

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Подзолковой Екатерины Николаевны
на тему «Влияние бара на кинематику диска Галактики вблизи
внешнего линдбладовского резонанса»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Современные наблюдательные данные (в первую очередь благодаря обзорам Gaia, VISTA Variables in the Via Lactea (VVV), Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE), Large Amirtallost Multiple Object Spectroscopic Telescope, LAMOST и др.) радикально меняют представления о центральной структуре нашей Галактики. Переход от точечных наблюдений к большим данным (Big Data) позволил совершить целый ряд фундаментальных открытий. Млечный Путь обладает развитой, геометрически сложной перемычкой, состоящей из утолщенного внутреннего барообразного балджа (Boxy/Peanut bulge) и протяженного тонкого компонента (Long Bar). Современные кинематические данные подтвердили, что структура балджа является результатом вековой динамической эволюции изначально плоского диска под действием вертикальных орбитальных резонансов при развитии неустойчивости бара. Обнаружены две четкие популяции звезд, где богатые металлами звезды движутся по вытянутым орбитам бара, а бедные металлами старые звезды распределены более сфероидально. Это накладывает сильные ограничения на проверку современных теоретических моделей, доказывающих вторичную природу формирования центральной перемычки достаточно поздно из тонкого диска. Удалось проследить перемычку до рекордных 4.6 — 5 кпк от

центра. Доказано, что «длинный бар» является ультратонким (высота шкалы около 45 пк) продолжением внутреннего барообразного балджа.

Диссертационная работа Подзолковой Е.Н. посвящена изучению динамики нашей Галактики, в рамках которой проведен анализ влияния центрального звездного бара на движение звездной компоненты в широкой окрестности Солнца. Автор использует данные Gaia, в том числе с привлечением дополнительной обработки данных наблюдений. Соискатель основывается на проведенных вычислительных экспериментах движения частиц в гравитационном потенциале многокомпонентной модели Галактики. Построение вычислительной модели Галактики является важной частью работы соискателя. Проведено согласование результатов моделирования с данными наблюдений для оценки ряда параметров нашей Галактики, в частности, относящихся к центральной перемычке. Сказанное выше позволяет считать данную работу **актуальным исследованием**, в котором получен ряд новых научных результатов.

Научная новизна определяется прежде всего новыми оценками угловой скорости вращения бара, позиционного угла бара, скорости рождения звездной перемычки. Закон вращения достаточно массивного бара может накладывать целый ряд ограничений на кинематику звезд в обширной окрестности Солнца. Уточнение позиционного угла бара существенно влияет на объяснение кривой вращения внутри области размером 2 кпк. Ограничения на скорость формирования звездного бара являются важными в связи с изучением механизмов и условий рождения системы балдж/бар. Анализ резонансных структур позволил получить новые данные о гравитационном потенциале и кинематике Млечного Пути, что расширяет современные представления о физике нашей галактической системы.

Считаю, что положения, выносимые на защиту, основные результаты и основные выводы в конце глав являются в целом **обоснованными**. Достоверность выносимых на защиту научных выводов подтверждается использованием результатов проекта GaiaDR3, как наиболее надежного источника высокоточных астрометрических и кинематических данных для Галактики. Соискатель использовал достаточно стандартные методы обработки данных и основывался на обоснованных гравитационных потенциалах галактических компонент.

Основные результаты рецензируемого исследования опубликованы в четырех научных статьях в ведущих высокорейтинговых журналах, включая Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (две статьи), Письма в Астрономический журнал, Астрофизический бюллетень общим объемом 75 страниц. Подзолкова Е.Н. докладывала свои результаты на шести профильных научных конференциях. Личный вклад автора в публикациях подробно описан, и ее вклад является значительным, охватывая все основные результаты диссертационного исследования. Основная часть диссертации состоит из 128 страниц и пяти глав.

Работа хорошо оформлена и в необходимом объеме иллюстрирована, содержит 54 рисунка. Описание используемого математического аппарата является подробным и позволяет понять все особенности исследования. Список литературы содержит 148 наименований, которые соответствуют тематике исследования. Можно было бы включить дополнительно достаточно важные работы по рассматриваемым проблемам, вышедшие в 2024, 2025 и 2026 годах, а не ограничиваться списками литературы из опубликованных соискателем своих работ. Это позволило бы обсудить некоторые более свежие работы и соответствующие результаты за последние

2-3 года по рассматриваемым вопросам, учитывая что наиболее активная фаза обработки данных миссии Gaia еще не закончена, поскольку около 70% собранных данных еще находятся в обработке консорциума DPAC.

Имеются следующие замечания.

1) В работе автор ограничился заданием фиксированных значений пространственных шкал и масс бара, балджа, темного гало и звездного диска. Между тем, актуальные данные наблюдений и динамические модели все еще демонстрируют заметный разброс этих параметров. В связи с этим в качестве пожелания автору хотелось бы увидеть оценку того, как возможные вариации этих параметров могут повлиять на сделанные оценки свободных параметров и устойчивость обнаруженных резонансных структур.

2) В качестве дискуссионного замечания следует отметить, что автор ограничился рассмотрением двумерной (2D) модели диска, в которой безмассовые пробные частицы движутся строго в плоскости $z = 0$. Представляется, что переход к трехмерному (3D) моделированию диска конечной толщины — даже при анализе кинематики исключительно в плоскости симметрии без учета самогравитации — может заметно скорректировать результаты. Звезды, совершающие вертикальные колебания, обладают иными радиальными и азимутальными скоростями вне плоскости диска из-за вертикальных градиентов скорости вращения и дисперсий скоростей. При пересечении плоскости $z = 0$ они будут вносить кинематический вклад, отличный от чисто плоскостной модели, что приведет к естественному сглаживанию и смещению резонансных структур в фазовом пространстве. В отсутствие самогравитации переход от плоской модели к трехмерной не меняет архитектуру численного алгоритма, максимально эффективно распараллеливается и увеличивает время интегрирования орбит пробных частиц всего в 1.5 раза.

3) Автор одновременно использует компактный тяжелый балдж (сфера Пламмера с массой $1.2 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$), массивный бар Феррера (длина 3.5 кпк, масса $1.2 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ и стандартный экспоненциальный звездный диск (шкала 2.5 кпк, масса $3.25 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$). Согласно современным представлениям об эволюции Млечного Пути (и других внешних галактик), звездный бар формируется непосредственно из вещества самого диска в результате развития физических неустойчивостей. В связи с этим хотелось бы услышать обоснование используемого в работе подхода с точки зрения возможного двойного учета звездной массы в центральной области Галактики и его влияния на динамику пробных частиц.

4) Соискатель использует в работе критерий исключения пробных частиц, согласно которому из дальнейших вычислений удалялись объекты, приближающиеся к центру Галактики на расстояние менее 0.02 кпк. Доля таких частиц велика, что видно из графиков на рис. 1.7, где в области $R < 3$ кпк существенная часть частиц выведена из расчета. В меньшей степени поверхностная плотность понижается и в зоне 3—4 кпк. Прохождение через периферию вблизи центра является естественным динамическим свойством наиболее вытянутых орбит звездного бара (семейства x_1). Такой способ вычислений может оказывать сглаживающее влияние на результирующие фазовые характеристики. В частности, это может приводить к искусственному занижению радиальной дисперсии скоростей и сглаживанию резонансного отклика на внутренних границах исследуемой области. Какова причина выбора такого алгоритма, который вырезает основные барообразующие орбиты семейства x_1 в зоне 10—30 пк, что на порядок превышает радиус сферы гравитационного влияния сверхмассивной черной дыры. В связи с этим, хотелось бы услышать мнение автора о том, насколько сильно этот вычислительный метод мог бы повлиять на точность

сопоставления модельной кинематики с данными наблюдений каталога Gaia в центральных областях также.

5) Следовало бы пояснить, насколько корректно вычисление невязки χ в виде суммы для соответствующих сильно различающихся невязок радиальной и азимутальной компонент скоростей. Скорость вращения выше характерной радиальной скорости примерно в 20 раз, и выводы на основе анализа результатов формального сложения невязок неочевидны. Кроме того, соискатель в формулах (1.41), (1.42) учитывает разные нормировки для разных компонент χ_T и χ_R . Квадраты этих нормировок отличаются в пределах множителя 2 (см. (1.43)), причем тангенциальная компонента делится на меньшее число, что еще в 2 раза увеличивает вклад тангенциальной компоненты по сравнению с радиальной.

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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Подзолкова Екатерина Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования Института математики и информационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет»

Хоперсков Александр Валентинович

24.08.2026

Контактные данные:

тел.: 7(8442) 476051, e-mail: khoperskov@volsu.ru

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

Адрес места работы:

400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100,
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», институт математики и информационных технологий, кафедра информационных систем и компьютерного моделирования.
Тел.: 7(8442)476051; e-mail: infomod@volsu.ru