the Milky Way out to 100 kpc using halo stars [Текст] / A. J. Deason [и др.] // MNRAS. — 2021. — Март. — Т. 501, № 4. — С. 5964—5972. — arXiv: [2010.13801](https://arxiv.org/abs/2010.13801) [[astro-ph.GA](#)].
166. The Mass of the Milky Way from the H3 Survey [Текст] / J. Shen [и др.] // ApJ. — 2022. — Январь. — Т. 925, № 1. — С. 1. — arXiv: [2111.09327](https://arxiv.org/abs/2111.09327) [[astro-ph.GA](#)].

167. The Mass Distribution and Assembly of the Milky Way from the Properties of the Magellanic Clouds [Текст] / М. Т. Busha [и др.] // *ApJ*. — 2011. — Дек. — Т. 743, № 1. — С. 40. — arXiv: [1011.2203 \[astro-ph.GA\]](#).
168. *González, R. E.* Satellites in Milky-Way-like Hosts: Environment Dependence and Close Pairs [Текст] / R. E. González, A. V. Kravtsov, N. Y. Gnedin // *ApJ*. — 2013. — ИЮНЬ. — Т. 770, № 2. — С. 96. — arXiv: [1301.2605 \[astro-ph.CO\]](#).
169. Milky Way mass constraints from the Galactic satellite gap [Текст] / М. Cautun [и др.] // *MNRAS*. — 2014. — Дек. — Т. 445, № 2. — С. 2049—2060. — arXiv: [1405.7697 \[astro-ph.CO\]](#).
170. The orbital ellipticity of satellite galaxies and the mass of the Milky Way [Текст] / C. Barber [и др.] // *MNRAS*. — 2014. — ЯНВ. — Т. 437, № 1. — С. 959—967. — arXiv: [1310.0466 \[astro-ph.GA\]](#).
171. *Patel, E.* Orbits of massive satellite galaxies - I. A close look at the Large Magellanic Cloud and a new orbital history for M33 [Текст] / E. Patel, G. Besla, S. T. Sohn // *MNRAS*. — 2017. — Февр. — Т. 464, № 4. — С. 3825—3849. — arXiv: [1609.04823 \[astro-ph.GA\]](#).
172. Estimating the Mass of the Milky Way Using the Ensemble of Classical Satellite Galaxies [Текст] / E. Patel [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Апр. — Т. 857, № 2. — С. 78. — arXiv: [1803.01878 \[astro-ph.GA\]](#).
173. The mass of our Galaxy from satellite proper motions in the Gaia era [Текст] / T. K. Fritz [и др.] // *MNRAS*. — 2020. — ИЮНЬ. — Т. 494, № 4. — С. 5178—5193. — arXiv: [2001.02651 \[astro-ph.GA\]](#).
174. Sizing from the smallest scales: the mass of the Milky Way [Текст] / M. K. Rodriguez Wimberly [и др.] // *MNRAS*. — 2022. — ИЮЛЬ. — Т. 513, № 4. — С. 4968—4982. — arXiv: [2109.00633 \[astro-ph.GA\]](#).
175. Line-of-Sight Mass Estimator and the Masses of the Milky Way and Andromeda Galaxy [Текст] / D. Makarov [и др.] // *Universe*. — 2025. — Апр. — Т. 11, № 5. — С. 144. — arXiv: [2503.12612 \[astro-ph.GA\]](#).
176. The outer halo globular cluster system of M31 - I. The final PAndAS catalogue [Текст] / A. P. Nuxor [и др.] // *MNRAS*. — 2014. — АВГ. — Т. 442, № 3. — С. 2165—2187. — arXiv: [1404.5807 \[astro-ph.GA\]](#).

177. A rogues gallery of Andromeda's dwarf galaxies - II. Precise distances to 17 faint satellites [Текст] / D. R. Weisz [и др.] // MNRAS. — 2019. — Окт. — Т. 489, № 1. — С. 763—770. — arXiv: [1909.02017 \[astro-ph.GA\]](#).
178. *Kvasova, K. A.* Kinematics and Metallicity of the Dwarf Spheroidal Galaxy Andromeda XVIII [Текст] / K. A. Kvasova, E. N. Kirby, R. L. Beaton // ApJ. — 2024. — Сент. — Т. 972, № 2. — С. 180. — arXiv: [2404.11804 \[astro-ph.GA\]](#).
179. *Watkins, L. L.* A census of orbital properties of the M31 satellites [Текст] / L. L. Watkins, N. W. Evans, G. van de Ven // MNRAS. — 2013. — Апр. — Т. 430, № 2. — С. 971—985. — arXiv: [1211.2638 \[astro-ph.CO\]](#).
180. *Karachentsev, I. D.* Suites of Dwarfs around nearby Giant Galaxies [Текст] / I. D. Karachentsev, E. I. Kaisina, D. I. Makarov // AJ. — 2014. — Янв. — Т. 147, № 1. — С. 13. — arXiv: [1310.6838 \[astro-ph.CO\]](#).
181. High-resolution Mass Models of Dwarf Galaxies from LITTLE THINGS [Текст] / S.-H. Oh [и др.] // AJ. — 2015. — Июнь. — Т. 149, № 6. — С. 180. — arXiv: [1502.01281 \[astro-ph.GA\]](#).
182. Spectroscopy of the Three Distant Andromedan Satellites Cassiopeia III, Lacerta I, and Perseus I [Текст] / N. F. Martin [и др.] // ApJ. — 2014. — Сент. — Т. 793, № 1. — С. L14. — arXiv: [1408.5130 \[astro-ph.GA\]](#).
183. PAndAS' Progeny: Extending the M31 Dwarf Galaxy Cabal [Текст] / J. C. Richardson [и др.] // ApJ. — 2011. — Май. — Т. 732, № 2. — С. 76. — arXiv: [1102.2902 \[astro-ph.CO\]](#).
184. Discovery and analysis of three faint dwarf galaxies and a globular cluster in the outer halo of the Andromeda galaxy [Текст] / N. F. Martin [и др.] // MNRAS. — 2006. — Окт. — Т. 371, № 4. — С. 1983—1991. — arXiv: [astro-ph/0607472 \[astro-ph\]](#).
185. *Sakari, C. M.* The integrated calcium II triplet as a metallicity indicator: comparisons with high-resolution [Fe/H] in M31 globular clusters [Текст] / C. M. Sakari, G. Wallerstein // MNRAS. — 2016. — Февр. — Т. 456, № 1. — С. 831—843. — arXiv: [1511.06766 \[astro-ph.GA\]](#).
186. A Peculiar Faint Satellite in the Remote Outer Halo of M31 [Текст] / A. D. Mackey [и др.] // ApJ. — 2013. — Июнь. — Т. 770, № 2. — С. L17. — arXiv: [1304.7826 \[astro-ph.GA\]](#).

187. A Kinematic Study of the Andromeda Dwarf Spheroidal System [Текст] / M. L. M. Collins [и др.] // *ApJ*. — 2013. — Май. — Т. 768, № 2. — С. 172. — arXiv: [1302.6590 \[astro-ph.CO\]](#).
188. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III [Текст] / S. Alam [и др.] // *ApJS*. — 2015. — Июль. — Т. 219, № 1. — С. 12. — arXiv: [1501.00963 \[astro-ph.IM\]](#).
189. First Gaia Dynamics of the Andromeda System: DR2 Proper Motions, Orbits, and Rotation of M31 and M33 [Текст] / R. P. van der Marel [и др.] // *ApJ*. — 2019. — Февр. — Т. 872, № 1. — С. 24. — arXiv: [1805.04079 \[astro-ph.GA\]](#).
190. The proper motion of Andromeda from Gaia EDR3: confirming a nearly radial orbit [Текст] / J. .-. Salomon [и др.] // *MNRAS*. — 2021. — Окт. — Т. 507, № 2. — С. 2592—2601. — arXiv: [2012.09204 \[astro-ph.GA\]](#).
191. *Patel, E.* Evidence for a Massive Andromeda Galaxy Using Satellite Galaxy Proper Motions [Текст] / E. Patel, K. S. Mandel // *ApJ*. — 2023. — Май. — Т. 948, № 2. — С. 104. — arXiv: [2211.15928 \[astro-ph.GA\]](#).
192. HST Proper Motion of Andromeda III. Another Satellite Coorbiting the M31 Satellite Plane [Текст] / D. I. Casetti-Dinescu [и др.] // *ApJ*. — 2024. — Нояб. — Т. 975, № 1. — С. 138. — arXiv: [2409.08252 \[astro-ph.GA\]](#).
193. Pisces VII/Triangulum III - M33's second dwarf satellite galaxy [Текст] / M. L. M. Collins [и др.] // *MNRAS*. — 2024. — Февр. — Т. 528, № 2. — С. 2614—2620. — arXiv: [2305.13966 \[astro-ph.GA\]](#).
194.  $\Lambda$ CDM predictions for the satellite population of M33 [Текст] / E. Patel [и др.] // *MNRAS*. — 2018. — Окт. — Т. 480, № 2. — С. 1883—1897. — arXiv: [1807.05318 \[astro-ph.GA\]](#).
195. Star formation history of And XVIII: a dwarf spheroidal galaxy in isolation [Текст] / L. N. Makarova [и др.] // *MNRAS*. — 2017. — Янв. — Т. 464, № 2. — С. 2281—2289. — arXiv: [1609.09706 \[astro-ph.GA\]](#).
196. Stellar mass map and dark matter distribution in M 31 [Текст] / A. Tamm [и др.] // *A&A*. — 2012. — Окт. — Т. 546. — A4. — arXiv: [1208.5712 \[astro-ph.CO\]](#).
197. *Hayashi, K.* The Prolate Dark Matter Halo of the Andromeda Galaxy [Текст] / K. Hayashi, M. Chiba // *ApJ*. — 2014. — Июль. — Т. 789, № 1. — С. 62. — arXiv: [1405.4606 \[astro-ph.GA\]](#).

198. *Sofue, Y.* Dark halos of M 31 and the Milky Way [Текст] / Y. Sofue // PASJ. — 2015. — Август. — Т. 67, № 4. — С. 75. — arXiv: [1504.05368 \[astro-ph.GA\]](#).
199. The rotation curve and mass distribution of M31 [Текст] / X. Zhang [и др.] // MNRAS. — 2024. — Февр. — Т. 528, № 2. — С. 2653—2666. — arXiv: [2401.01517 \[astro-ph.GA\]](#).
200. Inferring the Andromeda Galaxy’s mass from its giant southern stream with Bayesian simulation sampling [Текст] / M. A. Fardal [и др.] // MNRAS. — 2013. — Окт. — Т. 434, № 4. — С. 2779—2802. — arXiv: [1307.3219 \[astro-ph.CO\]](#).
201. Kinematics of Outer Halo Globular Clusters in M31 [Текст] / J. Veljanoski [и др.] // ApJ. — 2013. — Май. — Т. 768, № 2. — С. L33. — arXiv: [1303.7368 \[astro-ph.GA\]](#).
202. *Patel, E.* Orbits of massive satellite galaxies - II. Bayesian estimates of the Milky Way and Andromeda masses using high-precision astrometry and cosmological simulations [Текст] / E. Patel, G. Besla, K. Mandel // MNRAS. — 2017. — Июль. — Т. 468, № 3. — С. 3428—3449. — arXiv: [1703.05767 \[astro-ph.GA\]](#).
203. The M31 Velocity Vector. II. Radial Orbit toward the Milky Way and Implied Local Group Mass [Текст] / R. P. van der Marel [и др.] // ApJ. — 2012. — Июль. — Т. 753, № 1. — С. 8. — arXiv: [1205.6864 \[astro-ph.GA\]](#).
204. Balancing mass and momentum in the Local Group [Текст] / J. D. Diaz [и др.] // MNRAS. — 2014. — Сент. — Т. 443, № 2. — С. 1688—1703. — arXiv: [1405.3662 \[astro-ph.GA\]](#).
205. The Laniakea supercluster of galaxies [Текст] / R. B. Tully [и др.] // Nature. — 2014. — Сент. — Т. 513, № 7516. — С. 71—73. — arXiv: [1409.0880 \[astro-ph.CO\]](#).
206. *Baushev, A. N.* Hubble stream near a massive object: The exact analytical solution for the spherically-symmetric case [Текст] / A. N. Baushev // Phys. Rev. D. — 2020. — Окт. — Т. 102, № 8. — С. 083529. — arXiv: [2004.01427 \[astro-ph.CO\]](#).
207. *Lahav, O.* The Cosmological Parameters (2021) [Текст] / O. Lahav, A. R. Liddle // arXiv e-prints. — 2022. — Янв. — arXiv:2201.08666. — arXiv: [2201.08666 \[astro-ph.CO\]](#).

208. The 1000 Brightest HIPASS Galaxies: H I Properties [Текст] / B. S. Koribalski [и др.] // AJ. — 2004. — Июль. — Т. 128, № 1. — С. 16—46. — arXiv: [astro-ph/0404436](#) [astro-ph].
209. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog [Текст] / M. P. Haynes [и др.] // ApJ. — 2018. — Июль. — Т. 861, № 1. — С. 49. — arXiv: [1805.11499](#) [astro-ph.GA].
210. Prolate rotation and metallicity gradient in the transforming dwarf galaxy Phoenix [Текст] / N. Kacharov [и др.] // MNRAS. — 2017. — Апр. — Т. 466, № 2. — С. 2006—2023. — arXiv: [1612.01560](#) [astro-ph.GA].
211. Deep Imaging of Eridanus II and Its Lone Star Cluster [Текст] / D. Crnojević [и др.] // ApJ. — 2016. — Июнь. — Т. 824, № 1. — С. L14. — arXiv: [1604.08590](#) [astro-ph.GA].
212. The ACS LCID Project - VIII. The short-period Cepheids of Leo A [Текст] / E. J. Bernard [и др.] // MNRAS. — 2013. — Июль. — Т. 432, № 4. — С. 3047—3061. — arXiv: [1304.5435](#) [astro-ph.GA].
213. Gas distribution, kinematics and star formation in faint dwarf galaxies [Текст] / A. Begum [и др.] // MNRAS. — 2006. — Февр. — Т. 365, № 4. — С. 1220—1234. — arXiv: [astro-ph/0511253](#) [astro-ph].
214. The Outer Limits of the M31 System: Kinematics of the Dwarf Galaxy Satellites And XXVIII & And XXIX [Текст] / E. J. Tollerud [и др.] // ApJ. — 2013. — Май. — Т. 768, № 1. — С. 50. — arXiv: [1302.0848](#) [astro-ph.CO].
215. Life at the periphery of the Local Group: the kinematics of the Tucana dwarf galaxy [Текст] / F. Fraternali [и др.] // A&A. — 2009. — Май. — Т. 499, № 1. — С. 121—128. — arXiv: [0903.4635](#) [astro-ph.CO].
216. Pegasus W: An Ultrafaint Dwarf Galaxy Outside the Halo of M31 Not Quenched by Reionization [Текст] / K. B. W. McQuinn [и др.] // ApJ. — 2023. — Февр. — Т. 944, № 1. — С. 14. — arXiv: [2301.04157](#) [astro-ph.GA].
217. *Karachentsev, I.* Local Field of Galaxy Velocities [Текст] / I. Karachentsev, D. Makarov // Astrofizika. — 2001. — Янв. — Т. 44. — С. 1—13.
218. The very local Hubble flow [Текст] / I. D. Karachentsev [и др.] // A&A. — 2002. — Июль. — Т. 389. — С. 812—824. — arXiv: [astro-ph/0204507](#) [astro-ph].

219. On the quiescence of the Hubble flow in the vicinity of the Local Group. A study using galaxies with distances from the Cepheid PL-relation [Текст] / T. Ekholm [и др.] // A&A. — 2001. — Март. — Т. 368. — С. L17—L20.
220. *Sandage, A.* Limits on the Local Deviation of the Universe from a Homogeneous Model. [Текст] / A. Sandage, G. A. Tammann, E. Hardy // ApJ. — 1972. — Март. — Т. 172. — С. 253.
221. *Baryshev, Y. V.* The cold local Hubble flow as a signature of dark energy. [Текст] / Y. V. Baryshev, A. D. Chernin, P. Teerikorpi // A&A. — 2001. — Ноябрь. — Т. 378. — С. 729—734. — arXiv: [astro-ph/0011528](#) [[astro-ph](#)].
222. Dynamical effects of the cosmological constant. [Текст] / O. Lahav [и др.] // MNRAS. — 1991. — Июль. — Т. 251. — С. 128—136.
223. The local Hubble flow: is it a manifestation of dark energy? [Текст] / Y. Hoffman [и др.] // MNRAS. — 2008. — Май. — Т. 386, № 1. — С. 390—396. — arXiv: [0711.4989](#) [[astro-ph](#)].
224. *Makarova, L. N.* Spatial segregation impact on star formation in nearby dwarf spheroidal galaxies [Текст] / L. N. Makarova, D. I. Makarov // MNRAS. — 2021. — Апр. — Т. 502, № 2. — С. 1623—1632. — arXiv: [2101.08613](#) [[astro-ph.GA](#)].
225. Stellar chemo-kinematics of the Cetus dwarf spheroidal galaxy [Текст] / S. Taibi [и др.] // A&A. — 2018. — Окт. — Т. 618. — A122. — arXiv: [1807.04250](#) [[astro-ph.GA](#)].
226. Inside the whale: the structure and dynamics of the isolated Cetus dwarf spheroidal [Текст] / G. F. Lewis [и др.] // MNRAS. — 2007. — Март. — Т. 375, № 4. — С. 1364—1370. — arXiv: [astro-ph/0612293](#) [[astro-ph](#)].
227. The ACS LCID Project: On the Origin of Dwarf Galaxy Types—A Manifestation of the Halo Assembly Bias? [Текст] / C. Gallart [и др.] // ApJ. — 2015. — Окт. — Т. 811, № 2. — С. L18. — arXiv: [1507.08350](#) [[astro-ph.GA](#)].
228. *Teyssier, M.* Identifying Local Group field galaxies that have interacted with the Milky Way [Текст] / M. Teyssier, K. V. Johnston, M. Kuhlen // MNRAS. — 2012. — Ноябрь. — Т. 426, № 3. — С. 1808—1818. — arXiv: [1207.2768](#) [[astro-ph.GA](#)].

229. Discovery of Latent Star Formation in the Extended H I Gas around the Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822 [Текст] / Y. Komiyama [и др.] // *ApJ*. — 2003. — ИЮНЬ. — Т. 590, № 1. — С. L17—L20.
230. Solo dwarfs - III. Exploring the orbital origins of isolated Local Group galaxies with Gaia Data Release 2 [Текст] / A. W. McConnachie [и др.] // *MNRAS*. — 2021. — Февр. — Т. 501, № 2. — С. 2363—2377. — arXiv: [2012.01586 \[astro-ph.GA\]](#).
231. The faint outer regions of the Pegasus dwarf irregular galaxy: a much larger and undisturbed galaxy [Текст] / A. Y. Kniazev [и др.] // *MNRAS*. — 2009. — Дек. — Т. 400, № 4. — С. 2054—2069. — arXiv: [0908.3621 \[astro-ph.GA\]](#).
232. *Lynden-Bell, D.* The dynamical age of the local group of galaxies [Текст] / D. Lynden-Bell // *The Observatory*. — 1981. — Авг. — Т. 101. — С. 111—114.
233. *Sandage, A.* The Redshift-Distance Relation. IX. Perturbation of the Very Nearby Velocity Field by the Mass of the Local Group [Текст] / A. Sandage // *ApJ*. — 1986. — Авг. — Т. 307. — С. 1.
234. *Benisty, D.* Galaxy groups in the presence of cosmological constant: Increasing the masses of groups [Текст] / D. Benisty, M. M. Chaichian, A. Tureanu // *Physics Letters B*. — 2024. — Нояб. — Т. 858. — С. 139033. — arXiv: [2405.14944 \[astro-ph.GA\]](#).
235. *Kahn, F. D.* Intergalactic Matter and the Galaxy. [Текст] / F. D. Kahn, L. Woltjer // *ApJ*. — 1959. — Нояб. — Т. 130. — С. 705.
236. *Sawala, T.* The Local Group's mass: probably no more than the sum of its parts [Текст] / T. Sawala, M. Teeriahho, P. H. Johansson // *MNRAS*. — 2023. — ИЮНЬ. — Т. 521, № 4. — С. 4863—4877. — arXiv: [2210.07250 \[astro-ph.GA\]](#).
237. The Local Group Mass in the Light of Gaia [Текст] / D. Benisty [и др.] // *ApJ*. — 2022. — Март. — Т. 928, № 1. — С. L5. — arXiv: [2202.00033 \[astro-ph.GA\]](#).
238. *Benisty, D.* Weighing Milky Way and Andromeda in an expanding  $\Lambda$ CDM Universe: Decreasing the Local Group mass [Текст] / D. Benisty // *A&A*. — 2024. — Сент. — Т. 689. — С. L1. — arXiv: [2401.09546 \[astro-ph.CO\]](#).
239. *Karachentsev, I. D.* The observed infall of galaxies towards the Virgo cluster [Текст] / I. D. Karachentsev, O. G. Nasonova // *MNRAS*. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 405, № 2. — С. 1075—1083. — arXiv: [1002.2085 \[astro-ph.CO\]](#).