

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Уткина Никиты Денисовича на тему:
«Кинематика и динамика галактических подсистем»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Никиты Денисовича Уткина по сути выполненных исследований подразделяется на две части: главы со второй по четвертую посвящены кинематическому моделированию разных подсистем нашей Галактики, а пятая, последняя, глава — описанию действия иррегулярных сил в звездной системе (первая глава является обзорной). Обе темы принадлежат к числу классических звездно-астрономических проблем, работа над которыми идет уже многие десятилетия. Однако имеющиеся решения этих проблем далеки от полных. Более того, по мере появления все более точных и многочисленных данных наблюдений и накопления знаний само понятие «решения» смещается в сторону все более детальных и специализированных моделей, свидетельствующих в пользу того, что наша Галактика, как, очевидно, и другие звездные системы, оказывается гораздо более сложным явлением природы, чем представлялось ранее. Поэтому выполнение новых исследований в рамках указанных тем на основе более совершенных подходов и по современным данным крайне желательно. Таким образом, тематика диссертационной работы, несомненно, является **актуальной**.

Работа содержит много **методических новаций** и **новых результатов**. Выделим некоторые из них. **Впервые** реализована версия метода моделирования поля пространственных скоростей подсистемы объектов в рамках принципа наибольшего правдоподобия, учитывающая одновременно дифференциальное вращение диска, спиральные возмущения от волн плотности и эллипсоидальное распределение остаточных скоростей, а также позволяющая оценить поправку нуля-пункта шкалы используемых рас-

стояний. Метод применен к подсистеме мазерных источников Галактики. **Важным** представляется сделанный в результате этого анализа вывод о наилучшем согласии с наблюдениями предположения о *постоянстве* радиальной дисперсии скоростей мазеров, что может быть существенным для правильного понимания природы неизмерительной составляющей дисперсии скоростей этих объектов (см. обсуждение этого вопроса ниже).

На основе уравнений звездной гидродинамики автор диссертации вывел и применил к данным о мазерах аналитическое выражение для радиальной шкалы диска Галактики, которое является **новым** способом оценки этого параметра по данным о локальной кинематике дисковых объектов. Хотя при выводе был использован целый ряд дополнительных предположений, итоговый результат, $H_D = 2.7 \pm 0.2$ кпк, хорошо согласуется с оценками, полученными другими способами и по другим данным, что говорит в пользу **достоверности** метода и результата.

При анализе кинематики звезд голубой горизонтальной ветви, относящихся к гало Галактики, в работе фактически был предложен и реализован **принципиально новый** кинематический метод определения расстояния до центра Галактики, R_0 , основанный не на эффекте дифференциального вращения, как во всех методах этого класса до сих пор, а на наличии анизотропии скоростей — здесь важно существенное превышение радиальной дисперсии над другими компонентами — и направленности большой оси эллипсоида скоростей на центр Галактики (общего вращения подсистемы этих звезд не предполагалось в модели и не было обнаружено по факту). В этом на самом деле состоит истинная новизна данной части работы. Проверка диссертантом второго из указанных предположений повышает **достоверность** нового подхода. Этот метод следует включить в университетские дисциплины по звездной астрономии.

Большой интерес представляют результаты, полученные по другой подсистеме гало — звездам типа RR Лиры, — в частности, закон вращения этой подсистемы, который качественно согласуется с этой характеристикой, некогда найденной оппонентом для системы шаровых скоплений.

Следует также отметить **оригинальность** подхода, устраняющего логарифмическую расходимость, которая возникает при вычислении коэффициентов диффузии на основе метода Т. А. Агеяна учета кратности звездных сближений.

Все научные положения, вынесенные на защиту являются **обоснованными**. **Достоверность** результатов в целом обеспечивается использованием современных астрометрических и астрофизических обзоров всего неба, применением корректных математических и статистических методов анализа данных, в частности, метода наибольшего правдоподобия и согласием полученных результатов с результатами работ других авторов. В пользу **достоверности** сделанных в работе выводов говорит осознанное рассмотрение галактических подсистем, *однородных* по типу объектов, искусно сочетаемое со стремлением проверить/изучить *неоднородность свойств* этих подсистем, как это сделано в случае объектов гало.

Автор проявил высокую квалификацию и выполнил большой объем работы. Основные статьи диссертанта опубликованы в ведущих научных журналах, в половине публикаций он является первым автором. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Несмотря на высокий уровень диссертации в целом, следует сделать ряд **замечаний**.

1. Хотя автор стремился к однородности выборок по типу объектов, в случае мазеров это не удалось сделать в полной мере, т.к. к однородной выборке Reid et al. (2014), состоящей только из мазеров в областях формирования массивных звезд (HMSFRs), была добавлена выборка из 38 мазеров, из которых, как показало изучение литературы (Никифоров, Веселова, ПАЖ, 2018, т. 44, № 11, с. 763), только 9 относится к классу HMSFRs, а остальные — к 14 другим типам, в том числе к мазерам вокруг центральных объектов очень разных эволюционных статусов (от звезд типа Т Тельца до рентгеновских двойных). Это могло привести к кинематической неоднородности выборки — вряд ли у всех типов мазеров один и тот же эллипсоид

скоростей,— однако такая возможность не была рассмотрена в диссертации. Кроме того, следует принимать во внимание, что Reid et al. в своих каталогах традиционно учитывают «астрофизическую» дисперсию скоростей мазеров, связанную с неопределенностью переноса движений мазеров к движению центральной звезды: мазерные источники в струях и потоках могут иметь большие скорости относительно этой звезды. Учет состоит в том, что Reid et al. в своих каталогах добавляют к измерительной неопределенности компонент скоростей мазеров астрофизическую дисперсию (как правило, 5–10 км/с). А другие группы, публикующие данные о мазерах, приводят *только* измерительную неопределенность. Об этом прямо пишут VERA Collaboration et al. (2020), чей каталог буквально содержит те же данные, что дополнительно были привлечены в диссертации. В результате Reid et al. приводят каталожные (измерительные) ошибки скоростей, как правило, кратно большие, чем другие авторы для тех же объектов по тем же измерениям скоростей. В диссертации этот факт учтен не был, и астрофизическая дисперсия дополнительных объектов, очевидно, перешла в «космическую дисперсию» подсистемы мазеров.

В последствии кинематическая неоднородность разных групп мазеров подтвердилось: природная («космическая» в терминах диссертации) дисперсия азимутальных скоростей мазеров каталогов Reid et al. и VERA различаются в 3 раза — 6 против 20 км/с (Громов, Никифоров, *Астрофизический бюллетень*, 2021а, т. 76, № 2, с. 187; ПАЖ, 2021б, т. 47, № 6, с. 383).

2. Наличие указанной астрофизической дисперсии остро ставит вопрос о доле ее вклада в наблюдаемую «космическую» дисперсию по сравнению с динамической дисперсией скоростей движения в потенциале Галактики центральных звезд, с которыми связаны мазерные источники. Однако именно последняя дисперсия должна входить в соотношение Линдблада, связывающее азимутальную и радиальную компоненты дисперсии скоростей и использованное в работе для исключения азимутальной дисперсии из числа неизвестных характеристик. Автор постулирует соотношение Линдблада,

хотя оно выведено в предположениях о стационарности и осесимметричности, не в точности верных для нашей Галактики, упуская, на наш взгляд, возможность проверить его реалистичность в случае мазеров. Как ведет себя правая часть этого соотношения (2.33) в функции от R при постоянной σ_U для построенной модели и как согласуется эта функция, например, с модулями азимутальных невязок? Это могло бы дать важную информацию о природе космической дисперсии, т.к. если вклад в нее астрофизической дисперсии значителен, то соотношение (2.33) может и не соблюдаться. Возможно, и постоянство радиальной дисперсии $\sigma_U(R)$ также обусловлено влиянием неучтенной астрофизической дисперсии.

3. На стр. 52 автор называет «наблюдаемыми» скоростями не только лучевые скорости, но и линейные скорости по долготе и широте — $kD\mu_l$, $kD\mu_b$. Однако наблюдаемыми являются не они, а собственные движения μ . Только их ошибки можно считать нормально распределенными, как и ошибки параллаксов и модулей расстояний, но не ошибки самих расстояний D и, соответственно, не ошибки линейных скоростей. Вместе с тем, функция правдоподобия (2.43) предполагает нормальность распределения всех компонент скоростей.

4. С целью определения границ ∂G доверительных 1σ -интервалов для полученных точечных оценок M_0 параметров модели автор использует соотношение

$$LF(\partial G) = LF(M_0) + 1,$$

где LF — функция правдоподобия (стр. 61). Однако оно не совсем верно, должно быть

$$LF(\partial G) = LF(M_0) + \frac{1}{2}$$

(см., например, Д. Худсон, Статистика для физиков, М.: Мир, 1970, стр. 114 и далее). Добавка $\Delta\chi^2 = 1$ верна в случае статистики χ^2 , но не для логарифмической функции правдоподобия. Такая некорректность приводит к тому, что, с одной стороны, автор недооценивает точность собственных результатов (примерно в $\sqrt{2}$ раз), с другой — некоторые поправочные параметры,

типа p или α_0 , могут оказаться более значимыми, нежели представляется сейчас.

5. На той же стр. 61 автор пишет о доверительных интервалах: «... вместо 68.3% можно взять другое значение той вероятности, ... но тогда определение границы ∂G будет намного сложнее». На самом деле, ненамного сложнее — изменится лишь величина добавок: для доверительного уровня $k\sigma$ добавка $\Delta\chi^2 = k^2$ (например, Press et al., Numerical Recipes in C, UK: Cambridge Univ. Press, 1997, p. 697), а для функции правдоподобия $\Delta LF = k^2/2$ (Худсон, 1970, те же страницы).

6. В диссертации упоминается, но не обсуждается работа Волкова (2017, [85]), в которой в контексте вопроса о незавершенности далеких звездных сближений подвергается сомнению реалистичность самой проблемы классической расходимости. Хотелось, чтобы автор диссертации сопоставил свою позицию с позицией автора указанной работы.

Сделаем также несколько мелких замечаний.

1. Харлоу Шепли получил значение расстояния до центра Галактики $R_0 = 13$ кпк (H. Shapley, *Astrophys. J.*, 1918, v. 48, p. 154), а не «в примерно 15 кпк», как написано на стр. 22.
2. В некоторых случаях непонятно, каким образом выводились итоговые значения параметров из совокупности всех результатов. Так, в «Выводах по Главе 2» (стр. 76) указано значение $W_0 = -9.0 \pm 1.1$ км/с, тогда как в таблицах 2.1, 2.2 этой главы приведены лишь величины $W_0 = -8.76, -8.64$ и -8.93 км/с.

На стр. 116 обсуждается полученное значение $V_0 = (-239 \pm 4)$ км/с, при этом в единственной таблице 4.1 значится точечная оценка $V_0 = -240.2$ км/с.

В разделе «Выводы по Главе 4» и на стр. 115 в качестве итоговых указаны значения $R_0 = (8.23-9.00)$ кпк, притом что в таблице 4.1 величина 8.23 кпк приведена как точечная оценка с границами доверитель-

ного интервала 7.82 и 9.00 кпк. Может быть, итоговым промежуток все-таки является $R_0 = (7.82-9.00)$ кпк?

3. В ряде случаев формулы выписаны неряшливо. Так, в выражениях (2.10) и (2.17) для долготной компоненты скорости приведен множитель $(R_0 \cos l - r \sin b)$ вместо $(R_0 \cos l - r \cos b)$. Надеюсь, это просто опечатки.

В формуле (2.39) вместо $\sigma_W(R) = \sigma_W(R_0) = \sigma_{W0}$ должно быть $\sigma_U(R) = \sigma_U(R_0) = \sigma_{U0}$.

Гелиоцентрическое расстояние обозначается то D [например, в формулах (2.8), (2.21), (2.25)], то r [например, в (2.1), (2.2), (2.10)], а, согласно первой формуле (2.30), D обозначает некоторую функцию r .

Диссертация содержит совсем немного опечаток в тексте; как правило, это случаи, когда неверное слово известно русскому словарю, например, «в направлении от центра Галактики» (стр. 54). К недостаткам оформления относится набор диссертации в Word, а не в L^AT_EX'e. Возможно, поэтому много случаев появления лишней абзацной отбивки после формулы, когда формула не заканчивает предложение. Непонятен принцип упорядочения ссылок в Списке литературы: порядок и неалфавитный, и не в строгом порядке цитирования. Это затрудняет работу со ссылками. Удивило написание фамилии Mel'Nik в ссылках. Китайская фамилия Хуе (ссылка [143]) по-русски транслитерируется как Сюэ, а не Сю.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, выполненного Н. Д. Уткиным. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту 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, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»,
доцент Кафедры небесной механики

Никифоров Игорь Иванович

01.12.2022

Контактные данные:

тел.: 7(812)4284269, 7(812)4284163, 7(812)4284268,
e-mail: i.nikiforov@spbu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.03.02 — Астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28
Санкт-Петербургский государственный университет,
Кафедра небесной механики
Тел.: 7(812)428-69-44; e-mail: decanat@math.spbu.ru

Подпись Никифорова И.И. удостоверяю: