

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Уткин Никита Денисович
Кинематика и динамика галактических подсистем

1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель — *Расторгуев Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор*

Официальные оппоненты — *Кондратьев Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова*

Корчагин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Института физики Южного федерального университета

Никифоров Игорь Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: nikitaoutkin@bk.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией об организации защиты и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/503744279/>

Автореферат разослан «11» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

О.М. Белова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Давно известно, что наша Галактика состоит из нескольких отличающихся друг от друга структурных компонентов [1]. Не только различия в физической природе населяющих их объектов, но и их движения довольно интересны для исследования и могут многое сказать об особенностях структурных компонент Галактики, и даже об их образовании. Детальное изучение её подсистем необходимо для решения важных задач не только звёздной, но и внегалактической астрономии.

Известно, что в каждой подсистеме можно выделить систематические движения и остаточные, носящие случайный характер [2]. Для описания систематических и остаточных движений используются модели поля скоростей, содержащие наборы параметров. Стоит подобрать такие значения этих параметров, чтобы модельные скорости наилучшим образом воспроизводили наблюдаемое поле скоростей разных объектов. В данной работе, как и в ряде ранее опубликованных, эта задача решается методом статистических параллаксов, применение которого основано на методе максимума правдоподобия [2].

Полученные значения параметров модели поля скоростей необходимы для решения большого набора задач исследования структуры и динамики Галактики: например, построения кривой вращения диска, оценки его поверхностной плотности и размеров, уточнения свойств спиральных волн плотности, распространяющихся по диску. давно известно, что большую часть массы Галактики составляет невидимое тёмное гало, проявляющее себя только своей гравитацией, его вклад в гравитационное поле на периферии Галактики является доминирующим. Кроме тёмного гало в сферической составляющей Млечного пути имеются компоненты, состоящие из обычного, наблюдаемого вещества – например, барионное гало. По результатам наблюдений можно определить параметры поля скоростей объектов барионного гало. Тёмное гало в основном

управляет движением объектов барионного гало – тем самым, определение параметров этого движения позволит уточнить параметры тёмного гало, может внести некоторый вклад в исследование тёмной материи нашей Галактики. Также давно известно, что гало не является однородной системой – разные его популяции отличаются друг от друга и по кинематике, и по внутренним свойствам объектов (например, химическому составу), а также по происхождению [3]. Установленные различия в кинематике объектов могут указать на различия в их происхождении, способствовать построению гипотез формирования гало Галактики.

Движение объектов Галактики управляется взаимодействием между огромным количеством звёзд, облаков газа, под влиянием тёмной материи, поэтому при изучении этого движения важно коснуться не только его описания, но и его объяснения, которым занимается звёздная динамика. Одной из проблем звёздной динамики, ждущей своего решения, является обращение в бесконечность коэффициентов диффузии – величин, описывающих результирующий эффект изменения скорости пробной звезды от большого количества сближений с членами звёздной системы. В прошлом обычно применялся довольно искусственный метод решения этой проблемы, паллиативный и в каком-то смысле небесспорный.

В настоящее время исследование кинематики населения Галактики не является завершённым, и вряд ли оно будет завершённым в ближайшие десятилетия: данные пока имеются далеко не для всех звёзд и объектов других типов, населяющие подсистемы Галактики. Поэтому это направление работ имеет большие перспективы, особенно ввиду недавнего выхода 3-го выпуска данных проекта Gaia и ожидаемого появления последующих релизов, в которых будут более точные и многочисленные данные о звёздах. Поэтому, несмотря на свою традиционность и классический характер, изучение кинематики Галактики остаётся актуальным и востребованным.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы является изучение кинематики некоторых галактических подсистем – тонкого диска и гало Галактики, исследование на основе кинематических данных неоднородности гало, а также решение одной из важных проблем звёздной динамики – устранение классической расходимости, возникающей при вычислении коэффициентов диффузии, характеризующих суммарный эффект звёздных сближений.

Поставленные цели предполагают решение следующих задач:

- Создание нового алгоритма изучения кинематики, впервые реализующего наиболее полную версию метода статистических параллаксов для поля пространственных скоростей диска, включающего дифференциальное вращение и гравитационные возмущения от спиральной волны плотности.
- Анализ кинематики тонкого диска – определение параметров поля пространственных скоростей выборки галактических мазеров методом статистических параллаксов, построение кривой вращения тонкого диска и исследование его спирального узора.
- Определение собственных движений объектов гало методами абсолютизации на основе данных о положениях объектов на как можно более широком интервале эпох наблюдений и сравнение с имеющимися данными из Gaia DR2.
- Анализ кинематики гало – определение параметров поля скоростей выборок из переменных звёзд типа RR Лиры и звёзд голубой горизонтальной ветви, в частности, попытка определения расстояния от Солнца до центра Галактики по данным о звёздах голубой горизонтальной ветви; построение графиков зависимостей параметров

поля скоростей от расстояния до центра Галактики, выделение внутреннего и внешнего гало.

- Численный расчёт коэффициентов диффузии в пространстве скоростей для однородной статической звёздной системы с учётом кратности далёких сближений на основе статистического подхода Т.А. Агеяна и попытка устранения логарифмической расходимости.
- Численный расчёт коэффициентов диффузии в пространстве скоростей для однородной статической звёздной системы с учётом кратности далёких сближений на основе статистического подхода Т.А. Агеяна и попытка устранения логарифмической расходимости.

Научная новизна

- Впервые реализована наиболее полная версия метода статистических параллаксов для модели поля пространственных скоростей, включающей как дифференциальное вращение диска, так и спиральные возмущения от волн плотности, позволяющая также уточнять нуль-пункт шкалы используемых расстояний. С помощью этого алгоритма, учитывающего также результаты звёздной динамики (связь компонентов тензора дисперсии скоростей), детально изучена кинематика галактических мазеров.
- Для анализа кинематики диска использована крупнейшая на момент выполнения работы выборка галактических мазеров, для которой впервые методом статистических параллаксов получен полный набор кинематических параметров, включая параметры спирального узора, и построена кривая вращения диска Галактики.

- Получено простое аналитическое выражение радиальной шкалы диска на основе данных о локальной кинематике населяющих его объектов с использованием уравнений звёздной гидродинамики и сделана оценка радиальной шкалы диска.
- Впервые получена кинематическая оценка расстояния от Солнца до центра Галактики по выборке звёзд поля, принадлежащих сферической составляющей, и проанализировано радиальное изменение компонентов дисперсии скоростей и параметра анизотропии скоростей.
- Оригинальным методом устранена логарифмическая расхожимость, возникающая при вычислении коэффициентов диффузии на основе метода Т.А. Агеяна учёта кратности звёздных сближений.

Научная и практическая значимость

В ходе выполнения данной работы были созданы или модифицированы и отлажены алгоритмы определения параметров поля скоростей популяций разных подсистем Галактики на основе наблюдательных данных; в частности, на основе абсолютизированных собственных движений объектов, вычисленных с использованием их положений во всех имеющихся астрометрических и астрофизических каталогах на интервале порядка 60-70 лет. Эти методы использованы и будут использоваться для детального изучения кинематики галактических подсистем.

Приведённые в данной работе результаты (значения параметров поля скоростей популяций объектов, кривая вращения диска Галактики, графики изменения параметров поля скоростей с расстоянием до центра Галактики для объектов гало) получены на основе наблюдательного материала, собранного в рамках «всеобъемлющих» обзоров, и представляют научную ценность для решения смежных задач исследования Млечного Пути и подобных ему галактик.

Методология и методы исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы зарубежных и российских авторов, посвящённые анализу кинематики структурных компонент Галактики, а также изучению процессов релаксации в звёздных системах.

Для решения поставленных задач были использованы общенаучные (анализ, формализация, моделирование, индукция, дедукция) и специальные (анализ данных «всенебесных» обзоров, параметризация, программирование в средах Matlab и Python, программирование в среде символьных вычислений Wolfram Mathematica для расчётов коэффициентов диффузии, методы математической статистики, в частности, методы максимального правдоподобия) методы. Ряд методов был реализован в виде программного кода на языках Matlab, Python и Wolfram.

Положения, выносимые на защиту

1. Впервые реализованная наиболее полная версия метода статистических параллаксов, применяемая к анализу поля пространственных скоростей, включающему дифференциальное вращение диска Галактики и возмущения от спиральной волны плотности, позволяет определить набор кинематических параметров диска и уточнить нуль-пункт шкалы расстояний используемых объектов.
2. Наилучшее согласие кинематической модели популяции 131 мазерного источника в областях звездообразования с наблюдениями достигается в предположении постоянства радиальной дисперсии скоростей и связи горизонтальных осей эллипсоида скоростей через зависящие от галактоцентрического расстояния значения угловой скорости и эпициклической частоты (теорема Линдблада). Кривая вращения выборки мазеров, построенная на интервале расстояний от 4 до 15 кпк, оказалась «плоской», полученные значения параметров апекса Солнца и

- 4-рукавного спирального узора, включая амплитуды спиральных возмущений скорости, а также кинематическая оценка расстояния от Солнца до центра Галактики согласуются с результатами других исследований.
3. Алгоритм определения абсолютных собственных движений объектов гало по данным об их положениях во «все небесных» каталогах на интервале эпох, достигающем 70 лет, позволяет определить их собственные движения с точностью около 1 мсд/год в хорошем согласии с появившимися позднее данными каталога Gaia DR2 и успешно использовать их для изучения кинематики гало.
 4. Переменные звёзды типа RR Лиры, в отличие от голубых звёзд горизонтальной ветви (ВНВ) демонстрируют кинематическое деление на объекты внутреннего и внешнего гало по профилю дисперсии скоростей и величине общей скорости вращения, с границей между ними на расстояниях около 10-15 кпк. Независимая кинематическая оценка расстояния от Солнца до центра Галактики, полученная методом статистических параллаксов в применении к выборке звёзд ВНВ, согласуется с результатами исследования объектов диска.
 5. Учёт кратности звёздных сближений в однородной статической звёздной системе с помощью рассчитанного Т.А. Агеяном множителя не приводит к логарифмической расходимости при вычислении коэффициентов диффузии в пространстве скоростей. Эффективное «экранирование» звёздных сближений происходит уже на 2-3 средних межзвёздных расстояниях.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертации обосновывается использованием современных астрометрических и астрофизических данных, полученных в рамках «все небесных» обзоров, адекватностью использования математических и

статистических методов анализа данных (в частности, метода максимального правдоподобия), использованием ряда стандартных пакетов статистического анализа (например, пакета оптимизации), а также успешным сравнением результатов диссертации с результатами работ других исследователей.

Используемый в данной работе алгоритм определения параметров поля скоростей имеет надёжную теоретическую основу [2] и был неоднократно использован в исследованиях по данной тематике. Алгоритмы абсолютизации собственных движений также были использованы в других исследованиях и проверены здесь.

О достоверности результатов исследования также свидетельствуют публикации автора в рецензируемых астрономических журналах и их апробация на всероссийских конференциях.

Апробация результатов

Всероссийские конференции:

1. Современная звёздная астрономия-2016, КГО ГАИШ МГУ, Россия, 8-10 июня 2016 г., *Кратность звездных сближений и классические расходимости* (устный)
2. Вторая астрометрическая конференция-школа «Современная астрометрия», ГАИШ МГУ, Россия, 23-25 октября 2017 г., *Кинематика RR Лирид гало Галактики* (устный)
3. XIII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество» и приуроченная к нему Научная конференция «Астрономия - 2018», ГАИШ МГУ, Россия, 22-26 октября 2018 г., *Кинематика и динамика гало Галактики на основе данных о звёздах горизонтальной ветви* (устный)
4. Третья астрометрическая конференция-школа «Астрометрия вчера, сегодня, завтра» Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, ГАИШ им

- П.К.Штернберга, Россия, 14-16 октября 2019 г., *Уточнение собственных движений и кинематика сверхвысокоскоростных звёзд* (устный)
5. УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2020: Теория и Эксперимент, МГУ ГАИШ, Россия, 18 декабря 2020 г., *Кинематика гало Галактики на основе данных о звёздах голубой горизонтальной ветви* (устный)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Расторгуев А.С., Уткин Н.Д., Чумак О.В. *Эффекты кратности звёздных сближений и коэффициенты диффузии в локально-однородной трёхмерной звёздной среде: устранение классической расходимости / Письма в Астрономический журнал. – 2017. – Т. 43. – С. 591-600. DOI: 10.7868/S03200108170006X (РИНЦ IF: 1.159) // Переводная версия: Rastorguev A.S., Utkin N.D., Chumak O.V. *The effect of multiplicity of stellar encounters and the diffusion coefficients in a locally homogeneous three-dimensional stellar medium: Removing the classical divergence / Astronomy Letters. – 2017. – Vol. 43. – P. 536-544. DOI: 10.1134/S1063773717080060 (WoS IF: 1.384)**
2. Расторгуев А.С., Уткин Н.Д., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Байкова А.Т., Бобылёв В.В. *Галактические мазеры: кинематика, спиральная структура и динамическое состояние диска / Астрофизический бюллетень. – 2017. – Т. 72. – С. 134-155. (РИНЦ IF: 0.996) // Переводная версия: Rastorguev A.S., Utkin N.D., Zabolotskikh M.V., Dambis A.K., Bajkova A.T., Bobilev V.V. *Galactic masers: Kinematics, spiral structure**

- and the disk dynamic state* / *Astrophysical Bulletin*. – 2017. – Vol. 72. – P. 122-140. DOI: 10.1134/s1990341317020043 (WoS IF: 1.022)
3. **Уткин Н.Д.**, Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Клиничев А.Д., Аблимит И., Чжао Г. *Кинематика и динамика гало Галактики на основе данных о переменных звёздах типа RR Лир* / *Письма в Астрономический журнал*. – 2018. – Т. 44. – С. 751-762. DOI: 10.1134/S0320010818110074 (РИНЦ IF: 1.159) // Переводная статья: **Utkin N.D.**, Dambis A.K., Rastorguev A.S., Klinichev A.D., Ablimit I., Zhao G. *Kinematics and Dynamics of the Galactic Halo from RR Lyrae Variable Stars* / *Astronomy Letters*. – 2018. – Vol. 44. – P. 688-698. DOI: 10.1134/S106377371811075 (WoS IF: 1.384)
4. **Utkin N.D.** and Dambis A.K. *Calibrating the BHB distance scale and the halo kinematic distance to the Galactic Centre* / *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*. – 2020. – Vol. 499. – P. 1058-1071. DOI: 10.1093/mnras/staa2819 (WoS IF: 5.235)

а также две публикации – в сборниках трудов конференций:

1. Дамбис А.К., Бердников А.Н., Ковалёва Д.А., Малков О.Ю., Расторгуев А.С., **Уткин Н.Д.** *Пульсирующие звёзды, шкала расстояний и кинематика галактического гало и толстого диска* / М.: ИЗМИРАН. – «Астрономия-2018. Современная звёздная астрономия 2018». – 2018. – Т. 1. – С. 141-144. // Переводная статья: Dambis A.K., Berdnikov L.N., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Rastorguev A.S., **Utkin N.D.** *Pulsating Stars, the Distance Scale and Kinematics of the Milky-Way Halo and Thick Disk* / *Modern Star Astronomy*. Vol. 1, Astronomy-2018 (XIII Congress of the International Public Organization «Astronomical Society»). Conference Abstracts. – Moscow: IZMIRAN Москва. – 2018. – Vol. 1. – P. 144-147. DOI: 10.31361/eaas.2018-1.029
2. Zhuiko S.V., **Utkin N.D.**, Chemel A.A., Dambis A.K. *Gaia DR2 and Hypervelocity Stars* / *Modern Star Astronomy*. Vol. 1, Astronomy-2018

(XIII Congress of the International Public Organization «Astronomical Society»). Conference Abstracts. – Moscow: IZMIRAN Москва. – 2018. – Vol. 1. – P. 167-171. DOI: 10.31361/eaas.2018-1.035

Личный вклад автора

В работе [4] автору диссертации принадлежит равный с соавторами вклад в разработку, отладку и использование наиболее полного варианта метода статистических параллаксов для сложного поля пространственных скоростей в диске Галактики (дифференциальное вращение и некруговые движения) (Глава 2). Автор самостоятельно вывел выражения для радиальной шкалы диска и сделал её оценку. Автору принадлежит адаптация алгоритма статистических параллаксов к исследованию кинематики подсистем гало и основной вклад в проведение вычислительных работ и анализ результатов в статьях [5-6] (Главы 3 и 4). Автором также были полностью реализованы методы абсолютизации собственных движений (Глава 3). Автором проведён поиск аналитической аппроксимации для множителя Т.А. Агеяна [7], учитывающего кратность звёздных сближений, и проведены вычисления коэффициентов диффузии в статье [8] (Глава 5).

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 163 страницы, включая 29 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 163 наименования на 17 страницах.

Во **Введении** показана актуальность работы, обозначены предметы и объекты, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту и приведён список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

В **Главе 1** приведён исторический обзор исследования структуры и кинематики подсистем Галактики – от работ Уильяма Гершеля до самых недавних исследований.

В **разделе 1.1** сообщается об истории исследования подсистем Галактики до второй половины XX века, в частности, об открытии дисковой и сферической составляющих и их кинематического различия, а также становлении звёздной динамики. **Раздел 1.2** посвящён кинематике диска, в нём рассказывается о многообразии объектов, используемых для изучения кинематики диска – облаках нейтрального водорода (**подраздел 1.2.1**), тёмных газопылевых облаков (**подраздел 1.2.2**) и звёздах (**подраздел 1.2.3**), а также мазерных источниках (**подраздел 1.2.4**). В **подразделе 1.2.5** говорится об имеющихся неопределённостях определения кинематических параметров диска и построения кривой вращения, упоминается о сложном строении сферической составляющей Галактики, в общих чертах описывается одна из важнейших проблем звёздной динамики. История исследования кинематики гало приводится в **разделе 1.3**, изложение начинается с обзора имеющихся гипотез образования гало (**подраздел 1.3.1**). В **подразделе 1.3.2** сообщается о результатах исследования кинематики гало по звёздам поля, а в **подразделе 1.3.3** – по шаровым скоплениям. **Подраздел 1.3.4** сообщает о продолжающемся образовании гало Галактики, свидетельством чего являются наблюдающиеся звёздно-газовые потоки.

Глава 2 посвящена изучению кинематики тонкого диска на основе данных о самой большой на время начала проводимого исследования выборке, включающей 131 мазерный источник в областях звездообразования. В **разделе 2.1** подробно представлено описание и дан вывод всех формул наиболее полной версии метода статистических параллакс. Перечислены необходимые входные данные (**подраздел 2.1.1**), используемые системы координат (**подраздел 2.1.2**). В **подразделе 2.1.3** представлены все составляющие модельной скорости объектов, связанные с: поступательным движением выборки относительно Солнца (**пункт 2.1.3.1**), круговым движением (**пункт 2.1.3.2**) и некруговыми движениями, вызванными возмущениями от спиральных волн плотности (**пункт 2.1.3.3**). В

подразделе 2.1.4 приведены все составляющие матрицы ковариации невязок между модельной и наблюдаемой скоростью каждого используемого объекта. Минимизируемой функции правдоподобия, аргументами которой являются оцениваемые параметры поля скоростей, отведён **подраздел 2.1.5**. Оценка погрешности параметров приведена в **подразделе 2.1.6**. В **разделе 2.2** приводится краткая информация об используемых в анализе кинематики мазерных источниках, причём в **подразделе 2.2.1** упоминается о пакете программ Astro Space Locator пост-корреляционной обработки данных радиоинтерферометрических наблюдений. В **разделе 2.3**, посвящённом анализу кинематики выборки мазеров, приводятся используемые варианты моделей поля скоростей и определённые значения параметров (**подраздел 2.3.1**), кривая вращения диска Галактики (**подраздел 2.3.2**), обсуждаются и сравниваются с результатами прошлых работ значения параметров, связанных с возмущениями от спирального узора (**подраздел 2.3.3**), карта кинематического спирального узора (**подраздел 2.3.4**), делаются выводы об уточнении шкалы расстояния до мазеров (**подраздел 2.3.5**). Отдельный **подраздел 2.3.6** посвящён аналитической оценке радиальной шкалы диска по данным о кинематике объектов вблизи солнечного круга – проводится вывод соответствующей формулы, основанной на уравнении Джинса, и сравнение результатов с определением параметров поля скоростей для всей выборки, а также с другими работами. В **разделе 2.4** делаются выводы по всему исследованию кинематики диска.

Глава 3 посвящена изучению кинематики гало Галактики на основе данных о переменных звёздах типа RR Лиры. В **разделе 3.1** подробно описываются два метода абсолютизации собственных движений на основе данных о положениях объектов и их погрешностей на разные эпохи, приведённые во «всенебесных» астрометрических и астрофизических каталогах (**подраздел 3.1.1**). Общая часть двух методов описывается в **подразделе 3.1.2**. **Подраздел 3.1.3** посвящён описанию «центрированного» метода абсолютизации, реализация которого состоит из: абсолютизации координат из каталога (**пункт 3.1.3.1**) и самого определения собственных движений (**пункт 3.1.3.2**). В **подразделе 3.1.4**

приведено описание «коллективного» метода абсолютизации, реализация которого включает в себя определение относительных собственных движений (пункт 3.1.4.1) и собственно их абсолютизацию (пункт 3.1.4.2). В подразделе 3.1.5 приводятся результаты проверки «центрированного» метода, для «коллективного» проверка не нужна, поскольку он уже был с успехом применён при исследовании шаровых скоплений, задача определения собственных движений которых сложнее, чем в случае отдельных звёзд. В разделе 3.2 приводится модификация метода максимального правдоподобия для объектов гало – по сравнению с кинематикой диска модель поля скоростей для объектов гало упрощена (подраздел 3.2.1), в случае переменных звёзд типа RR Лиры ввиду сильной нехватки информации о лучевых скоростях метод был адаптирован под двумерное поле скоростей (подраздел 3.2.2). При использовании далёких объектов, наблюдательные данные по которым страдают большими погрешностями необходимо сделать итерационную модификацию метода максимума правдоподобия (подраздел 3.2.3). В разделе 3.3 указаны источники, откуда были взяты переменные звёзды типа RR Лиры, используемые в данной работе, исследовано их распределение по металличностям и указан критерий выбора звёзд, принадлежащих предположительно гало (подраздел 3.3.1). Также для используемой выборки результаты абсолютизации собственных движений были сравнены с данными из Gaia DR2 (подраздел 3.3.2). В разделе 3.4, посвящённом результатам, проводится сравнение значений параметров поля скоростей для всей выборки (подраздел 3.4.1) и графиков изменения параметров с удалением от центра Галактики (подраздел 3.4.2), полученных с использованием абсолютизированных собственных движений и имеющихся в Gaia DR2. В подразделе 3.4.3 приводится оценка скорости общего вращения гало на разных удалениях. На основе этих результатов выделяются внутреннее и внешнее гало и делаются выводы о возможных механизмах их формирования. В разделе 3.5 делаются выводы по всему исследованию кинематики гало на основе данных о звёздах типа RR Лиры.

Глава 4 также посвящена кинематике гало, но на основе данных о звёздах голубой горизонтальной ветви (ВНВ). В отличие от выборки переменных звёзд типа RR Лиры, у всех используемых звёзд голубой горизонтальной ветви имеется информация о лучевых скоростях, поэтому стало возможным не только уточнить их нуль-пункт шкалы расстояний, но и с их помощью среди прочих параметров поля скоростей определить расстояние от Солнца до центра Галактики. В **разделе 4.1** указаны источники, откуда были взяты звёзды, используемые здесь. **Раздел 4.2** посвящён результатам анализа кинематики выборки звёзд голубой горизонтальной ветви – представлены глобальные значения параметров, в том числе и расстояния от Солнца до центра Галактики (**подраздел 4.2.1**), проведена попытка учёта отклонения большой оси эллипсоида скоростей от радиального направления (**пункт 4.2.1.1**) и вращения гало (**пункт 4.2.1.2**), проведено сравнение дисперсии скоростей выборки звёзд голубой горизонтальной ветви с полученными значениями для звёзд типа RR Лиры (**пункт 4.2.1.3**). В **подразделе 4.2.2** приводятся графики зависимости определённых параметров поля скоростей от расстояния до центра Галактики, заметно расхождение с соответствующими результатами для выборки переменных звёзд типа RR Лиры. В **разделе 4.3** делаются выводы по всему исследованию кинематики гало на основе данных о звёздах голубой горизонтальной ветви, а также по расхождению с результатами кинематики звёзд типа RR Лиры.

В **Главе 5** решается классическая проблема логарифмической расходимости коэффициентов диффузии в однородной звёздной системе. В **разделе 5.1** рассказывается о подходе Т.А. Агеяна к учёту кратности далёких звёздных сближений [8], объясняется физический смысл множителя Агеяна, проводится его численная аппроксимация. **Раздел 5.2** посвящён обзору двух подходов к учёту иррегулярных сил и тому, как сам Т.А. Агеян использовал введённый им множитель в звёздной динамике. В **разделе 5.3** непосредственным образом с применением множителя Агеяна выводятся выражения для коэффициентов диффузии, в **разделе 5.4** – проводится их численный расчёт и демонстрируется отсутствие расходимости. В **разделе 5.5** полученные результаты сопоставляются с

классическими «искусственными» вариантами устранения данной расходимости.

Раздел 5.6 завершает главу выводами по данному решению проблемы классической расходимости.

В Заключении делаются основные выводы по результатам диссертационного исследования и обозначается направление дальнейшей работы.

Список литературы

1. Binney J., Merrifield M. *Galactic Astronomy* Princeton: Princeton University Press, 1998. 632 p.
2. Расторгуев А.С. *Применение метода максимального правдоподобия для изучения кинематики галактических подсистем* / А.С. Расторгуев. – Москва [б. и.]. – 2002-2015. – Режим доступа: <http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway/Study/MaxLikelihood.pdf>.
3. Carollo D., Beers T. C., Chiba M. et al. // *The Astrophysical Journal*, Vol. 712, Issue 1, pp. 692-727 (2010)
4. Rastorguev A.S., Utkin N.D., Zabolotskikh M.V. et al. // *Astrophysical Bulletin*, Vol. 72, Issue 2, pp. 122-140 (2017)
5. Utkin N.D., Dambis A.K., Rastorguev A.S. et al. // *Astronomy Letters*, Vol. 44, Issue 11, pp. 688-698 (2018)
6. Utkin N.D. and Dambis A.K. // *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*. Vol. 499, Issue 1, pp. 1058-1071 (2020)
7. Агемян Т.А. *Курс астрофизики и звёздной астрономии*, том 2 / Т.А. Агемян, Б.А. Воронцов-Вельяминов, В.Т. Горбацкий, А.Н. Дейч, под ред. А.А. Михайлова. – М.: Физматгиз, 1962. – 688 с.
8. Rastorguev A.S., Utkin N.D., Chumak O.V. // *Astronomy Letters*, Vol. 43, Issue 8, pp. 536-544 (2017)