

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Уткина Никиты Денисовича
на тему: «Кинематика и динамика галактических подсистем»

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Актуальность темы.

Диссертация Никиты Денисовича Уткина посвящена изучению кинематики двух основных подсистем нашей Галактики – тонкого диска и гало, а также решению одной из давних проблем звёздной динамики – устранению логарифмической расходимости коэффициентов диффузии, описывающих кумулятивный эффект звёздных сближений на пробную звезду.

Последние достижения наблюдательной астрономии наравне с новой информацией, полученной в результате осуществления космического проекта «Gaia», способствуют увеличению интереса наблюдателей и теоретиков к задачам по изучению строения, кинематики и динамики диска и гало в нашей Галактике. Впечатляет общий масштаб объектов исследования, представляющих собой гигантские вращающиеся скопления звезд, газа и пыли, удерживаемых силами гравитации. Повышенный интерес к данной проблеме связан с тем, что описание кинематики Галактики является тем этапом в изучении динамики её подсистем и выявлению закономерностей, который позволяет пролить свет на формирование и эволюцию других дисковых галактик. Но чтобы эффективно использовать накопленные наблюдательные данные, необходимо разрабатывать новые методы, которые, с одной стороны, применимы к большому числу объектов, а с другой, позволяют извлекать из огромного объема информации глобальные характеристики, описывающие Галактику Млечный Путь. Таким образом, тема диссертации является очень актуальной и важной.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 163 страниц, включая 29 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 163 наименование.

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

В **Главе 1** представлен весьма подробный обзор исследований по структуре и кинематике подсистем Галактики, рассказывается о методах изучения кинематики газа и звезд в диске и гало. Автор указывает на сложное, комплексное строение обеих подсистем Галактики и подчеркивает, что образование гало продолжается и в нашу эпоху. В общих чертах описан известный парадокс в звездной динамике - проблема логарифмической расходимости коэффициентов диффузии в фазовом пространстве.

В **Главе 2** представлены новые результаты автора по изучению кинематики тонкого диска Галактики на основе данных о выборке из 131 мазерных источников. Изложение материала начинается с метода статистических параллаксов, а также методов работы с пакетом программ Astro Space Locator, необходимых для обработки данных о мазерных источниках. При анализе кинематики объектов в диске Галактики автор рассматривает разные варианты поля скоростей и подбирает для них параметры методом статистических параллаксов, основанном на поиске максимума функции правдоподобия. В результате подбора подходящих параметров для поля скоростей автору удается получить новые данные о сложном поведении кривой вращения в диске Галактики и описать основные свойства 4-рукавного спирального узора. Подробно разбираются отклонения от круговых движений в диске, вызванные

возмущениями от спиральных волн плотности. Результаты действия этих возмущений представлены на графиках, где показаны радиальные, тангенциальные и вертикальные отклонения скорости мазеров от кругового движения. Автор приходит к выводу, что наблюдаемые значения скоростей выбранной группы мазеров наилучшим образом воспроизводит такая модель, в которой учитываются круговые движения и возмущения от спирального узора, а радиальная дисперсия скоростей не зависит от расстояния до центра Галактики. Часть главы 2 посвящена анализу радиальной шкалы диска по данным кинематики объектов вблизи солнечного круга. С помощью уравнения Джинса звездной гидродинамики автор находит параметр радиальной шкалы диска $H_D = (2,7 \pm 0,2)$ кпк. Адекватность полученных результатов проверяется сравнением с работами других авторов.

В **Главе 3** изучается кинематика другой важнейшей подсистемы в Галактике – её сферического гало. Это исследование проводится на основе выборки, составленной из переменных пульсирующих звезд типа RR Лиры. В задачу входило не только определение оптимальных значений параметров поля скоростей для звезд данной выборки, но и выяснение того, как изменяются сами параметры поля скоростей с расстоянием от центра Галактики. В диссертации проведено самостоятельное определение собственных движений звезд по их положениям в широком диапазоне моментов наблюдений на разные эпохи. Для этой цели применялись два метода, причем для одного из них («центрированного») была проведена проверка с учетом данных по двум рассеянным скоплениям M67 и NGC188. Учитывая свойства системы гало в целом, в основном методе с самого начала были сделаны некоторые разумные упрощения: так, зная о слабом вращении гало, в модельную скорость включалась только скорость движения Солнца относительно звезд выборки; параметры этого упрощенного поля скоростей находились с применением итерационной модификации метода максимума правдоподобия (позволяющего учитывать большие погрешности в определении координат далёких объектов на разные

эпохи). Для контроля результатов проводилось сравнение всех графиков, полученных с использованием абсолютизированных собственных движений и имеющихся в Gaia DR2. При анализе кинематики гало находились не только компоненты дисперсии скоростей, но и её полное значение, а также такой важный параметр, как анизотропия дисперсии скоростей. Его значение $\beta \approx 0.68 - 0.72$ наглядно показывает большую вытянутость орбит звезд типа RR Лиры в гало. Отмечен и важный факт возрастания анизотропии дисперсии скоростей от центра Галактики к периферии. В итоге, знание параметров поля скоростей для переменных звезд типа RR Лиры и того, как эти параметры зависят от расстояния до центра Галактики, позволило оценить скорость вращения гало на разных расстояниях. По характеру профилей анизотропии дисперсии скоростей и кривой вращения в работе было подтверждено существование внутреннего и внешнего гало у нашей Галактики.

В **Главе 4** автор продолжает изучать кинематику гало в нашей Галактике, используя для этого большую выборку из 4985 звезд голубой горизонтальной ветви. В отличие от выборки переменных звезд типа RR Лиры, у звезд голубой горизонтальной ветви имеется информация о лучевых скоростях, и с их помощью можно не только уточнить нуль-пункт шкалы расстояний, но и определить расстояние от Солнца до центра Галактики. В работе был использован каталог для звезд голубой горизонтальной ветви, взятый из работы других авторов и содержащий ценную информацию о фотометрических расстояниях и лучевых скоростях звезд. Характерно, что по новой выборке автором не было обнаружено отклонений большой оси эллипсоида скоростей от направления на центр Галактики. К интересным выводам автор приходит и при сравнении эллипсоидов скоростей у звезд типа RR Лиры и звезд голубой горизонтальной ветви: у объектов первой выборки анизотропия дисперсии скоростей оказывается заметно большей, чем у звезд голубой горизонтальной ветви. Установлено также, что популяция звезд голубой горизонтальной ветви практически не вращается, поэтому по кинематике объектов

этой выборки не удастся четко выделить отличие между внутренним и внешним гало в Галактике.

В **Главе 5** разработан оригинальный подход к решению старой проблемы в звездной динамике – устранению логарифмическую расходимости у коэффициентов диффузии в однородной звёздной системе. Суть проблемы, как известно, в том, что при учете вклада в дисперсию скоростей пробной звезды от сближений с другими звездами появляется логарифмическая расходимость в величине этого вклада с ростом расстояния от пробной звезды до возмущающих звезд. Среди предшественников, изучавших данную проблему, встречаем имена Джинса, Шарлье и Чандрасекара. Диссертант, совместно с О.В. Чумаком и своим научным руководителем, демонстрируют оригинальный подход к данной проблеме, который опирается на известный с 1959 года метод Т. А. Агеяна, предложившего учитывать вклад кратных далёких звёздных сближений в интеграл по столкновениям с помощью специального множителя. В диссертации автор доходчиво объясняет физический смысл метода Агеяна, позволивший в конечном итоге дать решение загадки логарифмической расходимости коэффициентов диффузии, описывающих кумулятивный эффект от звёздных сближений. Заметим, что еще в 1980 году были опубликованы две работы по объяснению этого парадокса американца Генри Кендрупа, но метод Кендрупа был весьма сложным. В диссертации Н.Д. Уткина данная задача решается более просто с применением множителя Агеяна. В итоге, в аналитическом виде в работах диссертанта были получены формулы для коэффициентов диффузии. Эти результаты диссертации сравниваются с другими известными вариантами устранения логарифмической расходимости.

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

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Все задачи, поставленные в данной диссертации, четко сформулированы, а научные положения и выводы строго обоснованы. Диссертантом было изучено и критически проанализировано огромное количество публикаций, что подтверждается списком цитируемой литературы, состоящим из 161 работы. Обоснованность научных результатов является следствием применения в диссертации адекватного математического аппарата и использования разумных предположений о реальных свойствах двух важнейших подсистем в Галактике.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов Н. Д. Уткина подтверждается тем, что:

1) построенные в диссертации модели (речь идет о модели с постоянной радиальной дисперсией скоростей для поля скоростей мазеров в диске и модели поля скоростей для выборки переменных звёзд типа RR Лиры в гало), а также полученные им значения основных характеристик для тонкого диска и сферического гало Галактики (среди них – важный вывод о том, что популяция звёзд голубой горизонтальной ветви в гало практически не вращается) – все эти результаты наилучшим образом воспроизводят современные наблюдения;

2) выводы диссертации не противоречат современным представлениям о формировании и эволюции диска и гало в нашей Галактике.

Все результаты, полученные Никитой Денисовичем, прошли апробацию на семинарах и конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений. В работе получены новые данные о кинематике диска и гало в нашей Галактике. Интересными и новым результатами является вывод о том, что анизотро-

пия дисперсии скоростей у объектов выборки мазеров оказалась заметно больше, чем для выборки звёзд голубой горизонтальной ветви. Кроме того, дано объяснение парадокса логарифмической расходимости коэффициентов диффузии. Обоснованность научных результатов является следствием применения адекватного математического аппарата и использования разумных предположений о кинематических свойствах диска и гало в Галактике.

Замечания по диссертационной работе

1. Местами текст страдает некоторой вычурностью стиля. Например, стр. 6 «...чтобы на хотя бы качественном уровне понять...». Здесь пять слов можно заменить одним словом и сказать «...чтобы просто понять...».
2. В следующем предложении того же абзаца на стр. 6. читаем неправильно построенное предложение «**Она представляет** собой действительно сложную звёздную систему – **она не только представлена...**».
3. В разделе 1.2.1 автор говорит, что Мартин Шмидт построил модель распределения массы в диске Галактики, причем сам диск представлялся как набор **вытянутых** сфероидов с неравномерным распределением плотности. Однако данное утверждение не является точным: в модели Шмидта от 1956 года диск представлен набором не вытянутых (prolate), а **сжатых** (oblate) сфероидов. Это существенно, так как потенциалы вытянутых сфероидов могут сильно отличаться от потенциалов сжатых сфероидов.
4. В разделе 2.3.2 приводится Рис. 2.3, на которых показаны отклонения скорости мазеров от кругового движения в рамках модели 4. На этих рисунках можно заметить, что графики для радиальных и тангенциальных отклонений на интервале расстояний 10-14 кпк находятся почти в противофазе. Однако в диссертации этот факт не отмечен.
5. На стр. 86 приводится странная фраза: «У всего лишь примерно 40 звёзд из всех значений абсолютизированных собственных движений

сравнимы с большими полуосями параллактических эллипсов, и не учёт годичного параллактического смещение на результаты практически не повлияет.»

6. В диссертации подробно говорится о разделении гало на две компоненты (внутреннее гало и внешнее), которые заметно различаются как по вращению, так и по дисперсии скоростей. К сожалению, нигде не обсуждается причина обратного вращения внешнего гало.

7. Стр. 104. Читаем «Что касается параметра анизотропии, то можно уверенно сказать, что на расстояниях 3-4 кпк он меньше, чем за солнечным кругом. Это означает, что там поле остаточных скоростей ближе к изотропному...». Где там (внутри или вне солнечного круга) – диссертант не уточняет.

8. Обсуждая основной теоретический результат диссертации - объяснение парадокса логарифмической расходимости коэффициентов диффузии, было бы полезно дать более глубокий анализ и метода Кендрупа.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Уткин Никита Денисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, отдел небесной механики, ведущий научный сотрудник

Кондратьев Борис Петрович

5.12.2022

Контактные данные:

тел.: 7(495)939 26-50, e-mail: work@boris-kondratyev.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119234, Москва, Университетский проспект, д. 13,

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

Тел: 7(495)939 26-50; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника ГАИШ МГУ Б. П. Кондратьева удостоверяю:

Начальник отдела канцелярии

Л.Н. Новикова