

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
РАН

Макаров Дмитрий Игоревич

Официальные оппоненты: **Сильченко Ольга Касьяновна**,
доктор физико-математических наук,
Государственный астрономический институт им.
П. К. Штернберга Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова,
заместитель директора по научной работе

Пилипенко Сергей Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
Физический институт им. П. Н. Лебедева Россий-
ской академии наук,
высококвалифицированный старший научный со-
трудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки Институт астрономии Российской
академии наук

Защита состоится 24 ноября 2025 г. в _____ часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 24.1.212.01 при Федеральном государственном бюджетном учре-
ждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской акаде-
мии наук по адресу: CAO РАН, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская рес-
публика, Россия 369167.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке CAO РАН.

Автореферат разослан _____ 2025 года.
Телефон для справок: +7 (87878) 46-336.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.212.01,
канд. физ.-мат. наук

Шолухова Ольга Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Современная стандартная Λ CDM космология базируется на модели расширяющейся вселенной, состоящей из трёх основных компонент: *тёмной энергии*, описываемой космологической постоянной Λ 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 Λ CDM модель прекрасно описывает наблюдаемые флуктуации реликтового излучения. Согласно этой модели возраст Вселенной равен 13.797 ± 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 Λ , 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, заключенную 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, дает 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 вещества 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 произошел 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 $R_0 = (0.96 \pm 0.03) \text{ Мпк}$, что соответствует массе $M_{\text{LG}} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$ [15]. Эта величина находится в замечательном согласии с вириальными оценками массы нашей Галактики и Туманности Андромеды $M_{\text{MW}+\text{M31}} = (1.6\text{--}2.2) \times 10^{12} M_{\odot}$. 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 М81 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 5×10^{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 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 Λ -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 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 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 ΛCDM 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, выполненными 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”, online, 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., Либбескинд Н., Саломон Ж.Б.
7. Международная конференция “CLUES Meeting 2023”, Munich, Germany, 05–09.06.2023, устный доклад “Kinematics of the Milky Way

- satellites”, Dmirty Makarov, Sergey Khopeskov, 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, Kozыrev 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”, CAO 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”, CAO 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”, CAO 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 туманности 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, расположенных 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 Хабблов-

ский 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 Заключение приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

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 км с^{-1} в согласии со стандартными представлениями о кинематике галактик в группах и предсказаниями Λ CDM-модели.
5. Квадрупольный член поля скоростей оказывается статистически незначимым, и полностью определяется кинематикой шести ближайших спутников, $D_{\text{MW}} < 30 \text{ кпк}$, 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 Λ 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 Λ CDM модели Вселенной [22].
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 км с^{-1} . На самом деле это верхний предел, поскольку погрешности в оценках расстояния должны вносить существенный вклад в это значение.
13. Космологическое Λ CDM-моделирование, ограниченное по Местной Вселенной, предсказывает гораздо больший разброс поля скоростей, порядка 70 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. — A6. — arXiv: [1807.06209 \[astro-ph.CO\]](#).
2. Measurements of Ω and Λ 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 M₃₁ 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. *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](https://arxiv.org/abs/2004.01427) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro)].

Макаров Данила Дмитриевич

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

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

