



УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН
Г.Г. Валявин
1 августа 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация "Анализ скоростей близких карликовых галактик и оценка массы Млечного Пути, Туманности Андромеды и Местной Группы", представляемая на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия, выполнена в лаборатории внегалактической астрофизики и космологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Макаров Данила Дмитриевич работал в САО РАН в должности стажера-исследователя в лаборатории внегалактической астрофизики и космологии.

В 2021 году Макаров Д.Д. окончил магистратуру физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по направлению 03.04.02 "Физика".

В период подготовки диссертации соискатель обучался по программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре САО РАН по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия, в 2025 году успешно оканчивает ее.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор РАН Макаров Дмитрий Игоревич работает в должности заведующего лабораторией внегалактической астрофизики и космологии.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Диссертационная работа Макарова Данилы Дмитриевича посвящена исследованию кинематики близких карликовых галактик и независимой оценке масс Млечного Пути, Туманности Андромеды и всей Местной Группы. Целью работы является построение согласованной динамической картины окрестностей Местной Группы на масштабах до 1.5 Мпк на основе анализа лучевых скоростей спутников и галактик, расположенных за пределами вириальных зон главных членов Местной группы.

Актуальность исследования обусловлена ключевой ролью Местной Группы в изучении структуры, динамики и состава Вселенной. В условиях стремительного роста объема и точности астрономических наблюдений, особенно благодаря достижениям космических миссий и прогрессу в определении расстояний до галактик, существенно возросли возможности для построения трехмерной модели распределения вещества. Наиболее точные наблюдательные данные получены именно для ближайших галактик, что делает Местную Группу эталонной системой для тестирования современных космологических моделей. Несмотря на существенный прогресс в наблюдениях, оценки массы Местной Группы и ее членов существенно различаются в зависимости от выбранного метода. Особый интерес вызывает исследование движения карликовых

галактик на периферии Местной Группы, что потенциально дает возможность проследить распределение гравитирующего вещества на расстояниях от нескольких сотен килопарсек до примерно одного мегапарсека. Этот диапазон имеет принципиальное значение, поскольку охватывает область за пределами вириального радиуса группы, где классические методы оценки массы невозможны, а влияние гравитационного поля приводит к существенным нелинейным отклонениям от космологического хаббловского расширения. Таким образом, тематика настоящей диссертации находится на стыке актуальных направлений современной астрофизики — изучения темной материи, динамики малых групп галактик, построения близкого поля пекулярных скоростей Вселенной и верификации космологических моделей на малых масштабах.

Диссертационная работа содержит комплекс новых научных результатов, полученных автором в рамках системного исследования кинематики близких карликовых галактик и динамической структуры Местной Группы. В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие **результаты**:

Анализ поведения апекса Солнца относительно 50 спутников нашей Галактики с известными радиальными скоростями выявил аномально высокую скорость Солнца относительно внутренних спутников на расстояниях менее 100 кпк, что соответствует коллективному движению спутников со скоростью 226 ± 50 км/с относительно Млечного Пути. Было показано, что данная аномалия тесно связана с Большим Магеллановым Облаком (БМО). Самосогласованное моделирование N-тел показало, что наблюдаемая картина лучевых скоростей может быть объяснена возмущением орбит внутренних спутников первым пролетом БМО вокруг нашей Галактики. Поле скоростей внешних спутников демонстрирует изотропное распределение лучевых скоростей относительно центра Млечного Пути с дисперсией 84 км/с. Квадрупольный член поля скоростей статистически незначим.

Получены уравнения для оценки массы галактики по кинематике ее спутников с учетом их реального трехмерного распределения в системе. Сравнение с результатами численного Λ CDM-моделирования подтвердило применимость метода. Применение данной методологии к наиболее современным и полным наблюдательным данным о лучевых скоростях и расстояниях спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды позволило получить новые оценки их масс, $M_{MW} = (7.9 \pm 2.3) \times 10^{11}$ и $M_{M31} = (15.5 \pm 3.4) \times 10^{11} M_{\odot}$, согласующиеся с независимыми измерениями, представленными в литературе.

Анализ движения периферийных членов Местной Группы, за пределами вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды, показал, что две трети галактик следуют Хаббловскому потоку относительно барицентра Местной Группы с чрезвычайно малой дисперсией лучевых скоростей всего 15 км/с. Космологическое Λ CDM-моделирование предсказывает гораздо больший разброс скоростей. Галактики, выбивающиеся из этой зависимости, скорее всего, ранее подвергались влиянию других членов Местной Группы и не могут рассматриваться как свободно падающие частицы. По Хаббловскому потоку в диапазоне расстояний от 400 до 1400 кпк были получены оценки массы Местной Группы. Не было обнаружено статистически значимого изменения массы с расстоянием. Полная масса Местной Группы $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_{\odot}$ находится в прекрасном согласии с суммой вириальных масс нашей Галактики и Туманности Андромеды. Это свидетельствует, что почти вся масса Местной Группы сосредоточена внутри вириальных радиусов этих двух гигантских спиралей.

Научная новизна состоит в следующем. Впервые выявлена и количественно охарактеризована аномалия бегущего апекса Солнца относительно спутников Млечного

Пути, обусловленная возмущением, вызванным первым пролетом массивного Большого Магелланова Облака. Получены новые оценки массы Млечного Пути и Туманности Андромеды, на основе метода, учитывающего трехмерные расстояния спутников. Получены новые независимые оценки полной массы Местной Группы по анализу движения периферийных членов за пределами вириальных зон. Хаббловский поток внутри Местной Группы является чрезвычайно холодным и характеризуется дисперсией скоростей 15 км/с. Полученные результаты являются оригинальными и вносят существенный вклад в развитие представлений о динамике Местной Группы, методах оценки масс галактик и проверке космологических моделей на малых масштабах.

Научная и практическая значимость заключается в том, что результаты, полученные в диссертации, вносят вклад в решение одной из ключевых проблем современной астрофизики и космологии — определения массы галактик и групп на основе их кинематических характеристик. Разработанный в диссертации метод оценки массы галактик, учитывающий трехмерное расположение спутников уменьшает влияние проекционных эффектов и повышает точность и надежность оценок масс групп галактик. Продемонстрирована возможность согласованного описания движения карликовых галактик в рамках модели локального Хаббловского потока с учетом гравитационного влияния центральной концентрации массы в рамках стандартной Λ CDM космологии, что открывает перспективы для применения этой модели к другим близким группам галактик. Это способствует развитию независимых методов оценки космологических параметров на малых масштабах и может быть востребовано при калибровке численных симуляций Вселенной.

Личный вклад автора заключается в создании выборки членов Местной Группы галактик, сборе данных по литературе. Автор участвовал в сборе данных по спутникам Туманности Андромеды. Определение и анализ бегущего апекса Солнца относительно спутников Млечного Пути, и проверки различных гипотез объяснения аномалии выполнены автором. Развитие метода проекционных масс для случая известных расстояний спутников проведено автором. Автор оценил массу нашей Галактики и участвовал в оценке массы Туманности Андромеды. Анализ распределения скоростей вне вириальных зон и оценка полной массы Местной Группы по ее влиянию на Хаббловский поток выполнены автором диссертации. Автор участвовал в анализе данных космологического гидродинамического моделирования HESTIA. Весь программный код, использованный в работе для проведения исследования, написан автором.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в трех статьях соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, и в трех статьях, опубликованных в трудах конференций. Представленные результаты и выводы обсуждались на шести всероссийских и пяти международных конференциях в виде устных и постерных докладов, а также на семинарах САО РАН, АКЦ ФИАН и института астрофизики Парижа.

По докладу Макарова Д.Д. на Ученом совете САО РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

В выступлении Пустильник С.А. высказал мнение, что основные результаты работы, включая положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы методически, внутренне непротиворечивы, хорошо согласуются с результатами других авторов, выполненных с применением независимых подходов и методов. Эти результаты прошли рецензирование в статьях, опубликованных в ведущих астрофизических журналах, а также доложены и обсуждены на российских и международных

конференциях. Их достоверность и новизна не вызывают сомнений. Научная и практическая значимость работы определяется полученными результатами по движению близких карликовых галактик, структуре Местной Группы, распределению в ней вещества и ее эволюции, а также используемыми новыми методами анализа. Он также высказал несколько критических замечаний по оформлению и содержанию диссертации, которые не умаляют значимости диссертационного исследования. Караченцев И.Д. отметил уровень выполнения работы: полученные результаты с хорошим методическим отождествлением, два независимых подхода к определению масс внутри вириальных радиусов Млечного Пути и Туманности Андромеды, и по падению карликовых галактик на Местную Группу дают хорошее взаимное согласие. В выступлениях Пустильник С.А., Караченцев И.Д., Валявин Г.Г. высказали мнение, что диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Мнение было поддержано другими членами Ученого совета.

Ученый совет пришел к заключению, что представленная диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация "Анализ скоростей близких карликовых галактик и оценка массы Млечного Пути, Туманности Андромеды и Местной Группы" Макарова Даниила Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета CAO РАН 31 июля 2025 года.

Присутствовало на заседании 14 человек.

Результаты голосования: "за" – единогласно, протокол № 438 от 31 июля 2025 года.

Председатель Ученого совета
директор CAO РАН
кандидат физ.-мат. наук



/Валявин Г.Г./

Ученый секретарь CAO РАН
кандидат физ.-мат. наук

/Кайсина Е.И./