



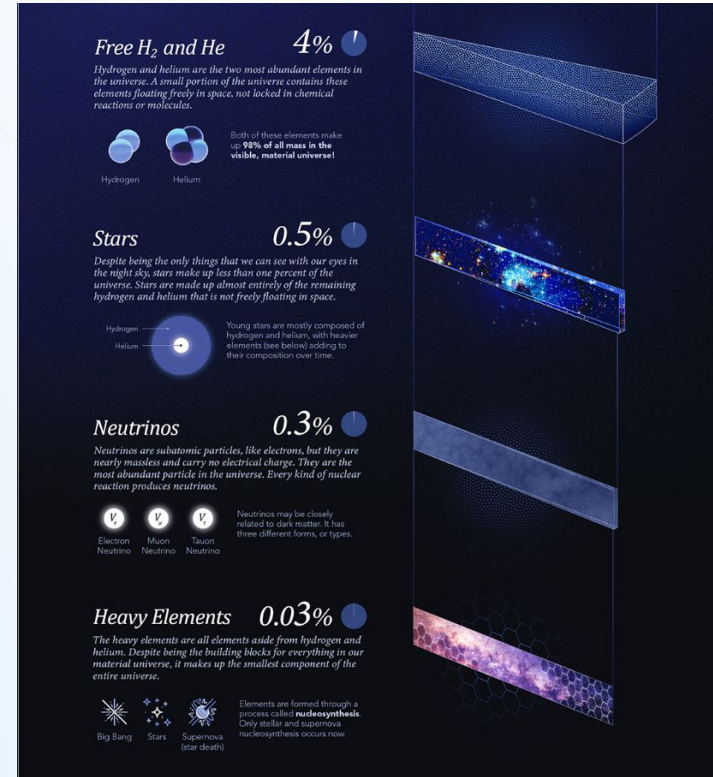
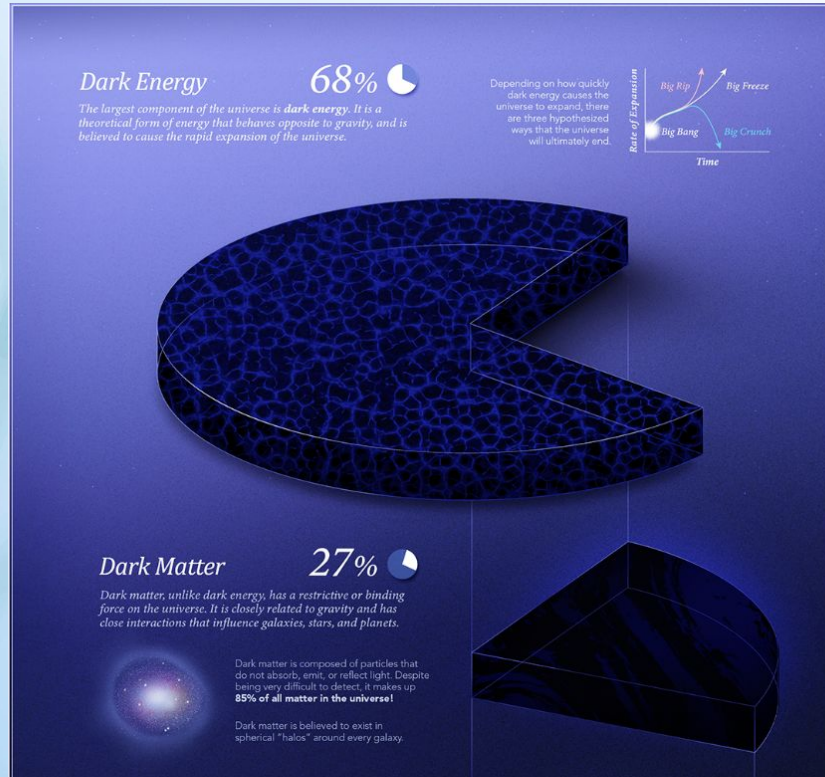
Анализ скоростей близких карликовых галактик и оценка массы Млечного Пути, Туманности Андромеды и Местной Группы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
(1.3.1. - физика космоса, астрономия)

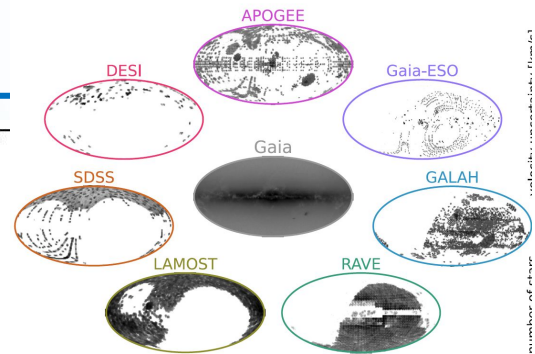
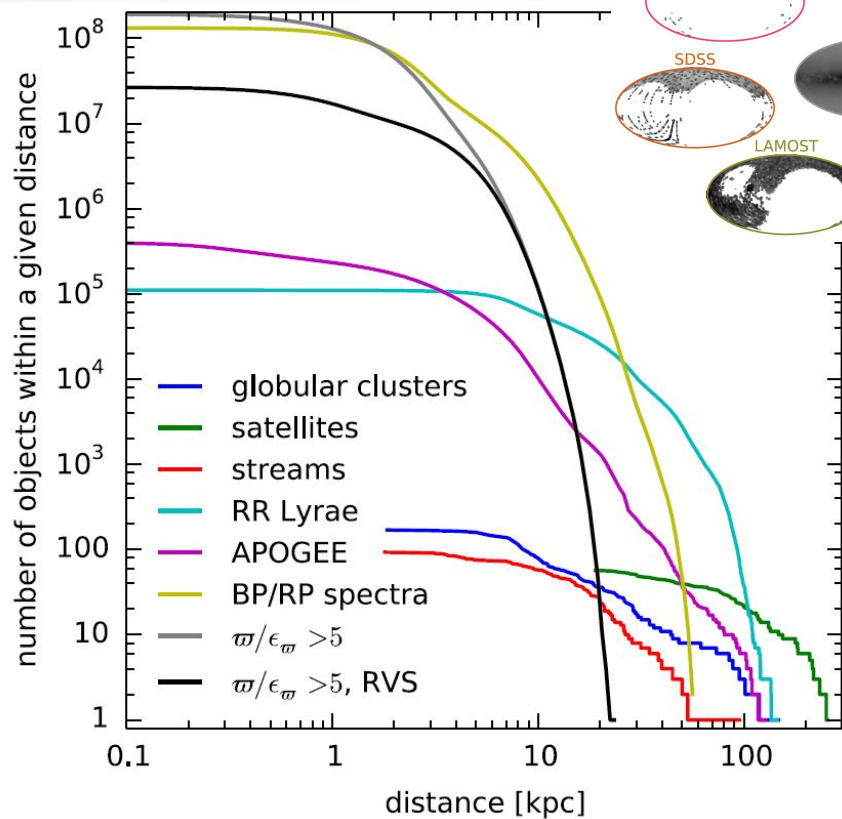
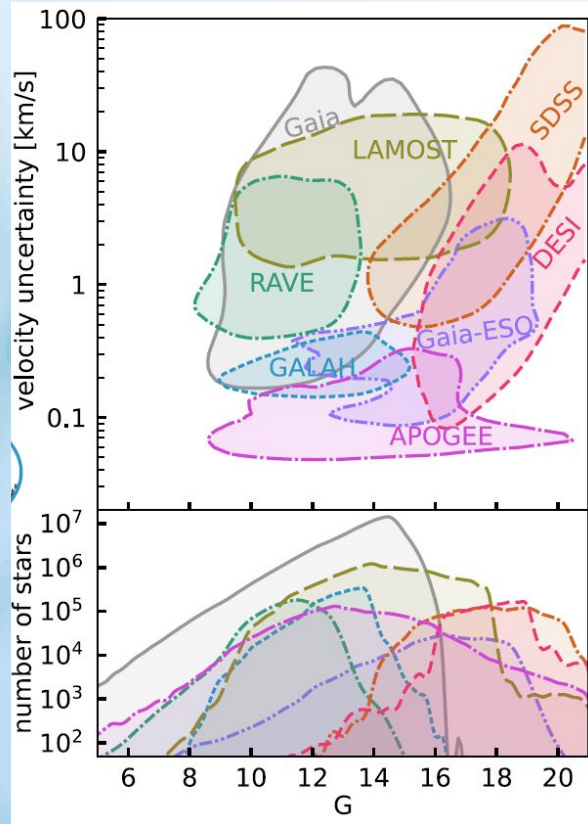
Макаров Данила Дмитриевич

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук
Макаров Дмитрий Игоревич

Актуальность темы исследования

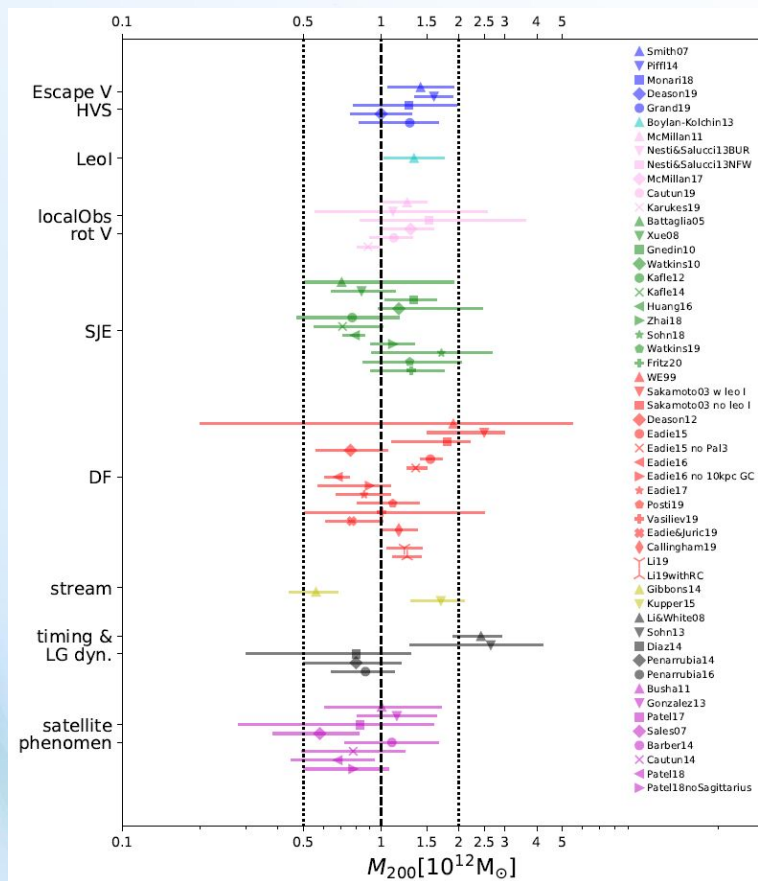


Актуальность темы исследования



number of stars

Актуальность темы исследования



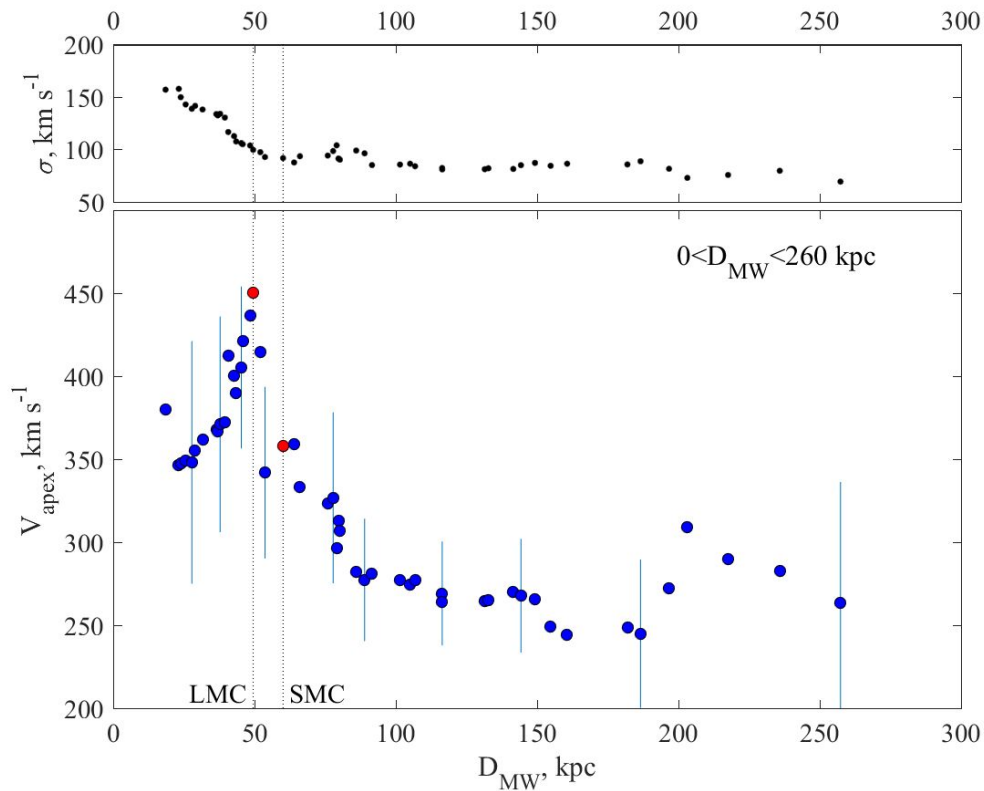
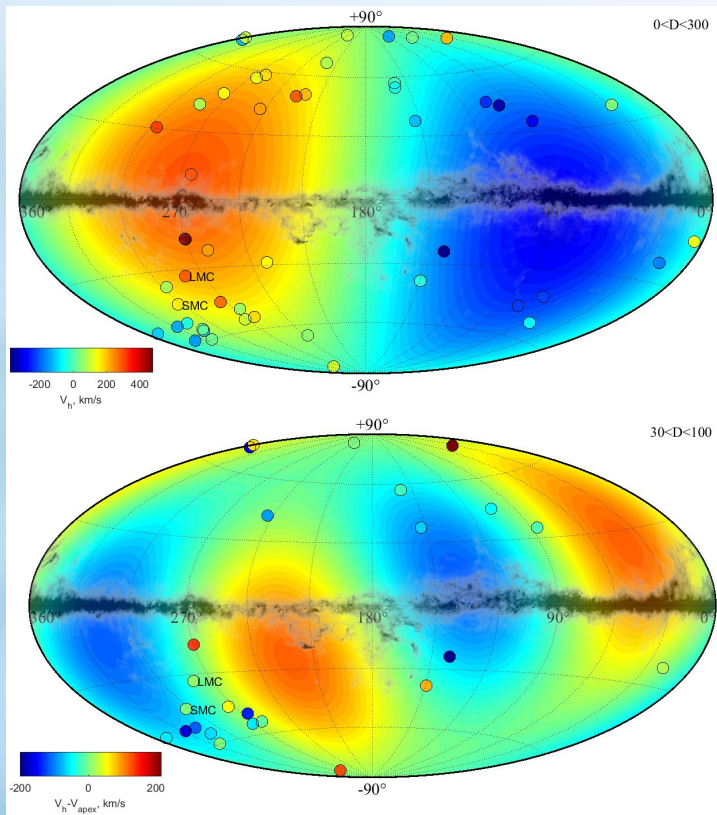
Основная задача диссертационного исследования

Основной задачей данной работы является изучение кинематики карликовых галактик Местной группы в объеме около 1 Мпк, оценки масс Млечного Пути, туманности Андромеды и Местной группы в целом. Внимание сконцентрировано на анализе лучевых скоростей. Несмотря гигантский прорыв в определении собственных движений звезд 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.

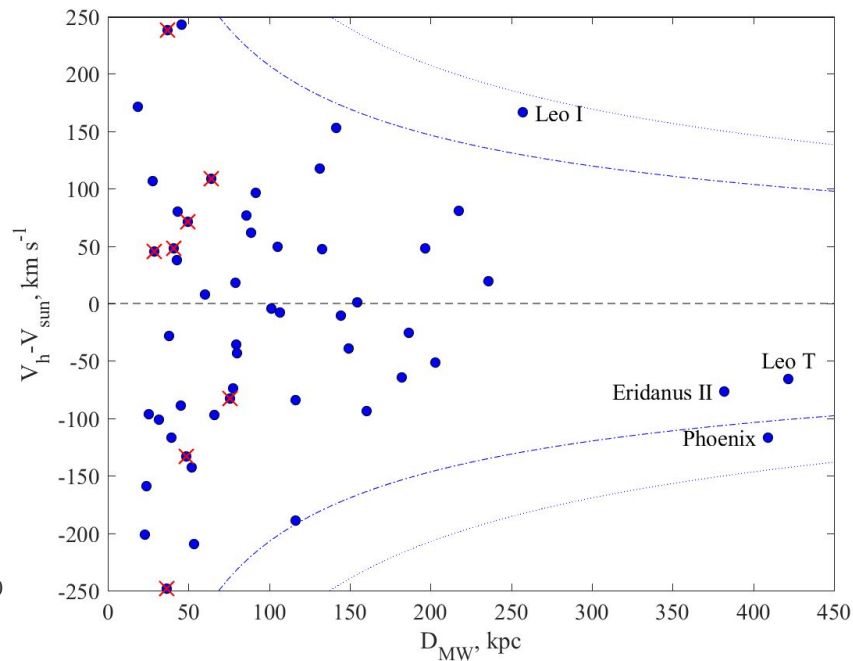
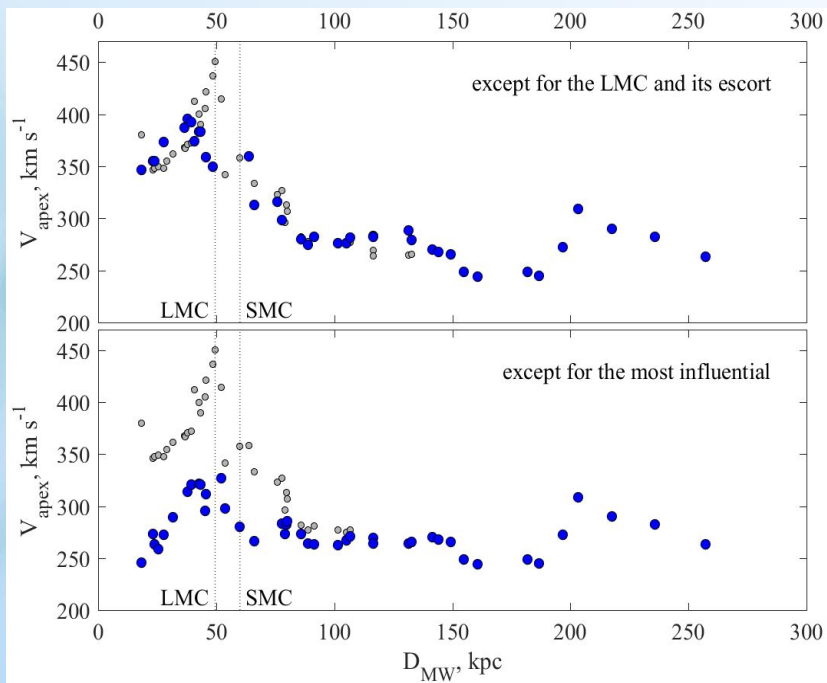
Структура и содержание диссертации

- Введение
- Глава 1. Влияние Большого Магелланова Облака на кинематику спутников Млечного Пути
- Глава 2. Оценка массы Млечного Пути и Туманности Андромеды
- Глава 3. Замороженные окраины: холодный Хаббловский поток и масса Местной группы
- Заключение

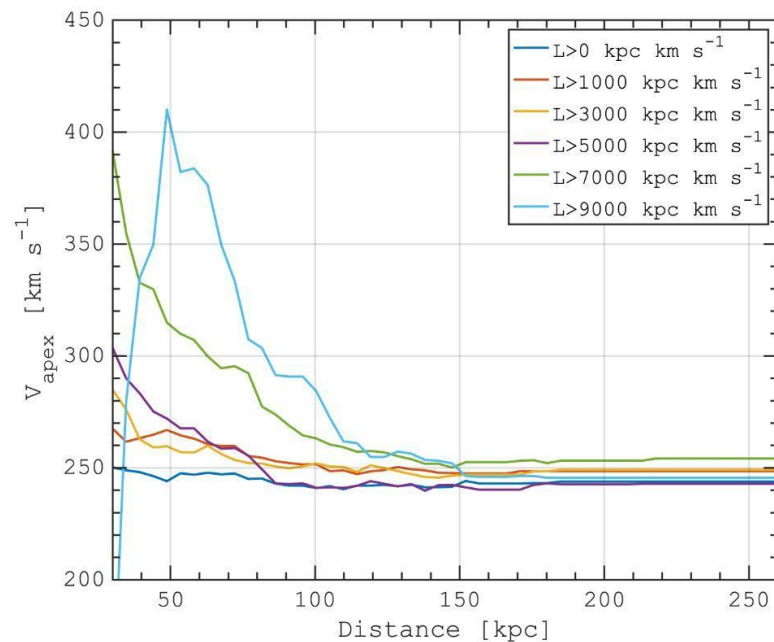
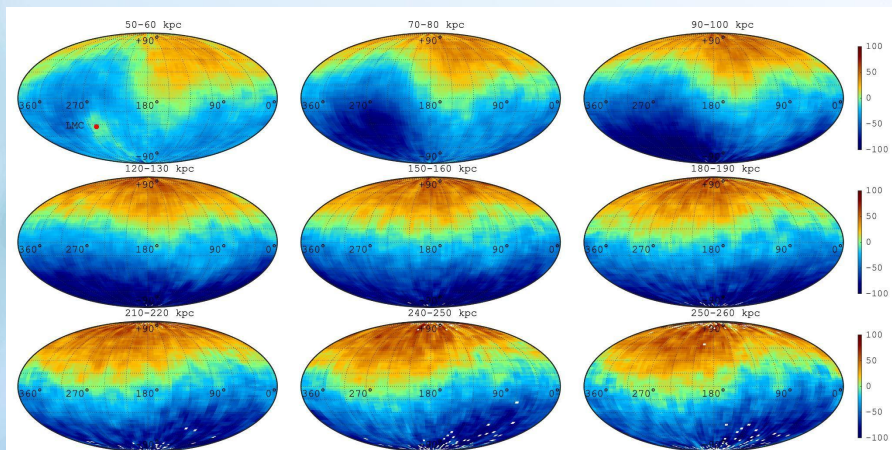
Глава 1. Бегущий апекс солнца



Глава 1. Исключение наибольших возмутителей



Глава 1. Влияние пролета массивного БМО на кинематику гало



Глава 2. Теорема вириала и метод проекционной массы

$$M_{\text{vir}} = \frac{3\pi}{2G} \frac{\langle v_{\text{los}}^2 \rangle}{\langle 1/r_p \rangle}$$

- **Смещенная** - среднее оценок M_{vir} для одной и той же группы не обязательно равно истинной массе M для конечного числа частиц
- **Неэффективная** - дисперсия оценок M_{vir} является большой
- **Несостоятельная** - в некоторых случаях M_{vir} не сходится к истинной массе M при $N \rightarrow \infty$

Bahcall & Tremaine (1981)

Projected mass estimator

$$GM_p = av_{\text{los}}^2 r_p$$

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

$$D[M_p] = \frac{1}{N} \left(\frac{128}{5\pi^2} - 1 \right) \langle M_p \rangle^2$$

Глава 2. Метод массы на луче зрения

$$GM_{\text{los}} = av_{\text{los}}^2 r$$

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

“Млечный Путь”

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

$$GM_{\text{los}} = \frac{2}{\langle e^2 \rangle} \langle v_r^2 r \rangle$$

$$GM_{\text{I}} = 4 \langle v_r^2 r \rangle$$

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

“Туманность Андромеды”

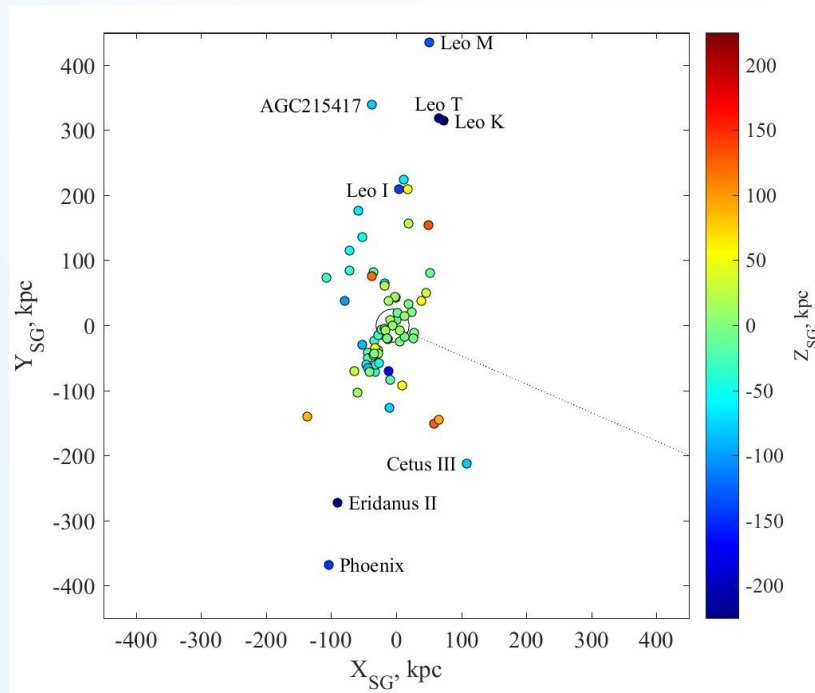
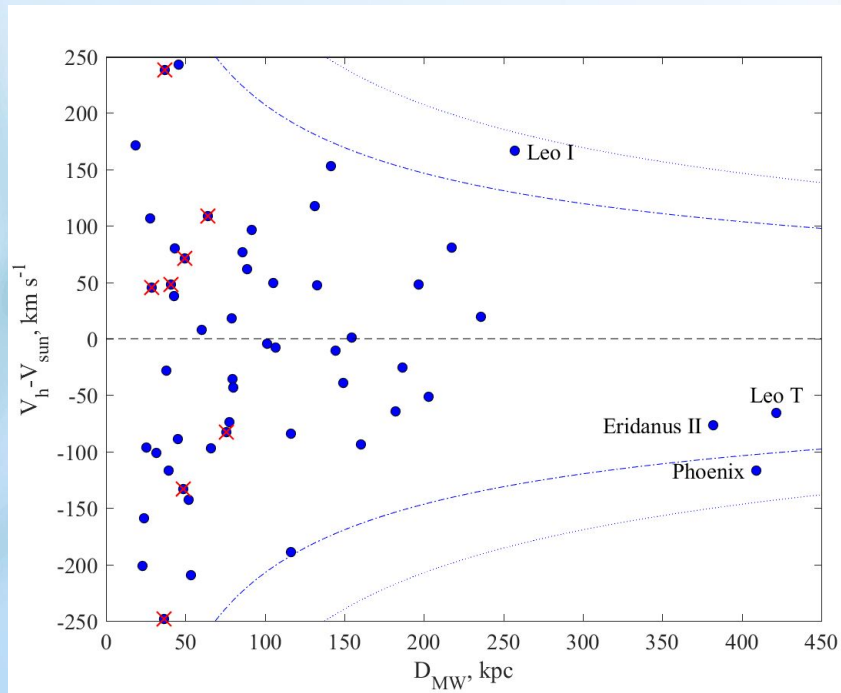
$$\begin{aligned} \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle &= \frac{4\pi A}{3} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r v_r \left(1 + \frac{v_\perp^2}{v_r^2} \right) dr \\ &= \frac{GM}{3\pi} \int_{1-e}^{1+e} \frac{1 - (x-1)^2}{\sqrt{e^2 - (x-1)^2}} dx \\ &= \frac{GM}{6} (2 - \langle e^2 \rangle). \end{aligned}$$

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

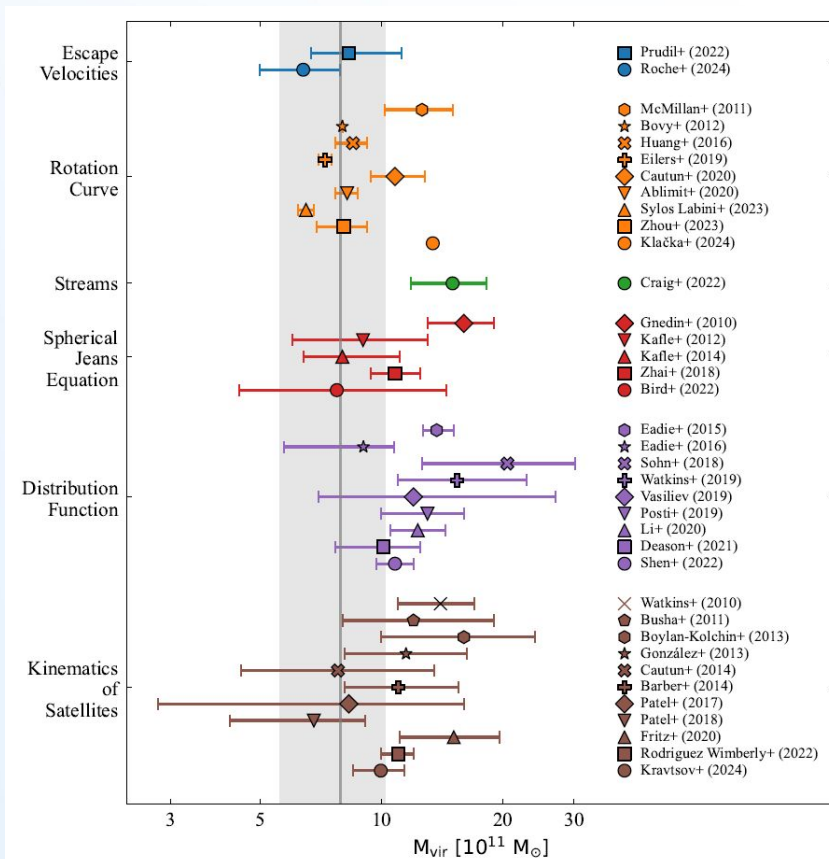
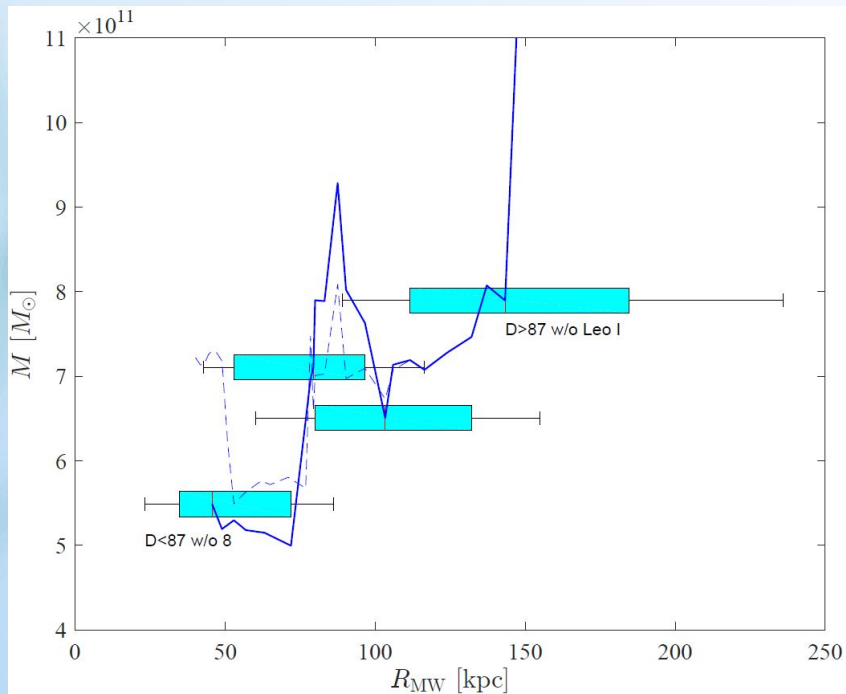
$$GM_{\text{I}} = 4 \langle v_{\text{los}}^2 r \rangle$$

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

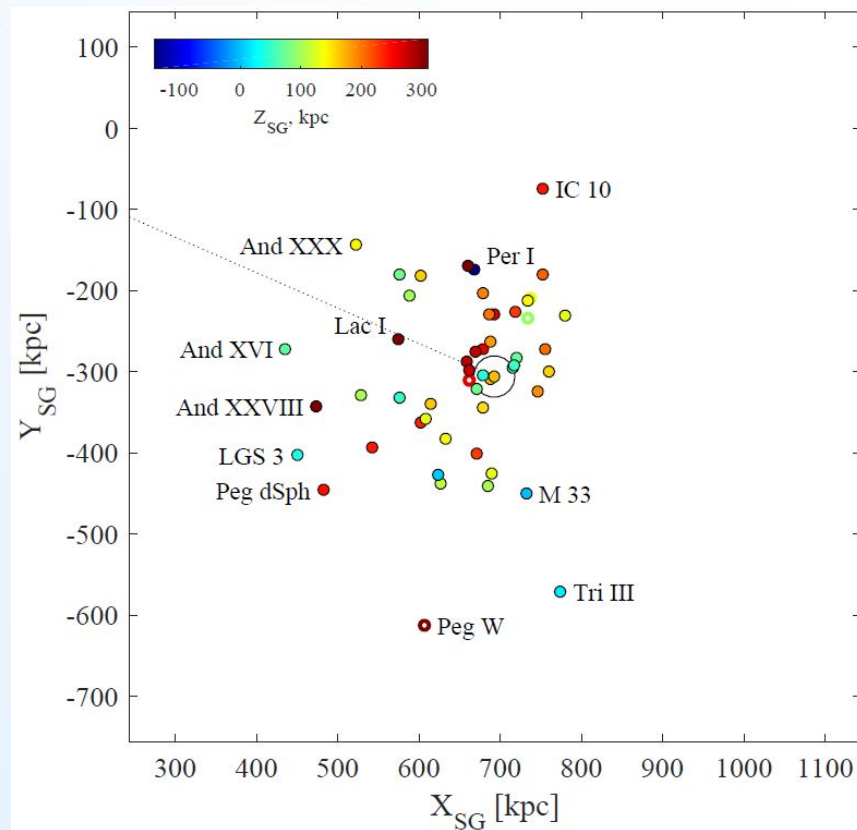
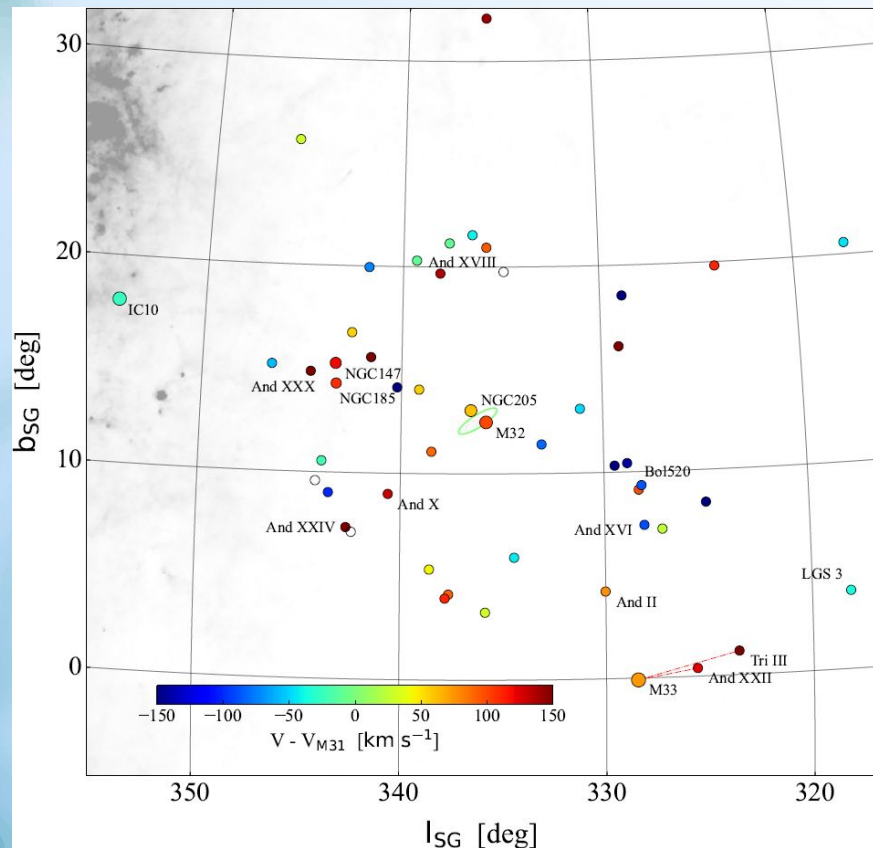
Глава 2. Распределение спутников Млечного Пути



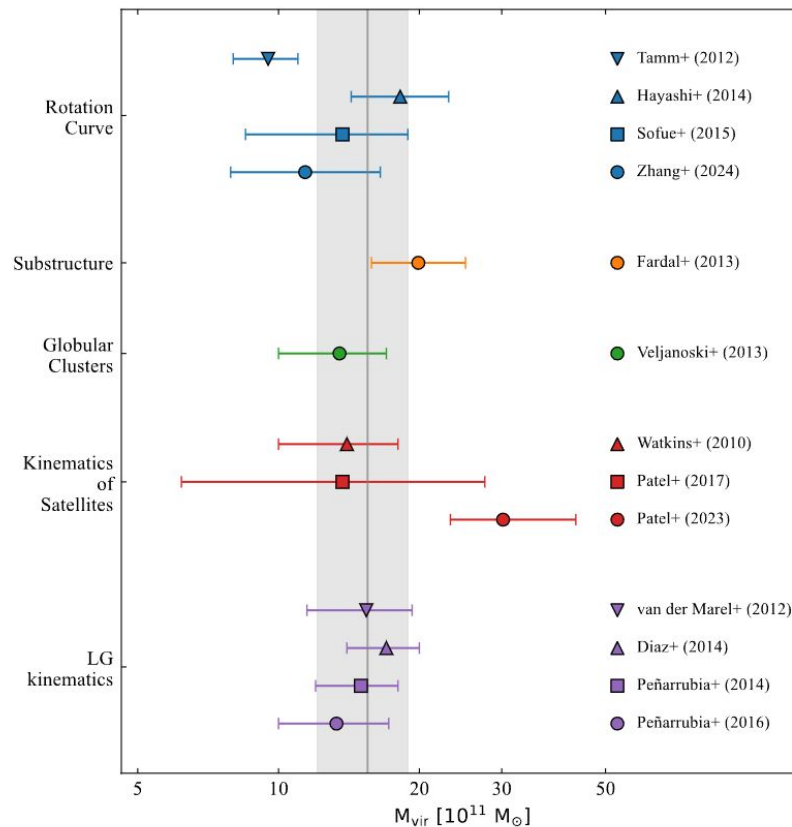
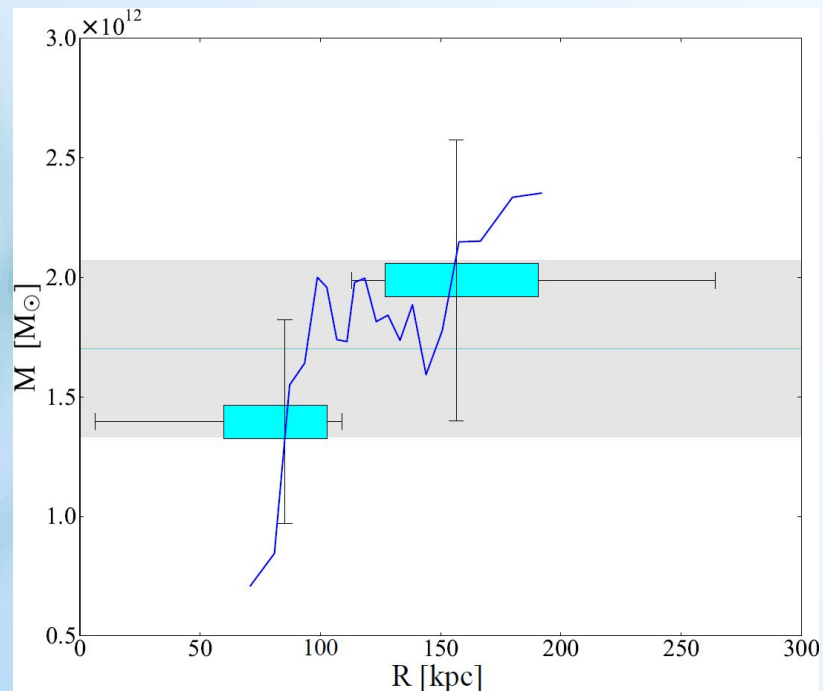
Глава 2. Оценка массы Млечного Пути



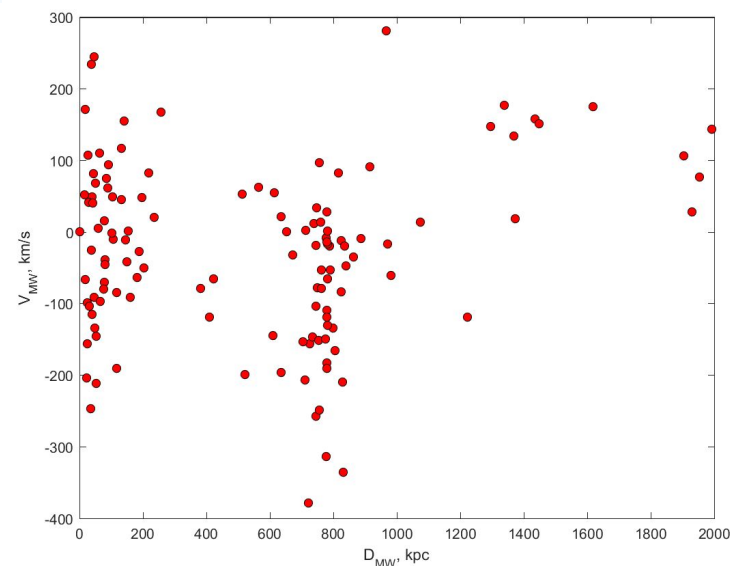
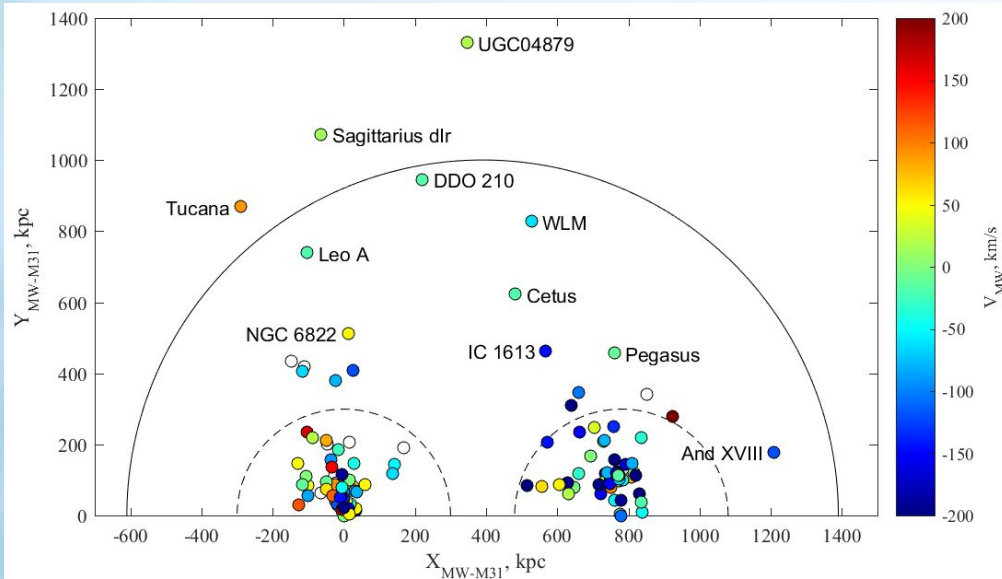
Глава 2. Распределение спутников Туманности Андромеды



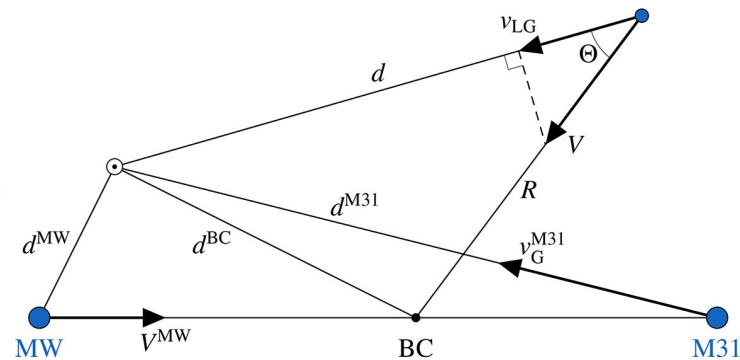
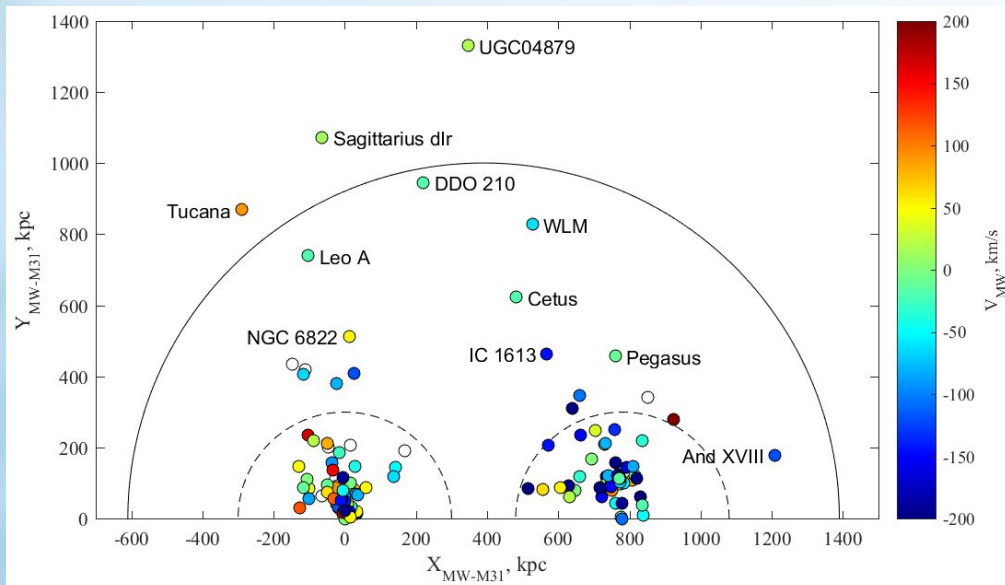
Глава 2. Оценка массы Туманности Андромеды



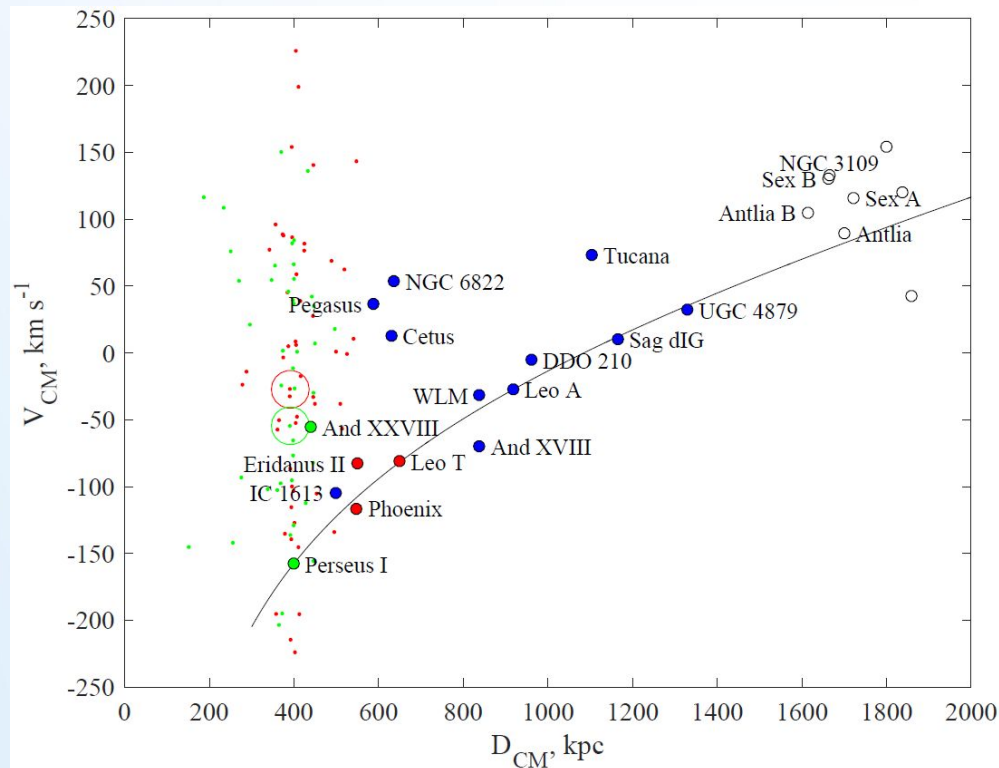
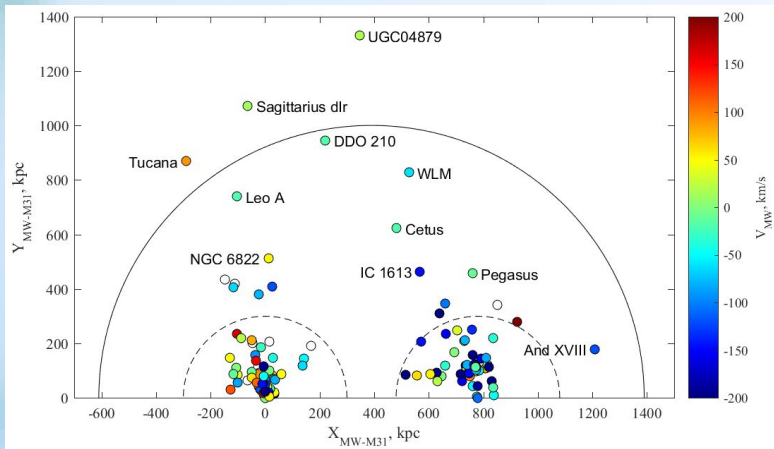
Глава 3. Гантелеобразная структура Местной группы и поток Хаббла



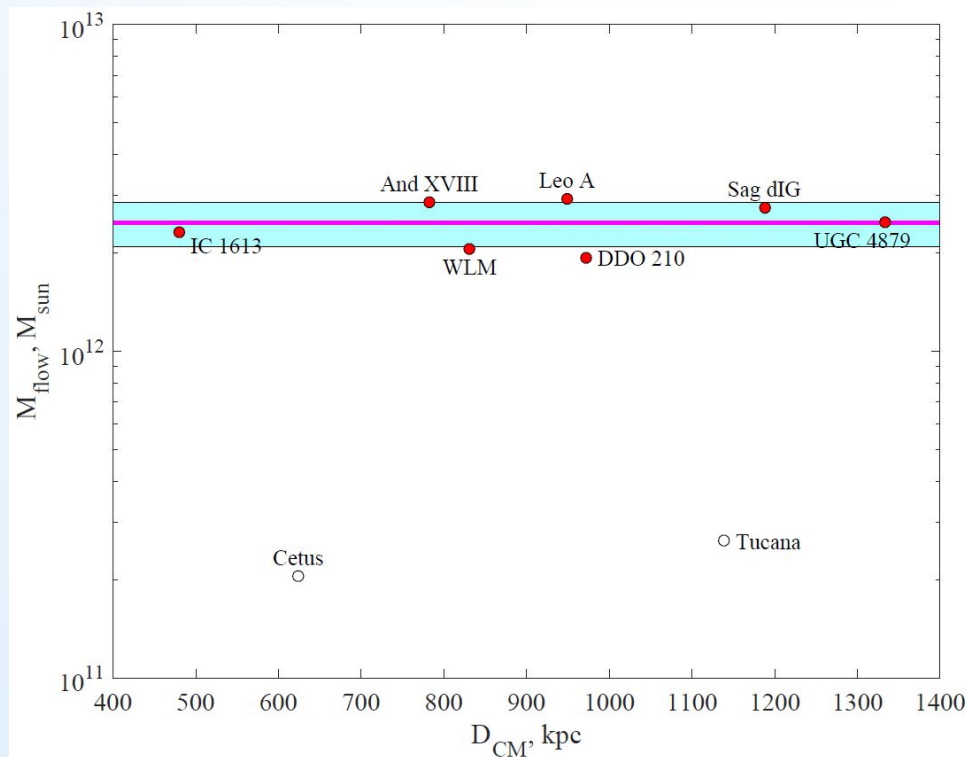
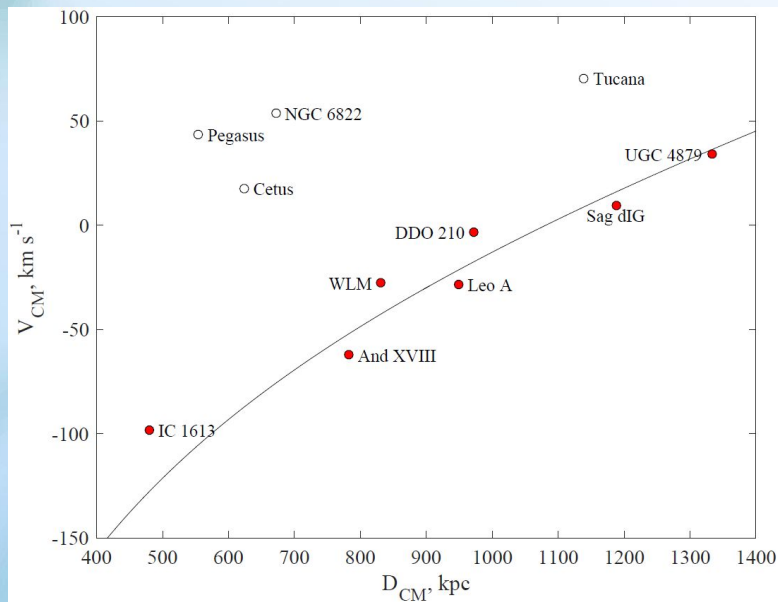
Глава 3. Модель поля скоростей на периферии Местной группы



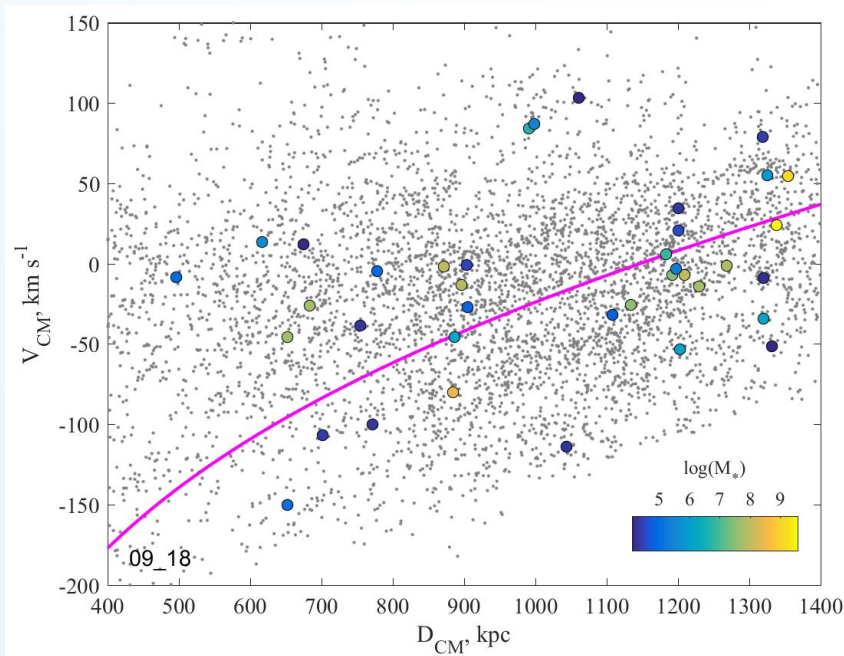
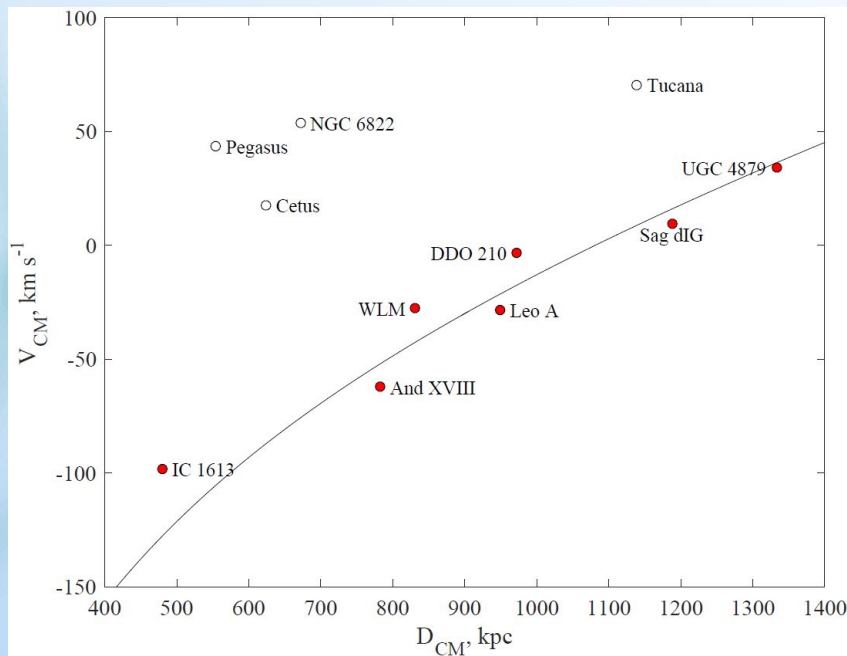
Глава 3. Хаббловский поток в Местной Группе



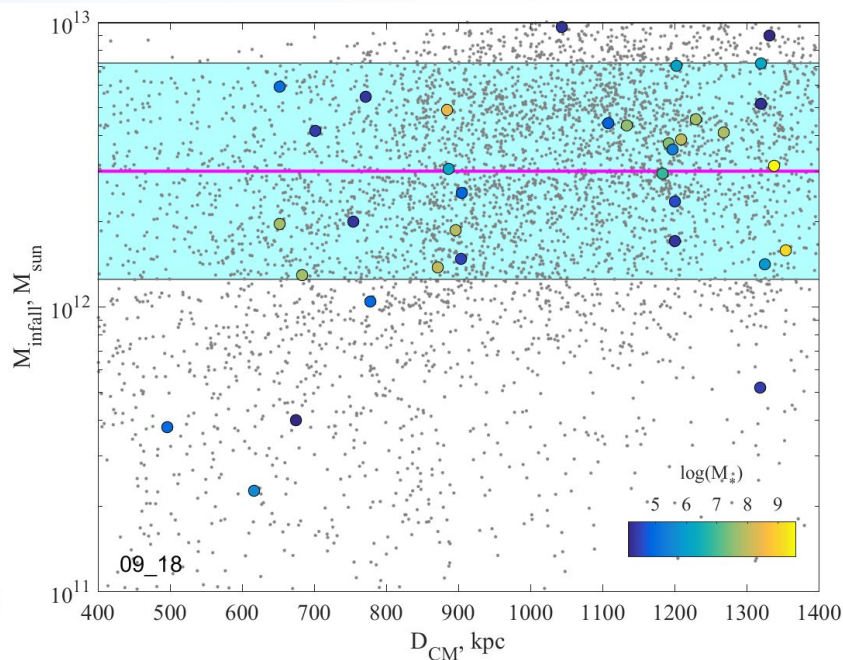
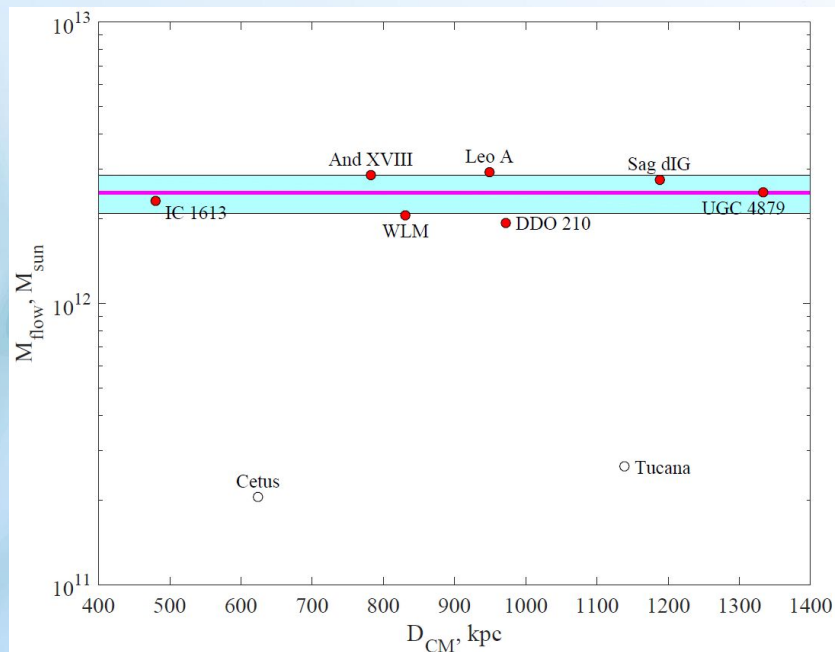
Глава 3. Хаббловский поток и масса Местной Группы



Глава 3. Сравнение с космологическим моделированием Hestia



Глава 3. Сравнение с космологическим моделированием Nestia



Глава 3. Сравнение с космологическим моделированием Nestia

sample		1+2	<1Mpc	lg<M>	lgMed	$\sigma(\lg M)$
09_18	all haloes	12.44	12.52	12.52	12.42	0.427
	with stars			12.52	12.48	0.379
17_11	all haloes	12.46	12.52	12.55	12.40	0.439
	with stars			12.67	12.46	0.554
37_11	all haloes	12.14	12.32	12.44	12.38	0.426
	with stars			12.37	12.36	0.296

Научная новизна

- Обнаружена аномалия поведения бегущего апекса Солнца относительно спутников нашей Галактики. Близкие спутники показывают неожиданно большую амплитуду около 230 км/с коллективного движения 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 (1981), разработан метод оценки массы близких групп галактик с учетом трехмерного распределения спутников вокруг центральной галактики. Получены оценки массы Млечного Пути и туманности Андромеда в пределах 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

- Составлена наиболее полная на данный момент выборка галактик Местной Группы и ближайших окрестностей с точными измерениями расстояний и скоростей.
- Разработан метод оценки массы внутри вириального радиуса с учётом трёхмерных расстояний спутников, что повышает точность и надёжность оценок по сравнению с классическими подходами.
- Выявлено, что падение галактик внутрь Местной Группы прослеживается до границ вириальных зон Млечного Пути и Андромеды, а движение хорошо описывается моделью Хаббловского потока с учётом Λ -члена.
- Оценена полная масса Местной Группы на расстояниях от 400 до 1400 кпк и сопоставлена с массами Млечного Пути и Андромеды.
- Показано, что современное космологическое моделирование адекватно описывает поле скоростей вокруг Местной Группы, но не воспроизводит столь «холодное» натекание галактик на центральные объекты.

Положения, выносимые на защиту

- Определение апекса Солнца $(l, b, V) = (-90 \pm 14^\circ, -10.0 \pm 6.4, 249 \pm 37 \text{ км/с})$ относительно внешних спутников Млечного Пути, расположенных далее 100 кпк, что находится в хорошем согласии с известным движением Солнца в Галактике.
- Открытие и объяснение аномальной скорости 230 км/с коллективного движения близких спутников, расположенных на расстояниях менее 100 кпк, относительно центра Галактики. Аномалия вызвана первым пролетом Большого Магелланова Облака массой $\sim 2 \times 10^{11} M_\odot$.
- 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.

Положения, выносимые на защиту

- Обнаружение факта, что движение большинства периферийных членов Местной Группы относительно барицентра системы характеризуется чрезвычайно малой дисперсией скоростей по лучу зрения 15 км/с и прослеживается вплоть до границ вириальных зон Млечного Пути и Туманности Андромеды.
- Определение полной массы Местной Группы галактик $M_{LG} = (2.47 \pm 0.15) \times 10^{12} M_{\odot}$, на основе модели Хаббловского потока в стандартной Λ 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.

Апробация результатов

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

Апробация результатов

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”, 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

Апробация результатов

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

Апробация результатов

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.

Апробация результатов

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

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

Публикации по теме диссертации

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. **Makarov D. D.**, Makarov D. I., Makarova L., Kozyrev K. “The mass of the Milky Way based on the kinematics of satellites”, 2024, proceedings of “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
6. Kozyrev K., Makarov D. I., **Makarov D. D.** “Mass of the Andromeda Galaxy on a scale of up to 300 kpc”, 2024, proceedings of “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

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 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.

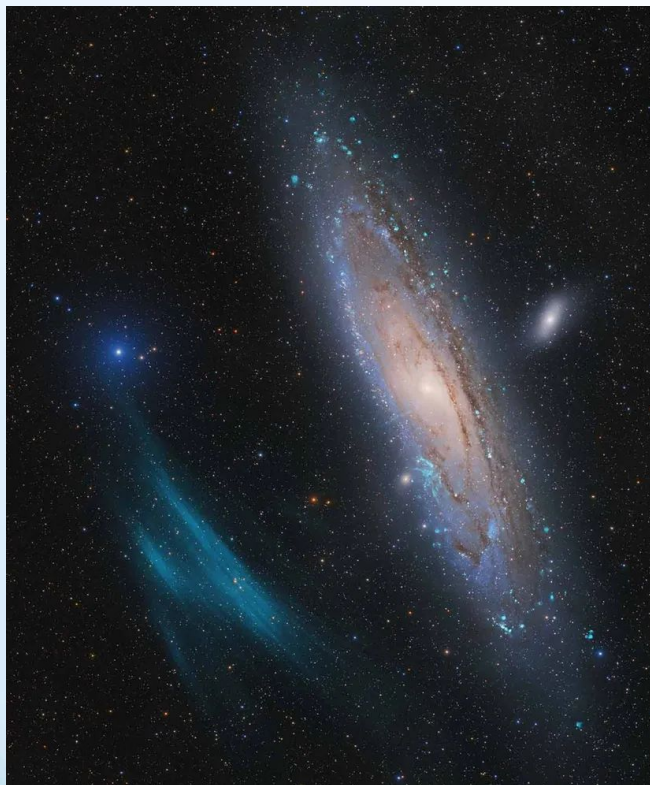
Развитие метода проекционных масс для случая известных расстояний спутников проведено автором. Масса нашей Галактики оценена автором. Масса Туманности Андромеды измерена К.А. Козыревым совместно с автором диссертации.

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

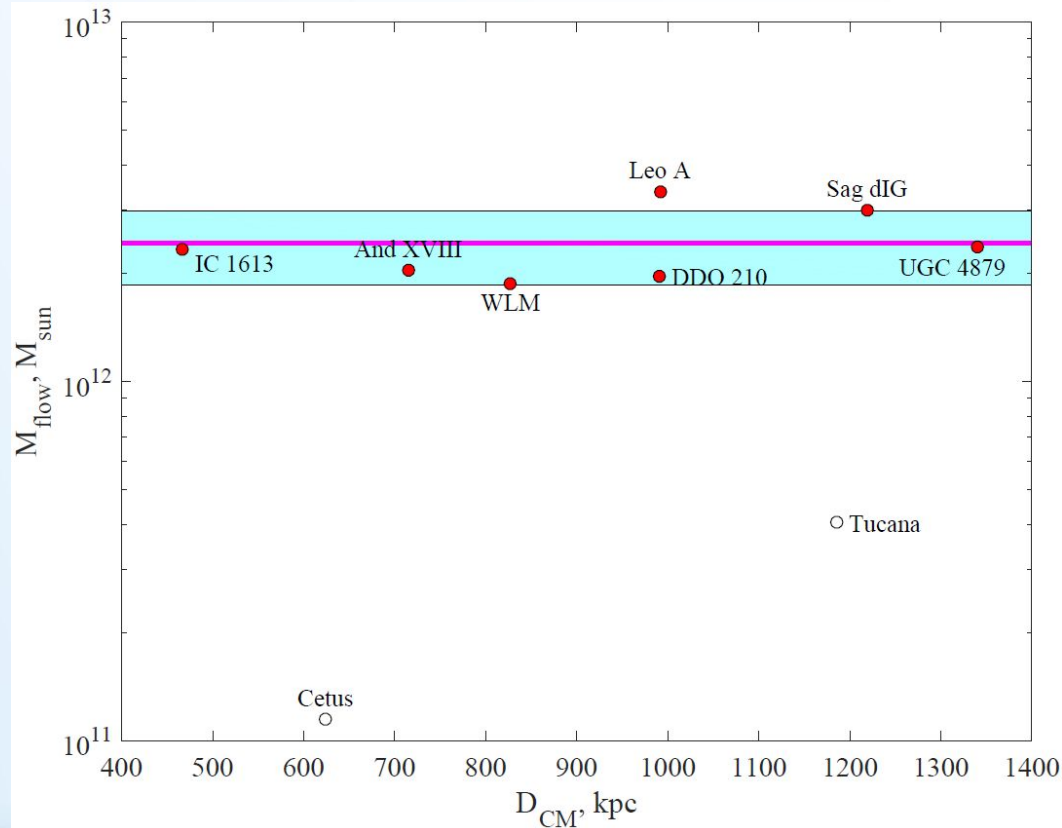
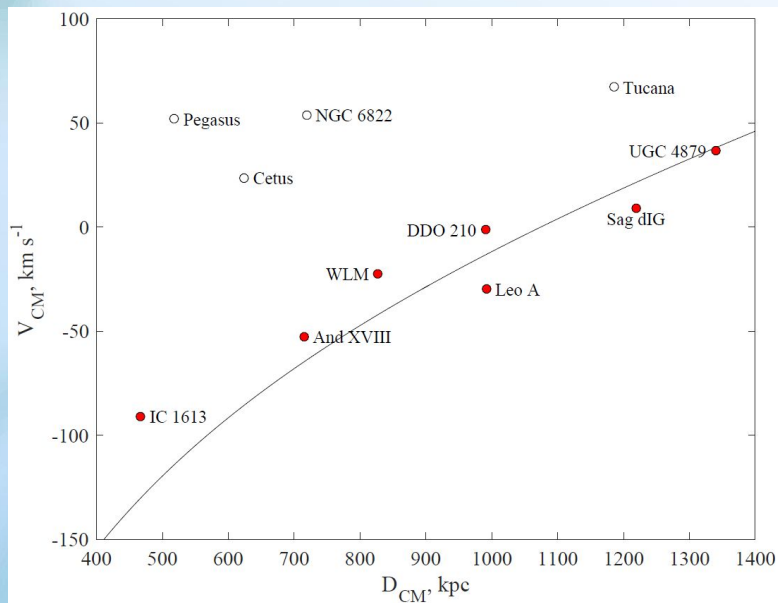
Данные космологического гидродинамического моделирования NESTIA предоставлены N. Libeskind. Анализ этих данных проводился автором совместно с К.А. Козыревым.

Обсуждение всех результатов велось наравне с соавторами.

Спасибо за внимание!



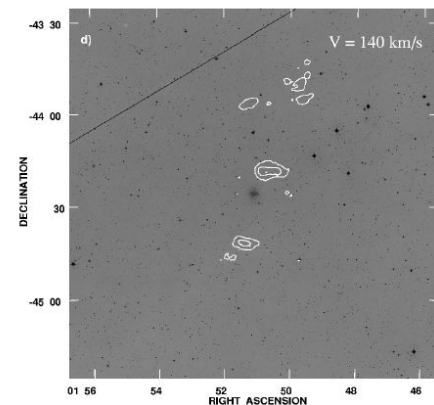
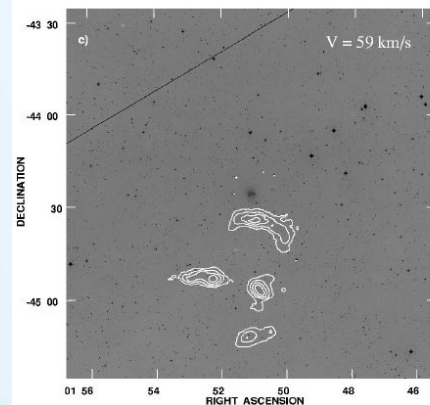
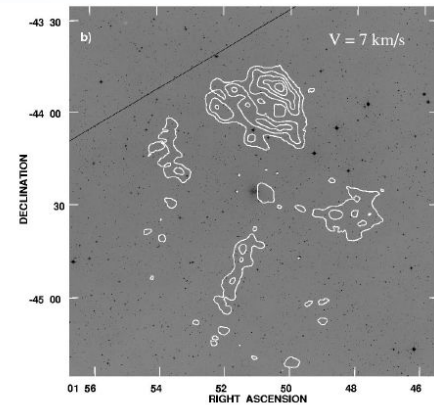
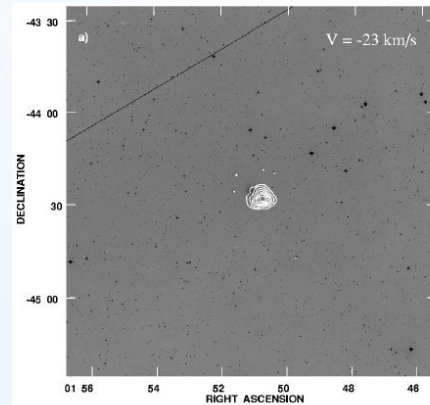
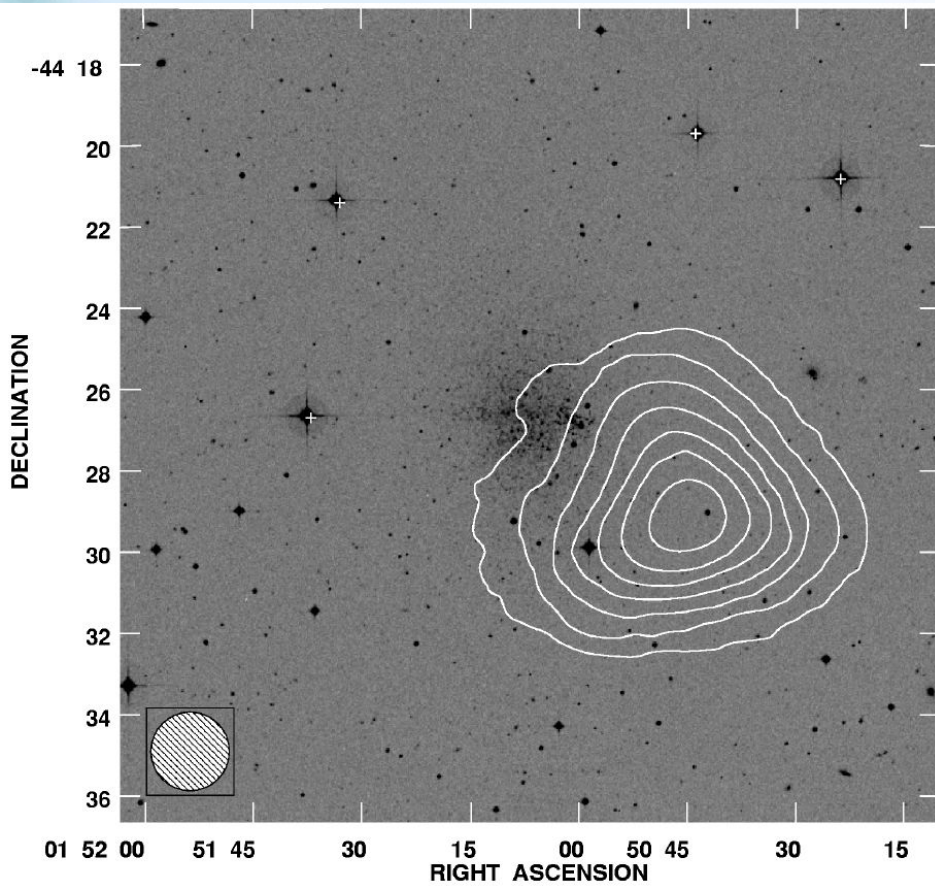
Хаббловский поток и масс Местной Группы: вид из барицентра



Актуальность темы исследования

Актуальность работы обусловлена тем, что природа темной материи и её распределение в Местной группе галактик остаются неясными, несмотря на ключевую роль этих компонентов во Вселенной. Изучение кинематики и массы Местной группы, включающей Млечный Путь и Андромеду, позволяет глубже понять гравитационные взаимодействия, эволюцию галактик и проверить современные космологические модели, такие как Λ CDM. При этом существующие расхождения в оценках массы и проблемы с распределением карликовых спутников требуют дальнейших исследований и уточнения моделей. В современных условиях развития астрономических наблюдений и компьютерного моделирования появляется возможность получения более точных данных о динамике Местной группы, что повышает значимость данного исследования для фундаментальной астрофизики и космологии.

Phoenix



Свойства галактик

Млечный Путь

$$\begin{aligned} B_{\text{abs}} &= -20.7 & L_B &= 2.86 \times 10^{10} L_{\odot} \\ V_{\text{abs}} &= -21.4 & L_V &= 3.05 \times 10^{10} L_{\odot} \\ M_{\star} &= 5.04 \times 10^{10} M_{\odot} \\ M_{\text{HI+H2}} &= 1.2 \times 10^{10} M_{\odot} \end{aligned}$$

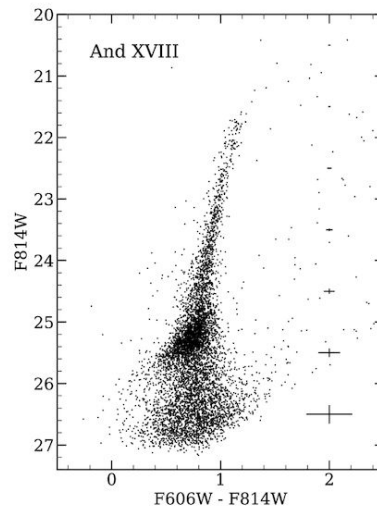
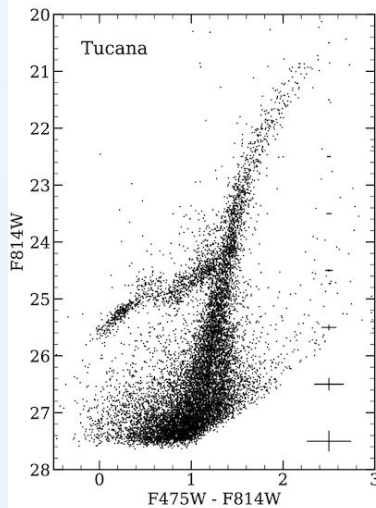
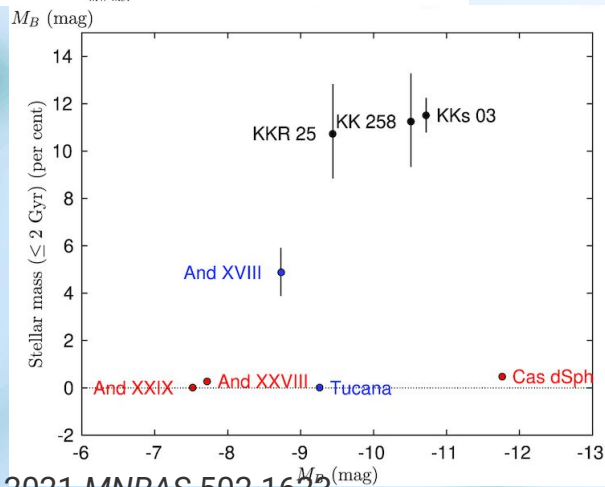
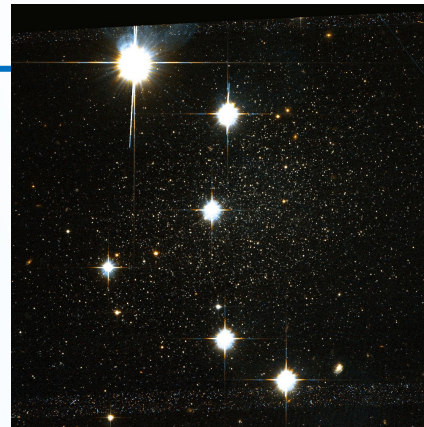
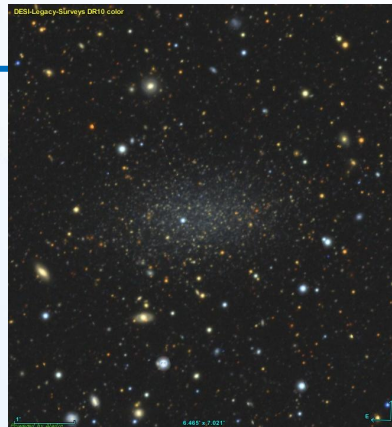
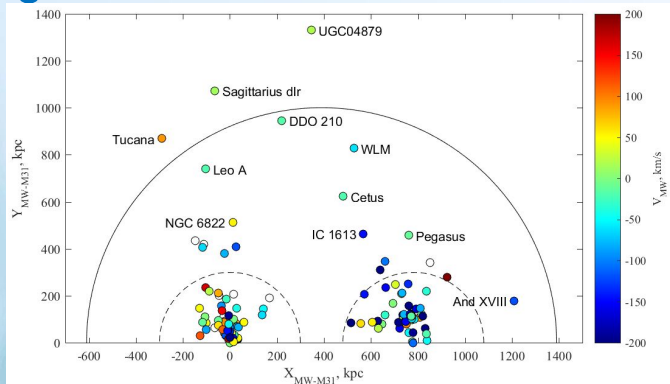
$$\begin{aligned} M/L_B &= 27.6 \\ M/L_V &= 25.9 \\ M/M_{\star} &= 15.7 \\ M/M_{\star+\text{HI+H2}} &= 12.7 \end{aligned}$$

Туманность Андромеды

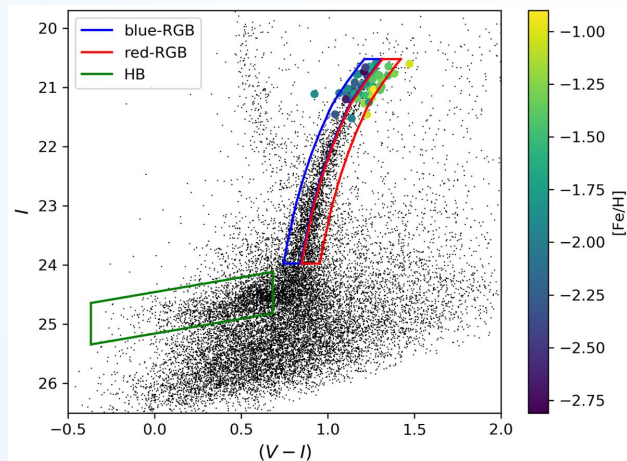
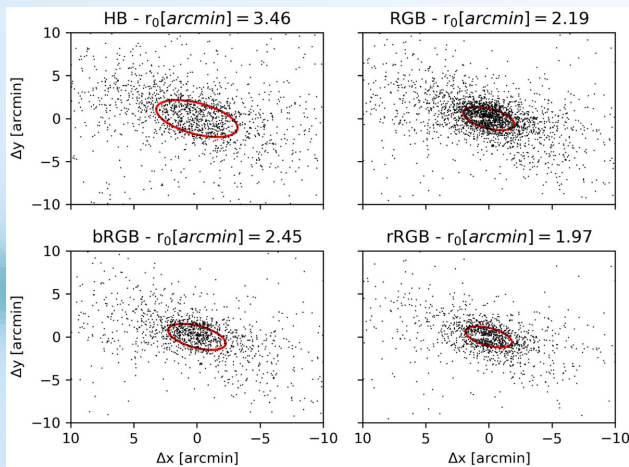
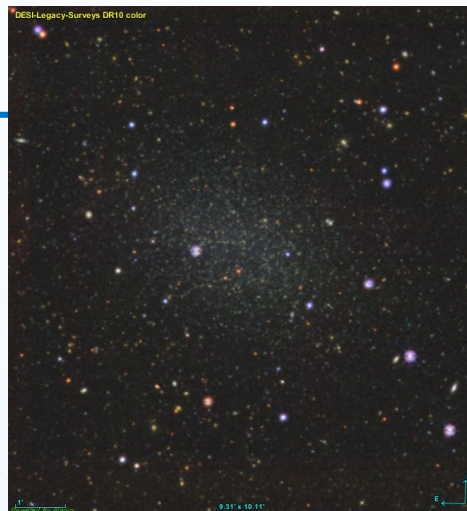
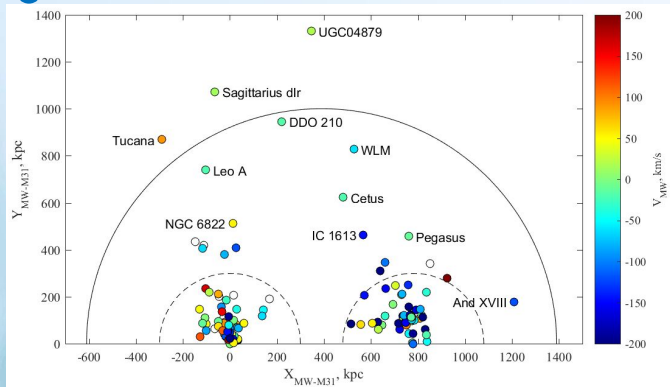
$$\begin{aligned} B_{\text{abs}} &= -21.4 & L_B &= 5.44 \times 10^{10} L_{\odot} \\ V_{\text{abs}} &= -22.2 & L_V &= 6.37 \times 10^{10} L_{\odot} \\ M_{\star} &= 10.3 \times 10^{10} M_{\odot} \\ M_{\text{HI+H2}} &= 0.77 \times 10^{10} M_{\odot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M/L_B &= 28.5 \\ M/L_V &= 24.3 \\ M/M_{\star} &= 15.0 \\ M/M_{\star+\text{HI+H2}} &= 14.0 \end{aligned}$$

Tucana



Cetus



NGC 6822

