

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**

Работа посвящена изучению резонансной настройки скоростей звезд, вызванной баром. Для этого сравниваются наблюдаемые в околосолнечной окрестности галактоцентрические радиальные и тангенциальные скорости звезд с прогнозируемыми. В качестве наблюдаемых используются самые современные астрометрические и кинематические данные о звездах, полученные в результате выполнения космического эксперимента Gaia. Для формирования прогнозируемых скоростей построена динамическая модель Галактики, включающая несколько вкладчиков – осесимметричные балдж, диск и гало невидимой материи, а также неосимметричный компонент – бар.

Как известно, динамическое воздействие бара на звезды заключается в формировании нескольких характерных семейств их орбит. А именно, для одного семейства орбит характерным является вытянутость вдоль главной оси бара, для другого – вытянутость вдоль второй оси бара. При этом важно, что следствие такой бимодальности звездных орбит доступно современным наблюдениям в непосредственной окрестности Солнца при анализе распределения пространственных скоростей звезд u и v . Установлено, что два сгущения на uv -плоскости скоростей, Геркулеса и Wolf 630 (область анти-Геркулеса) как раз отражают бимодальность орбит, формируемых баром. Изучению этих и других сгущений на uv -плоскости скоростей посвящено большое количество научных публикаций.

Диссертантом же осуществлен другой, оригинальный подход, доказывающий динамическое влияние бара на звездные орбиты, дающий при этом возможность непосредственной проверки эффекта из имеющихся наблюдений звездных положений и скоростей. Основная идея метода заключается в анализе кинематики звезд в окрестности внешнего резонанса Линдблада (OLR), вызванного баром, и расположенном, согласно оценке диссертанта, вблизи Солнца, $R_{\text{OLR}}=7$ кпк (где R – галактоцентрическое расстояние). Диссертантом показано, что бар приводит к появлению различных семейств периодических и квазипериодических орбит, которые формируют двойное внешнее эллиптическое кольцо R_1R_2 и характерные особенности профилей галактоцентрических радиальных $V_R(R)$ и тангенциальных $V_T(R)$ скоростей. Показано согласие между предсказанными моделью и наблюдаемыми профилями скоростей, получены новые оценки важнейших характеристик бара. Таким образом избранная тема диссертации является **актуальной**.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Она написана на 143 страницах, содержит 54 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 148 наименований. Результаты работы отражены в пяти публикациях в научных журналах с высоким импакт-фактором. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Сущность полученных результатов. Во введении дано описание современного состояния исследований в рассматриваемой области астрономии.

В первой главе описаны применяемые диссертантом методы. Даны параметры четырехкомпонентной модели гравитационного потенциала Галактики, состоящей из вкладов балджа, диска, гало невидимой материи и бара. Изложен процесс формирования резонансных колец в модельном диске. Дано сравнение наблюдаемых и модельных распределений пространственных скоростей звезд. В качестве наблюдаемых здесь выступают скорости большого массива звезд, взятые из каталога Gaia

(использовались версии Gaia EDR3 и Gaia DR3), имеющие надежные оценки расстояния и кинематических характеристик. Получены новые оценки таких динамических параметров бара, как его возраст, угловая скорость вращения, а также позиционный угол относительно Солнца.

Во второй главе проводится исследование периодических изменений морфологии резнансных колец, которые формируются в диске модельной Галактики под влиянием бара. Анализируется характер распределения плотности звезд в модельном диске в зависимости от времени. Определены периоды изменения морфологии внешних резнансных колец. Обнаружено попеременное усиление то лидирующих, то отстающих сегментов внешних колец.

В третьей главе исследовано периодическое увеличение радиальной скорости звезд V_R вблизи внешнего резнанса Линдблада в предложенной диссертантом модели Галактики. Показано периодическое возрастание радиальной скорости на величину 1.90 ± 0.12 км/с в диапазоне галактоцентрических расстояний $R = 6\text{--}7$ кпк, проявляющееся в виде появления характерного горба, который возникает с периодом около 2 млрд лет. Описаны критерии формирования выборки звезд, поддерживающих горбы, даны примеры соответствующих орбит. Получена оценка вклада качающихся орбит в формирование горбов. Продемонстрировано, что при исключении отобранных звезд горбы исчезают. На основании сравнения наблюдательных и модельных распределений радиальных скоростей получены новые оценки возраста бара: 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.

В четвертой главе из анализа качающихся орбит: определяется момент начала колебаний орбит, поддерживавших горбы. Показано, что такие колебания начинаются не одновременно со стартом моделирования, а позже. Поскольку бар в процессе моделирования включается постепенно, были построены дополнительные модели, различающиеся только временем роста бара. Исследованы зависимости радиальной скорости от времени в разных моделях, проведена их аппроксимация затухающими колебаниями. Показано,

что при сдвиге всех зависимостей по времени на величину, пропорциональную времени роста бара с коэффициентом 0.54, колебания орбит происходят синхронно во всех моделях. Исследованы другие факторы, влияющие на значение коэффициента сдвига. Показано, что момент старта колебаний направления вытянутости орбит не зависит от времени роста бара.

Пятая глава посвящена исследованию потоков Геркулеса и анти-Геркулеса на плоскости скоростей (V_R , V_T). Установлено, что число звезд в этих областях по-разному изменяется со временем. Для области анти-Геркулеса обнаружены периодические изменения с характерным периодом около 1.8 млрд лет, что согласуется с ранее выявленным периодом порядка 2 млрд лет. Показано, что в области Геркулеса преобладают орбиты, поддерживающие внешнее кольцо R1, а в области анти-Геркулеса — поддерживающие кольцо R2.

В Заключение сформулированы основные результаты работы, даны выводы и перспективы дальнейших исследований. Отмечается, что многие особенности кинематики звезд в окрестности Солнца могут рассматриваться как прямое следствие резонансной настройки орбит вблизи OLR.

Научная новизна результатов диссертации определяется тем, что а ней построена новая численная модель гравитационного потенциала Галактики, включающая вклады балджа, диска, гало и бара. Из сравнения результатов моделирования с наблюдениями получены новые оценки параметров бара, такие как возраст, значение угловой скорости вращения и позиционного угла. Обнаружены периодические изменения морфологии резонансных колец, выражающиеся в периодическом усилении то лидирующих, то отстающих сегментов колец. Периодические изменения морфологии внешних колец поддерживаются качающимися орбитами, направление вытянутости которых совершает периодические колебания относительно большой оси бара. Показано, что качающиеся орбиты также вызывают периодическое увеличение радиальной скорости в диапазоне галактоцентрических расстояний 6.0–7.0 кпк (формирование горба).

Обнаружено, что вне зависимости от времени роста бара, колебания орбит начинаются в момент, когда бар достигает силы $Q_b = 0.170$. Показано, что в модельном диске формируется поток Геркулеса, аналогичный наблюдаемому. При этом область Геркулеса в модели представлена в основном звездами, находящимися на орбитах, поддерживающих внешнее резонансное кольцо R1.

Степень обоснованности научных положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, а также их достоверность. Все результаты диссертации обоснованы. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием высокоточных астрометрических данных из каталога Gaia, применением общепринятых статистических методов анализа данных, детальным анализом результатов и их сравнением с данными, полученными другими методами.

Полнота представления результатов. Основные результаты диссертации отражены в 5 научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором. Личный вклад диссертанта четко обозначен. Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных астрономических конференциях.

Замечания по диссертации:

1. Как известно (например, Khrapov, et al., *Galaxies* V. 9, Issue 2, id.29, 2021), пик скоростей на кривой вращения Галактики в центральной области ($R \approx 2$ кпк) определяется баром и зависит от его ориентации. Получается, что на рис. 1.3 (a) и (b) мы имеем параметры вращения Галактики на текущий момент. А в другие моменты времени кривая вращения Галактики будет различной. Если положения внешнего и внутренних резонансов Линдблада, находятся по данным графика рис. 1.3 (b), то в различные моменты времени их значения будут разными. В первую очередь, это коснется значений

внутренних линдбладовских резонансов, интересно также, насколько сильными могут быть отклонения от принятого значения $R_{OLR}=7$ кпк?

2 Радиус ядра гало имеет различные обозначения – в формуле (1.20) дан $R_c=8$ кпк, а в таблице 2 дан $R_h=8$ кпк.

3 Расстояния до звезд вычислялись как обратное значение параллакса. Диссертант справедливо указывает на необходимость устранения влияния звезд с большими относительными ошибками тригонометрических параллаксов (эффект Лутца-Келкера). При этом, не было принято во внимание известное систематическое смещение нуль-пункта параллаксов в каталоге Gaia, с величиной $\Delta\pi\sim-0.03$ миллисекунды дуги (Lindgren, et al., *Astron. Astrophys.* 616, A2, 2018), учет которого необходим при определении расстояний до любых звезд из этого каталога.

Заключение. Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, все вышеизложенное позволяет заключить, что диссертация Подзолковой Екатерины Николаевны “Влияние бара на кинематику диска Галактики вблизи внешнего линдбладовского резонанса” является законченным самостоятельным исследованием, выполненном на высоком научном уровне. 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) и удовлетворяет 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.

Автор диссертации - Подзолкова Екатерина Николаевна - безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией динамики Галактики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН)

Бобылев Вадим Вадимович

06 августа 2026 года

Контактные данные:

тел. +7-812-604-19-82 (доб. 7412), e-mail: vbobylev@gaoran.ru

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

Адрес места работы:

196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1,

ГАО РАН, лаборатория динамики Галактики

тел. +7-812-604-19-82 (доб. 7412), e-mail: vbobylev@gaoran.ru

Подпись В.В. Бобылева удостоверяю,

Ученый секретарь ГАО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

О. Ю. Барсунова