

ГОРБЫ НА ПРОФИЛЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ И ВОЗРАСТ ГАЛАКТИЧЕСКОГО БАРА

© 2024 г. А. М. Мельник^{1*}, Е. Н. Подзолкова^{1,2},

¹Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.; принята к публикации 11.09.2024 г.

Исследована модель Галактики с баром, которая хорошо воспроизводит распределения наблюдательных радиальных V_R и азимутальных V_T скоростей звезд вдоль Галактоцентрического расстояния R , полученных по данным *Gaia* DR3. Модельные профили распределения радиальной скорости V_R демонстрируют периодическое увеличение скорости V_R и формирование горба на расстояниях 6–7 кпк. Средняя амплитуда и период изменения скорости V_R составляют $A = 1.76 \pm 0.15$ км/с и $P = 2.1 \pm 0.1$ млрд лет. Мы вычислили углы θ_{01} , θ_{02} и θ_{03} , которые определяют ориентацию орбит относительно большой оси бара на интервалах времени соответственно 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет с начала моделирования. Звезды, орбиты которых меняют ориентацию следующим образом: $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$, $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$, вносят существенный вклад в формирование горбов. Доля орбит, захваченных качаниями (librations) вблизи внешнего линдбладовского резонанса (OLR), среди орбит, лежащих как внутри, так и снаружи OLR, составляет 28%. Медианное значение периода колебаний качающихся орбит составляет $P = 2.0$ млрд лет. Медианное значение периода P долгопериодических изменений углового момента и полной энергии звезд увеличивается по мере приближения энергии Якоби к значению, соответствующему OLR, после чего резко падает. Распределение звезд модели по периоду P имеет два максимума: $P = 0.6$ и 1.9 млрд лет. К первому максимуму концентрируются звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи радиуса коротации (CR). Распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR, зависит от ориентации орбит: орбиты, вытянутые перпендикулярно бару, концентрируются к первому максимуму, а орбиты, вытянутые параллельно бару, — ко второму максимуму. Тот факт, что наблюдательный профиль распределения скорости V_R , полученный по данным *Gaia* DR3, не имеет горба, указывает на то, что возраст Галактического бара, вычисленный с момента его выхода на полную мощность, должен лежать вблизи одного из двух значений: 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.

Ключевые слова: Galaxy: kinematics and dynamics, galaxies with bars, *Gaia* DR3.

DOI: 10.31857/S0320010824080017, EDN: LYCZWF

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасные наблюдения дают неопровержимые доказательства присутствия бара в Галактике. Позиционный угол бара относительно линии, соединяющей Солнце с центром Галактики составляет $\sim 40^\circ$ (Двек и др., 1995; Бенжамин и др., 2005; Кабрера-Лаверс и др., 2007; Гонсалес-Фернандес и др., 2012; Несс, Ланг, 2016). Оценки угловой скорости вращения бара Ω_b , полученные, в том числе, по кинематическим данным, дают значение Ω_b в диапазоне 40–60 км/с/кпк (Калнайс, 1991; Денен, 2000; Минчев и др., 2007; Герхард, 2011; Антоха и др., 2014; Монари и др., 2017; Мельник, 2019; Мельник и др., 2021; Азано и др., 2022, и другие работы).

Положение резонансов бара в галактическом диске определяется следующим условием:

$$\frac{m}{n} = \frac{\kappa}{\Omega - \Omega_b}, \quad (1)$$

где m — число полных эпициклических колебаний, которые звезда делает за n оборотов относительно бара. Отношение $m/n = 2/1$ соответствует положению внутреннего линдбладовского резонанса (ILR), а отношение $m/n = -2/1$ определяет радиус внешнего линдбладовского резонанса (OLR). Ультрагармонические резонансы $m/n = \pm 4/1$ также играют важную роль (Контонпулос, 1983; Контонпулос, Гросбол, 1989; Атанассула, 1992).

Оценки возраста Галактического бара существенно отличаются между собой. Коул, Вайнберг (2002) изучили распределение углеродных звезд (carbon stars) в Галактике и получили оценку возраста Галактического бара меньше 3 млрд лет. Исследования возрастов звезд в области Галактического балджа показали присутствие заметной доли звезд промежуточного возраста (2–5 млрд лет) (Натаф, 2016; Бенсби и др., 2017; Хассельквист и др., 2020, и другие работы). Недавние эпизоды звездообразования в области Галактического бара могут быть вызваны процессом формированием сильного бара. Непал и др. (2024) ис-

*Электронный адрес: anna@sai.msu.ru

следовали выборку высокометаллических (super-metal-rich) звезд в окрестности Солнца и нашли резкое изменение зависимости металличности от возраста примерно 3 млрд лет назад, что может указывать на конец эпохи формирования бара. Бови и др. (2019) оценили возраст Галактического бара в 8 млрд лет. Дебаттиса и др. (2019) моделировали X-образное распределение звезд разных возрастов по высоте и нашли, что возраст Галактического бара превышает 5 млрд лет. Сандерс и др. (2024) исследовали переменные типа Миры Кита в ядерном звездном диске и нашли, что возраст бара Галактики превышает 8 млрд лет.

Многие галактики с баром содержат внешние эллиптические резонансные кольца, которые формируются вблизи OLR бара. Различают два типа внешних колец: кольца R_1 , вытянутые перпендикулярно бару, и кольца R_2 , вытянутые параллельно бару. Внешнее кольцо R_1 лежит немного ближе к центру галактики, чем кольцо R_2 (Шварц, 1981; Бута, Крокер, 1991; Берд и др., 1994; Бута, 1995; Бута, Ком, 1996; Раутиайнен, Сало, 1999, 2000). Основой внешних колец служат устойчивые периодические орбиты, вблизи которых существует много квази-периодических орбит (Контопулос, Папаяннопулос, 1980; Контопулос, Гросбол, 1989).

Данные, поступающие со спутника *Gaia*, дают уникальную возможность исследовать движения звезд в широкой окрестности Солнца (Прусти и др., 2016; Кац и др., 2018; Браун и др., 2021; Линдегрэн и др., 2021; Вальенари и др., 2023).

Большое количество звезд в Галактике движется по орбитам, которые лежат как внутри, так и снаружи резонансов. Вайнберг (1994) показал, что вблизи ILR и OLR существуют два типа орбит: орбиты, которые меняют свою ориентацию относительно большой оси бара в определенном диапазоне углов, и орбиты, направление вытянутости которых прецессирует безо всяких ограничений по углам. Положение резонанса слегка смещается из-за эксцентриситета орбиты (Страк, 2015a,b). В последнее десятилетие изучение движения звезд вблизи резонансов привлекает особое внимание (Монари и др., 2017; Трик и др., 2021; Чиа и др., 2021, и другие работы).

Исследование кинематики и распределения молодых звезд в Галактике представило доказательства присутствия в диске двойного внешнего кольца $R_1 R_2$ (Мельник, Раутиайнен, 2009, 2011; Раутиайнен, Мельник, 2010; Мельник и др., 2015, 2016). Сравнение модельных скоростей со скоростями ОВ ассоциаций в звездно-газовых комплексах Персея, Стрельца и Местной системы показало, что угловая скорость вращения и позиционный угол бара Галактики должны составлять $\Omega_b = 50 \pm 2$ км/с/кпк и $\theta_b = 40^\circ - 52^\circ$ (Мельник, 2019).

Используя данные *Gaia* EDR3, мы исследовали распределение скоростей старых звезд диска вдоль Галактоцентрического расстояния R и нашли, что

наилучшее согласие между модельными и наблюдательными скоростями соответствует угловой скорости $\Omega_b = 55 \pm 3$ км/с/кпк, позиционному углу $\theta_b = 45^\circ \pm 15^\circ$ и возрасту Галактического бара 1.8 ± 0.5 млрд лет (Мельник и др., 2021). Мы обнаружили периодические усиления то лидирующих, то отстающих сегментов резонансных колец. В области внутреннего кольца период морфологических изменений составляет $P = 0.57 \pm 0.02$ млрд лет, что близко к периоду обращения по долгопериодическим орбитам вокруг точек равновесия L_4 and L_5 , равному 565 ± 2 млн лет. В области внешних колец период морфологических изменений равен $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет, что, вероятно, связано с орбитами, захваченными колебаниями вблизи OLR (Мельник и др., 2023).

Расстояние Солнца от центра Галактики было принято равным $R_0 = 7.5$ кпк (Глушкова и др., 1998; Никифоров, 2004; Эйзенхауэр и др., 2005; Бика и др., 2006; Нишияма и др., 2006; Фист и др., 2008; Гроенвеген и др., 2008; Рид и др., 2009; Дамбис и др., 2013; Фрэнсис, Андерсон, 2014; Беле и др., 2016; Бранхам, 2017; Иванек и др., 2023). В целом, выбор значения R_0 в диапазоне 7–9 кпк практически не влияет на наши результаты.

В настоящей работе мы исследуем возникновение горбов на профилях распределения радиальных скоростей V_R вдоль Галактоцентрического расстояния R . Период появления горбов равен $P \approx 2$ млрд лет, причем высота горбов уменьшается со временем. Мы показываем, что появление горбов связано с орбитами, захваченными колебаниями вблизи OLR, которые меняют свою ориентацию с периодом $P \approx 2$ млрд лет.

Статья организована следующим образом. Описание динамической модели дано в разделе 2. Появление горбов на профилях распределения радиальных скоростей обсуждается в разделе 3. Выборка звезд, создающих горбы, рассматривается в разделе 4. Примеры орбит, поддерживающих горбы, даны в разделе 5. Порядок симметрии и ориентация орбит, а также доля качающихся орбит вблизи OLR обсуждаются в разделе 6. Распределение звезд в плоскости (E_J, P) , где E_J — интеграл Якоби, рассматривается в разделе 7. Вклад звезд, создающих горбы, в колебания скоростей V_R и V_T обсуждается в разделе 8. Распределение звезд модели по периоду P представлено в разделе 9. Возраст Галактического бара обсуждается в разделе 10. Основные выводы даны в разделе 11.

2. МОДЕЛЬ

Мы используем 2D модель Галактики с аналитическим баром Феррера (де Вокулер, Фримен, 1972; Атанассула и др., 1983; Пфеннигер, 1984; Селлвуд, Уилкинсон, 1993; Бинни, Тремейн, 2008), которая хорошо описывает распределения радиальных V_R и азимутальных V_T скоростей вдоль Галактоцентрического расстояния R , полученных по данным *Gaia* EDR3 и

Gaia DR3. Большая и малая полуоси бара имеют значения $a = 3.5$ и $b = 1.35$ кпк. Угловая скорость бара равна $\Omega_b = 55$ км/с/кпк, что соответствует положению CR и OLR бара на расстояниях $R_{RC} = 4.04$ и $R_{OLR} = 7.00$ кпк. Ультрагармонический резонанс $-4/1$ расположен на расстоянии $R_{-4/1} = 5.52$ кпк. Масса бара равна $1.2 \times 10^{10} M_\odot$. В начальный момент времени модельный диск имеет осесимметричное распределение потенциала, а неосесимметричные компоненты растут медленно. Бар набирает полную силу за 4 оборота бара, что соответствует времени $T_g \sim 0.45$ млрд лет. Такое значение времени роста бара согласуется с оценками, полученными в N-body моделях для галактик с доминирующим диском (Раутиайнен, Сало, 2000; Раутиайнен, Мельник, 2010). Масса бара сохраняется в процессе роста. Сила бара после выхода на полную мощность равна $Q_b = 0.3142$, что соответствует сильным барам (Блок и др., 2001; Бута и др., 2004; Диас-Гарсия и др., 2016).

Позиционный угол Солнца относительно направления большой оси бара был принят равным $\theta_\odot = -45^\circ$. Так как наша модель имеет порядок симметрии $m = 2$, то оба значения позиционного угла: $\theta_\odot = -45^\circ$ и 135° равнозначны.

Модель включает экспоненциальный диск с характерным масштабом $R_d = 2.5$ кпк и массой $M_d = 3.25 \times 10^{10} M_\odot$. Полная масса бара и диска равна $4.45 \times 10^{10} M_\odot$, что согласуется с оценками массы Галактического диска (Шен и др., 2010; Фудзии и др., 2019).

Модель также включает классический балдж с массой $M_{bg} = 5 \times 10^9 M_\odot$ (Натаф, 2017; Фудзии и др., 2019) и изотермическое гало (Бинни, Трмейн, 2008).

Общая кривая вращения модельной Галактики является плоской на периферии. Угловая скорость вращения на расстоянии Солнца равна $\Omega_0 = 30.0$ км/с/кпк, что соответствует значению, полученному из анализа кинематики ОВ-ассоциаций (Мельник, Дамбис, 2020). Более детальное описание модели дано в работе Мельник и др. (2021).

Модельный диск включают 2×10^6 безмассовых частиц. Время моделирования составляет 6 млрд лет. Мы увеличили время моделирования с 3 до 6 млрд лет, чтобы показать, что появление горбов на профиле распределения радиальных скоростей является периодическим процессом.

3. ГОРБЫ НА ПРОФИЛЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ

Рис. 1 показывает профили распределения модельных радиальных скоростей V_R вдоль Галактоцентрического расстояния R , усредненные на интервалах времени 0.5 млрд лет (50 моментов времени с шагом 10 млн лет). Также показано распределение наблюдательных скоростей, выведенных по данным *Gaia* DR3. Для построения наблюдательных профилей мы ис-

пользовали $\sim 9.62 \times 10^6$ звезд *Gaia* DR3, расположенных вблизи плоскости Галактики, $|z| < 200$ пк, и в узком секторе азимутальных углов, $|\theta| < 15^\circ$, имеющих известные лучевые скорости и собственные движения, отношение параллакса к ошибке параллакса $\varpi/\varepsilon_\varpi > 5$ и ошибку RUWE < 1.4 . Для построения модельных профилей распределения скоростей использовались звезды модельного диска, лежащие в секторе $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ в разные моменты времени. Медианные значения скорости V_R вычислялись в бинах по расстоянию шириной $\Delta R = 250$ пк. Метод получения медианных скоростей и их ошибок подробно описан в работе Мельник и др. (2021, раздел 2). Случайные ошибки наблюдательных медианных скоростей V_R , вычисленные в бинах в диапазоне расстояний 5–10 кпк, составляют в среднем 0.1 км/с. Аналогичные ошибки, вычисленные для мгновенных модельных скоростей, равны 0.6 км/с, но они уменьшаются до 0.1 км/с после усреднения по времени. В целом, профили демонстрируют плато с $V_R \approx 5$ км/с на расстояниях 5–7 кпк, за которым следует плавное падение до значений $V_R \approx -3$ км/с на расстоянии $R = 8.5$ кпк, которое сменяется ростом или плато. Хорошо видно, что модельное значение V_R на расстояниях 6–7 кпк увеличивается в периоды времени 0.5–1.0, 1.0–1.5, 3.0–3.5 и 5.0–5.5 млрд лет, что приводит к появлению горбов на профилях распределения скоростей V_R . Первое появление горба охватывает широкий промежуток времени от 0.6 до 1.8 млрд лет, но в дальнейшем горбы возникают через ~ 2 млрд лет и существуют ~ 1 млрд лет. Кроме того, высота горбов уменьшается со временем.

Мы не приводим здесь профили распределения азимутальных скоростей V_T , хотя горбы на них тоже появляются, что будет обсуждаться ниже.

Рис. 2 показывает медианные значения радиальной V_R и азимутальной V_T скоростей звезд модельного диска, лежащих в секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и в одном бине по расстоянию ($6.625 < R < 6.875$ кпк), в разные моменты времени. Середина бина соответствует расстоянию $R = 6.75$ кпк. Именно в этом бине амплитуда колебания скорости V_R имеет максимальное значение. Рассматриваются все звезды модельного диска, которые попадают в указанный сегмент в рассматриваемые моменты времени. Медианные скорости V_R и V_T были вычислены для 601 момента времени, разнесенных друг от друга на 10 млн лет, а затем полученные медианные скорости были усреднены на интервалах 100 млн лет.

Изменения скоростей V_R были представлены в виде гармонических колебаний с периодом P , амплитудой A , начальной фазой φ и средней скоростью $\bar{V}_R$. Параметры колебаний скорости V_R определялись из решения системы уравнений:

$$V_{R,n} = \bar{V}_R + A \sin(2\pi t_n/P + \varphi), \quad (2)$$

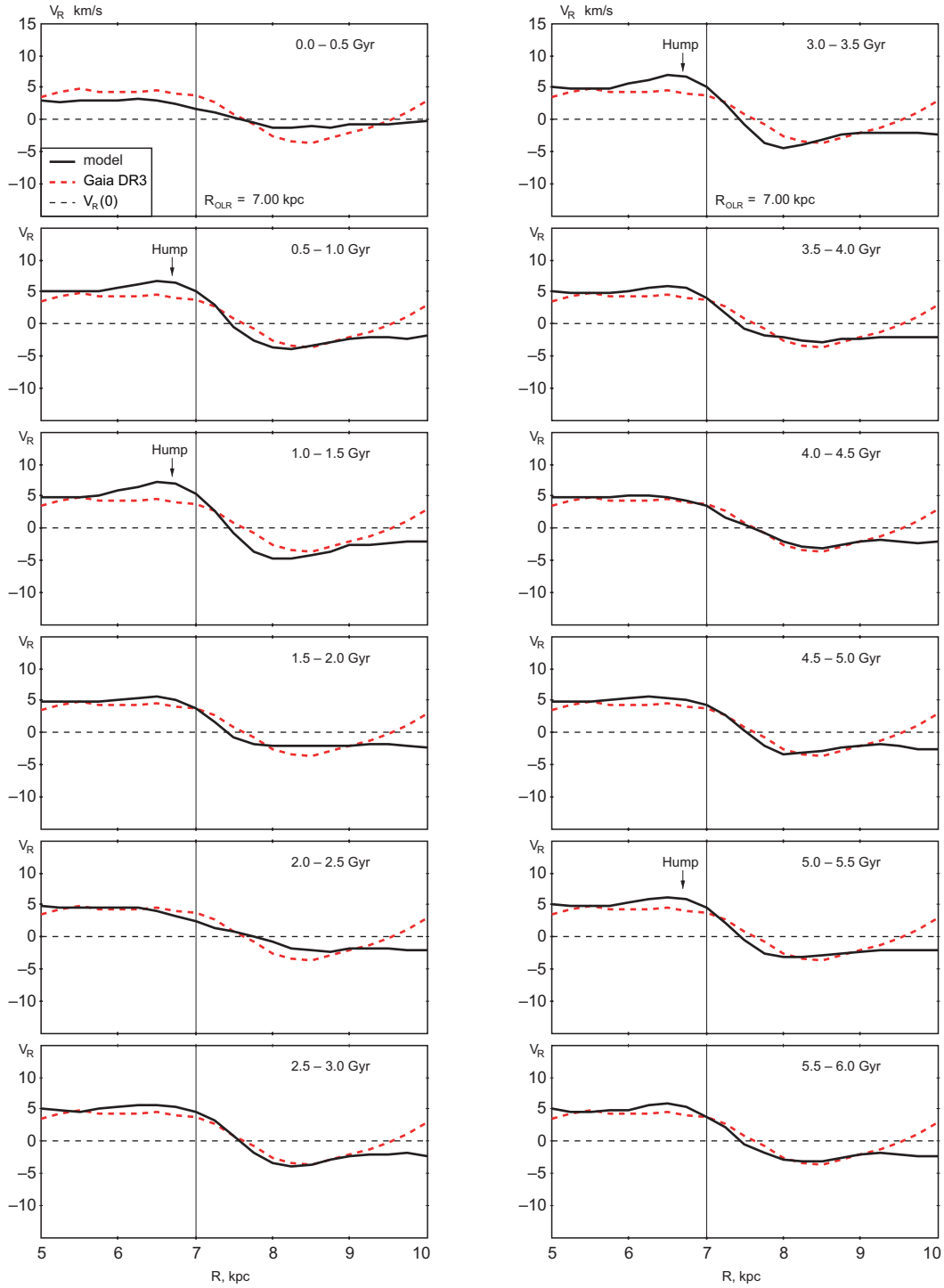


Рис. 1. Распределения модельных радиальных скоростей V_R вдоль Галактоцентрического расстояния R , усредненных на интервалах времени 0.5 млрд лет (черная линия). Распределение наблюдательной скорости V_R , выведенной по данным *Gaia* DR3 (красная пунктирная линия). Для построения модельных и наблюдательных профилей мы используем звезды, расположенные в узком секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$. Медианные значения скорости V_R вычисляются в бинах шириной 250 пк. Случайные ошибки в определении медианной скорости V_R меньше толщины линий. В целом, профили демонстрируют плато с $V_R \approx 5$ км/с на расстояниях 5–7 кпк, за которым следует плавное падение до значений $V_R \approx -3$ км/с на расстоянии $R = 8.5$ кпк, которое сменяется ростом или плато. Модельные профили скоростей формируют горбы (отмеченные стрелками) на расстояниях 6–7 кпк в периоды времени 0.5–1.0, 1.0–1.5, 3.0–3.5 и 5.0–5.5 млрд лет.

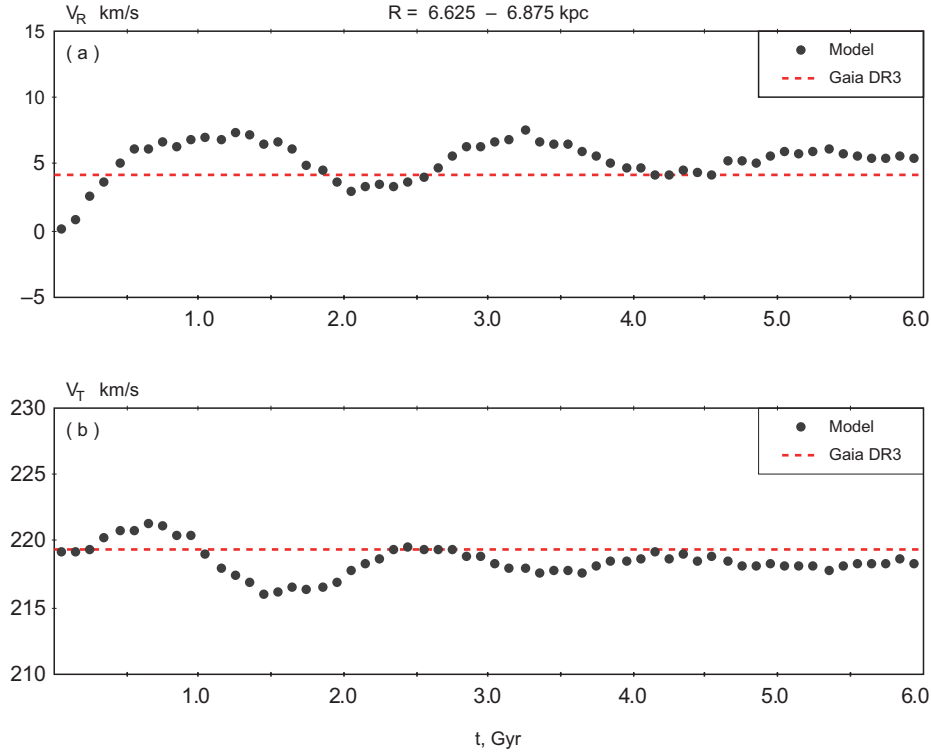


Рис. 2. Медианные значения (а) радиальной V_R и (б) азимутальной V_T скоростей звезд модельного диска, лежащих в секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и в одном бине по расстоянию ($6.625 < R < 6.875$ кпк), в разные моменты времени. Также показано наблюдательное значение скорости в указанном сегменте, полученное по данным *Gaia* DR3 (красная пунктирная линия).

где $V_{R,n}$ — скорости V_R в моменты времени t_n , $n = 0, \dots, 60$. (2) можно переписать в следующем виде:

$$V_{R,n} = \bar{V}_R + C_1 \cos(2\pi t_n/P) + C_2 \sin(2\pi t_n/P). \quad (3)$$

Мы использовали стандартный метод наименьших квадратов для решения системы из 61 уравнения, которые являются линейными по параметрам C_1 , C_2 и $\bar{V}_R$ для каждого значения нелинейного параметра P , и затем определяли значение P , которое минимизирует сумму нормализованных уклонений χ^2 . Амплитуда A и фаза φ определяются следующими выражениями:

$$A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (4)$$

и

$$\varphi = \arctan \frac{C_1}{C_2}. \quad (5)$$

Неопределенность в значении A можно оценить через неопределенности ε_1 и ε_2 в параметрах C_1 и C_2 , соответственно:

$$\varepsilon_A = \frac{\sqrt{C_1^2 \varepsilon_1^2 + C_2^2 \varepsilon_2^2}}{A}. \quad (6)$$

Параметры колебаний скорости V_T вычисляются аналогичным образом.

Рис. 2(а) показывает медианные скорости V_R звезд, лежащих в указанном сегменте модельного диска, в разные моменты времени. Средняя амплитуда и фаза колебаний скорости V_R , вычисленные на интервале 6 млрд лет, составляют $A = 1.76 \pm 0.15$ км/с и $\varphi = 257^\circ \pm 5^\circ$. Средняя скорость на интервале 6 млрд лет равна $\bar{V}_R = 5.2 \pm 0.1$ км/с, что немного превышает значение скорости, полученной по данным *Gaia* DR3, $V_R = 4.15 \pm 0.04$ км/с. Максимальная высота горба равна 1.90 ± 0.12 км/с. Модельный диск формирует первый, второй и третий горбы соответственно в периоды времени 0.6–1.8, 3.0–3.8 и 5.0–5.8 млрд лет с начала моделирования. Высота горбов уменьшается со временем. Период изменения скорости V_R равен $P = 2.1 \pm 0.1$ млрд лет.

Рис. 2(б) показывает периодические изменения скорости V_T звезд в указанном сегменте модельного диска. Средняя амплитуда и начальная фаза колебаний скорости V_T составляют $A = 1.24 \pm 0.14$ км/с и $\varphi = 329^\circ \pm 6^\circ$. Средняя скорость равна $\bar{V}_T = 218.5 \pm 0.1$ км/с, что немного меньше значения скорости, полученной по данным *Gaia* DR3, $V_T = 219.30 \pm 0.03$ км/с. Высота горбов также уменьшается со временем. Период изменения скорости V_T равен $P = 1.9 \pm 0.1$ млрд лет.

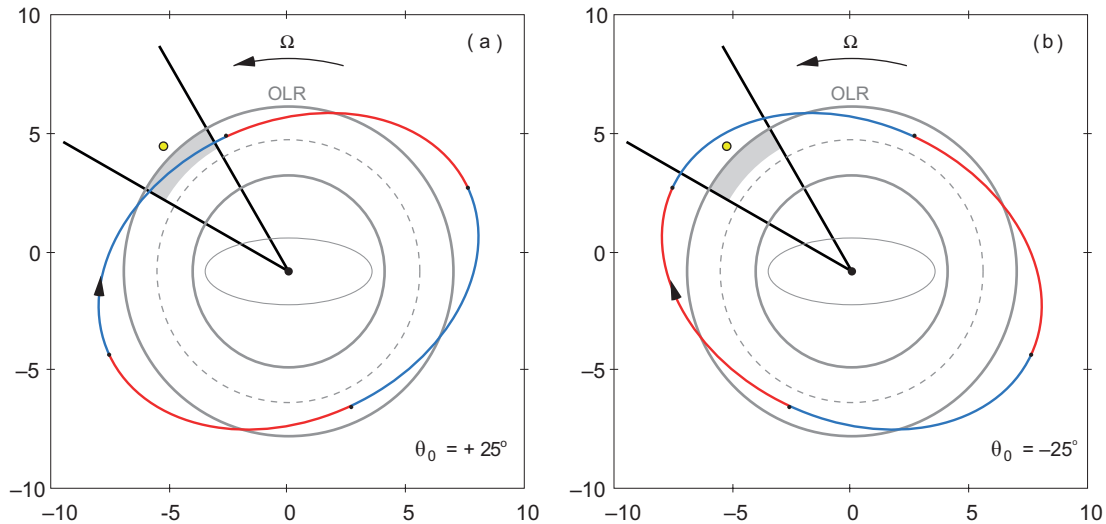


Рис. 3. Схематичное изображение двух орбит, ориентированных под углами (а) $\theta_0 = 25^\circ$ и (б) $\theta_0 = -25^\circ$ к большой оси бара. Галактика вращается против часовой стрелки, но в системе отсчета бара, звезды, расположенные за пределом CR, вращаются против галактического вращения. Показаны сегменты орбит, на которых звезды приближаются ($V_R < 0$, синие линии) к центру Галактики и удаляются ($V_R > 0$, красные линии) от него. Предположительное положение Солнца показано желтым кружком. Также показан сектор азимутальных углов, $\theta = 135^\circ \pm 15^\circ$, в котором вычисляются медианные скорости звезд. Сегмент диска, где формируются горбы, ограничен расстояниями 6–7 кпк и выделен серым цветом. Также показаны положения бара (эллипс), CR и OLR (сплошные серые линии), резонанса $-4/1$ (пунктирная серая линия). Хорошо видно, что при ориентации орбиты под углом $\theta_0 = 25^\circ$ звезда проходит через область, где формируются горбы, с отрицательной радиальной скоростью ($V_R < 0$). Следовательно, такие звезды “тянут” медианное значение скорости V_R в сторону более отрицательных значений, что способствует созданию впадин. При ориентации орбиты под углом $\theta_0 = -25^\circ$, звезда пролетает рядом с Солнцем на расстоянии $R > R_{OLR}$ и просто уходит из области, где формируются горбы.

Таким образом, скорости V_R и V_T , вычисленные для сегмента модельного диска: $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк, показывают изменения с периодом $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет. Амплитуда изменений скоростей составляет 1–2 км/с, но ее статистическая значимость (отношение амплитуды к ошибке ее определения) превышает 8σ .

4. ВЫБОРКА ЗВЕЗД, СОЗДАЮЩИХ ГОРБЫ

4.1. Критерий отбора

Мы нашли звезды, которые создают горбы на профиле распределения радиальных скоростей V_R . Звезды, захваченные линдбладовскими резонансами, имеют свойство периодически менять направление вытянутости орбиты относительно большой оси бара (Вайнберг, 1994). Мы отобрали звезды, орбиты которых ориентированы так, что они имеют отрицательные скорости в секторе $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и диапазоне расстояний $R = 6\text{--}7$ кпк в определенные периоды времени, а в другие периоды времени просто уходят из рассматриваемой области.

Мы вычислили углы θ_{01} , θ_{02} и θ_{03} , которые определяют направление вытянутости орбит относительно большой оси бара на интервалах времени соответственно 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет с начала моделирования. Оказалось, что звезды, орбиты которых меняют ориентацию следующим образом: $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$,

$-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$, вносят существенный вклад в формирование горбов. Наша выборка включает 26308 звезд, что составляет только 9% от всех звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи радиуса OLR.

Рис. 3 показывает две эллиптические орбиты, ориентированные под углами (а) $\theta_0 = 25^\circ$ и (б) $\theta_0 = -25^\circ$ к большой оси бара. Изменение ориентации орбит приводит к возникновению горбов. Галактика вращается против часовой стрелки, но в системе отсчета, вращающейся с угловой скоростью бара, звезды, расположенные за пределом CR, вращаются по часовой стрелке. Сегменты орбит, на которых звезды приближаются ($V_R < 0$) и удаляются ($V_R > 0$) от центра Галактики, выделены разными цветами. Мы предполагаем, что азимутальный угол Солнца относительно бара составляет $\theta_\odot = 135^\circ$. Также показан сектор азимутальных углов $\theta = 135 \pm 15^\circ$, в котором вычисляются медианные скорости звезд. Сегмент 6–7 кпк, где формируются горбы, выделен серым цветом. Хорошо видно, что звезда, двигающаяся по орбите, ориентированной под углом $\theta_0 = 25^\circ$ (рис. 3а), проходит с отрицательной радиальной скоростью ($V_R < 0$) через область, где формируются горбы. Следовательно, такие звезды “тянут” медианное значение скорости V_R в сторону более отрицательных значений, что способствует созданию впадин. При ориентации орбиты под

углом $\theta_0 = -25^\circ$, звезда пролетает рядом с Солнцем на расстоянии $R > R_{OLR}$ и просто уходит из области, где формируются горбы. Именно уход звезд с отрицательными скоростями ($V_R < 0$) из интересующей нас области вызывает появление горбов (см. также раздел 8).

Если звезда движется по эллиптической орбите, ориентированной под углом $\theta_0 = 45^\circ$ к большой оси бара, то она пересекает линию, соединяющую Солнце и центр Галактики, с нулевой радиальной скоростью $V_R = 0$ (рис. 3). При ориентации орбиты под углом $0^\circ < \theta_0 < 45^\circ$ ($45^\circ < \theta_0 < 90^\circ$), звезда, пролетая рядом с Солнцем, имеет отрицательную (положительную) радиальную скорость. Оказалось, что горбы создают звезды, орбиты которых ориентированы под углами $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$, $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$ в периоды времени соответственно 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет. Можно сказать, что эти орбиты создают впадины в периоды времени 0–1 и 2–3 млрд лет, а их уход из рассматриваемой области приводит к увеличению медианной скорости V_R и появлению горба.

Заметим, что одно и тоже требование к ориентации орбиты в периоды времени 0–1 млрд лет ($0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$) и 2–3 млрд лет ($0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$) способствует отбору орбит с периодом изменения ориентации близким, но не строго равным 2 млрд лет.

Требование к ориентации орбиты под углом $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ в период времени 1–2 млрд лет приводит к появлению дополнительного количества звезд с отрицательными радиальными скоростями ($V_R < 0$) за пределами OLR, $R > R_{OLR}$ (рис. 3б). Присутствие этих звезд “тянет” медианную радиальную скорость, вычисленную в секторе $\theta = 135 \pm 15^\circ$, в сторону более отрицательных значений. Но скорость V_R демонстрирует плавное падение на интервале расстояний $R_{OLR} < R < R_{OLR} + 1$ кпк (рис. 1). Поэтому появление дополнительных звезд с отрицательными радиальными скоростями ($V_R < 0$) делает это падение более крутым.

4.2. Начальные координаты и скорости звезд, создающих горбы

Рис. 4 показывает различные зависимости, полученные для начальных координат и скоростей звезд, создающих горбы. Здесь представлены гистограммы распределения звезд по расстоянию R в начальный момент времени ($t = 0$), на которые наложены распределения других величин. В каждом бине по R были вычислены медианные значения (а) начальной азимутальной скорости V_T , (б) периода P изменения углового момента L и полной энергии E , (с) начальной радиальной скорости V_R и (д) начального азимутального угла θ . Красные вертикальные линии показывают медианные значения дисперсии $+/-\sigma$ для соответствующих величин (половина центрального интервала, содержащего 67% всех звезд).

Рис. 4(а) показывает зависимость начальной азимутальной скорости V_T от расстояния R . Хорошо вид-

но уменьшение медианных значений V_T с увеличением R . Серая линия показывает среднее значение начальной азимутальной скорости $\overline{V_T}$, которая вычисляется из уравнения Джинса и относится ко всем звездам, расположенным на данном расстоянии в момент времени $t = 0$ (Мельник и др., 2021, раздел 3.2). Благодаря влиянию асимметричного дрейфа (asymmetric drift), скорость $\overline{V_T}$ всегда меньше скорости кривой вращения V_c , и на расстоянии OLR их разность составляет $\overline{V_T} - V_c = -7$ км/с. Пересечение серой линии и линии, проведенной через красные кружки, соответствует бину $R = 7.00\text{--}7.25$ кпк, где в начальный момент расположено максимальное количество звезд, создающих горбы.

В целом, уменьшение значений V_T с увеличением R легко понять (рис. 4а). Звезды, создающие горбы, обязательно должны пересекать радиус OLR. Следовательно, звезды, расположенные в начальный момент времени на меньшем (большем) расстоянии, чем радиус OLR, $R < R_{OLR}$ ($R > R_{OLR}$), должны “подниматься” (“спускаться”) до радиуса OLR. Поэтому они должны иметь в среднем больший (меньший) угловой момент, а следовательно большую (меньшую) азимутальную скорость V_T , чем другие звезды на данном расстоянии.

Рис. 4(б) показывает изменения периода P колебаний углового момента и энергии звезд, создающих горбы, с изменением начального расстояния R (см. также раздел 5). Медианные значения периода P для бинов по расстоянию $R = 5.75\text{--}8.00$ кпк лежат в диапазоне $P = 1.70\text{--}1.91$ млрд лет. Медианное значение периода P , вычисленного для всех звезд, создающих горбы, составляет 1.85 млрд лет.

Рис. 4(с) показывает распределение медианных значений начальной радиальной скорости V_R звезд, создающих горбы. Хорошо видно, что медианные скорости V_R малы и лежат в диапазоне $[-3, +2]$ км/с на интервале расстояний $R = 5.75\text{--}8.50$ кпк. Что касается дисперсии радиальных скоростей, то она составляет ~ 30 км/с и уменьшается с увеличением расстояния, что отражает общую тенденцию дисперсий скоростей уменьшаться на периферии.

Рис. 4(д) показывает медианные значения начального азимутального угла θ в каждом бине по расстоянию R . Хорошо видно, что угол θ рывками меняется от $+45^\circ$ до -32° на интервале $R = 4.0\text{--}8.5$ кпк, а вблизи OLR ($R_{OLR} = 7.00$ кпк) его значение близко к нулю.

5. ПРИМЕРЫ ОРБИТ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ ГОРБЫ

Рис. 5(а) представляет типичную орбиту звезды, поддерживающую горбы. Орбита показана в системе отсчета вращающегося бара, в которой рассматриваемая звезда вращается в направлении, противоположном вращению Галактики. Предположительное положение Солнца показано желтым кружком. В началь-

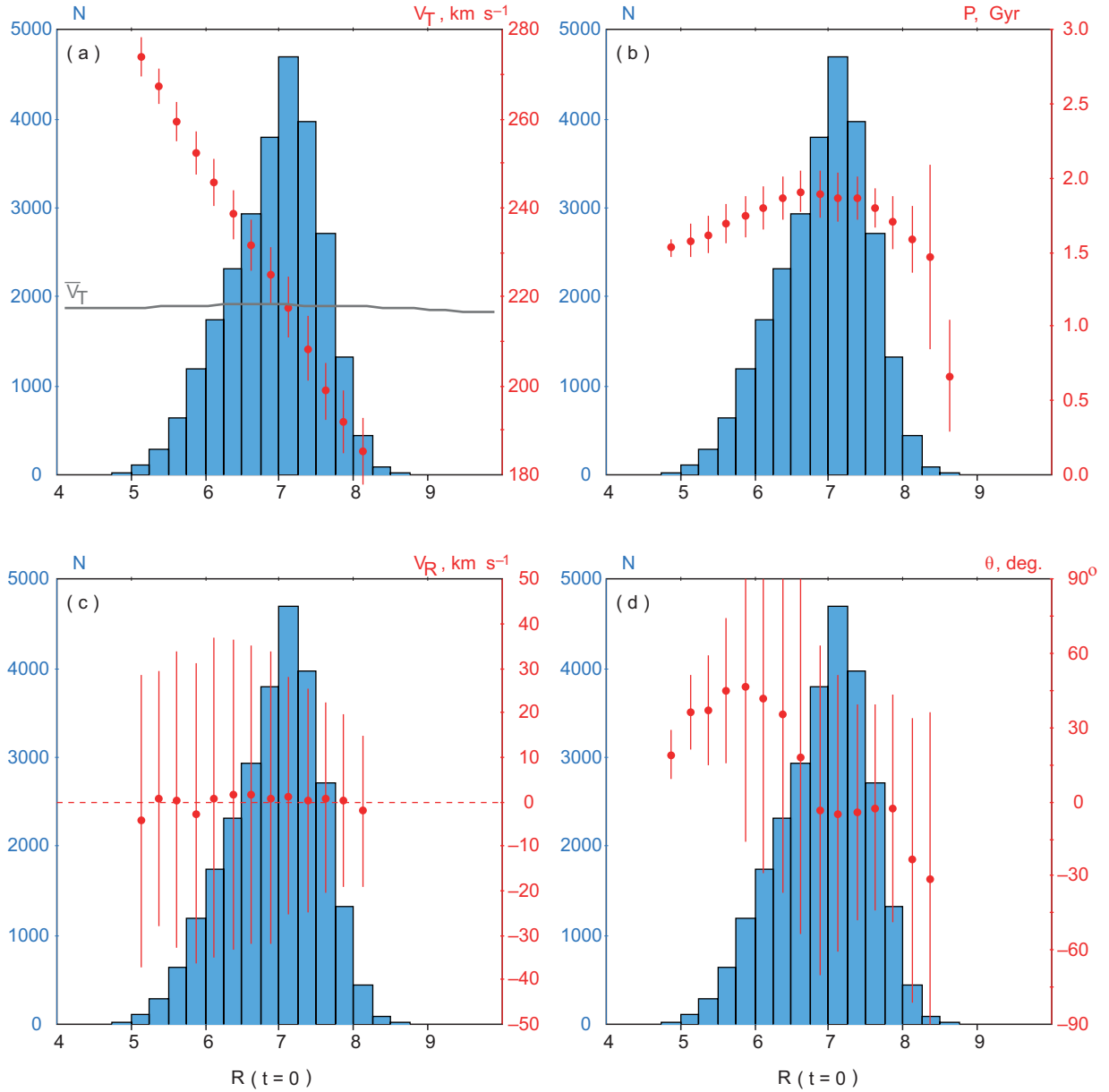


Рис. 4. Гистограммы распределения звезд, создающих горбы, по расстоянию R в начальный момент времени (синие столбики), на которые наложено распределение других параметров. В каждом бине по R были вычислены медианные значения (а) начальной азимутальной скорости V_T , (б) периода P изменения углового момента и полной энергии, (с) начальной радиальной скорости V_R и (д) начального азимутального угла θ (красные кружки). Красные вертикальные линии показывают $\pm \sigma$. (а) Хорошо видно уменьшение начального значения V_T с увеличением R . Серая линия показывает средние значения азимутальной скорости $\bar{V}_T$ всех звезд, расположенных на данном расстоянии в момент $t = 0$. Пересечение серой линии и линии, проведенной через красные кружки, соответствует бину $R = 7.00\text{--}7.25$ кпк, где в начальный момент расположено максимальное количество звезд, создающих горбы. (б) Медианные значения периода P на интервале расстояний $R = 5.75\text{--}8.00$ кпк лежат в диапазоне $P = 1.70\text{--}1.91$ млрд лет. (с) Медианные значения начальной радиальной скорости V_R звезд, создающих горбы, близки к нулю при дисперсии скоростей ~ 30 км/с. (д) Медианные значения азимутального угла θ , характеризующие положение звезды при $t = 0$, рывками меняются от $+45^\circ$ до -32° на интервале $R = 4.0\text{--}8.5$ кпк, а вблизи OLR ($R_{OLR} = 7.00$ кпк) угол θ имеет близкое к нулю значение.

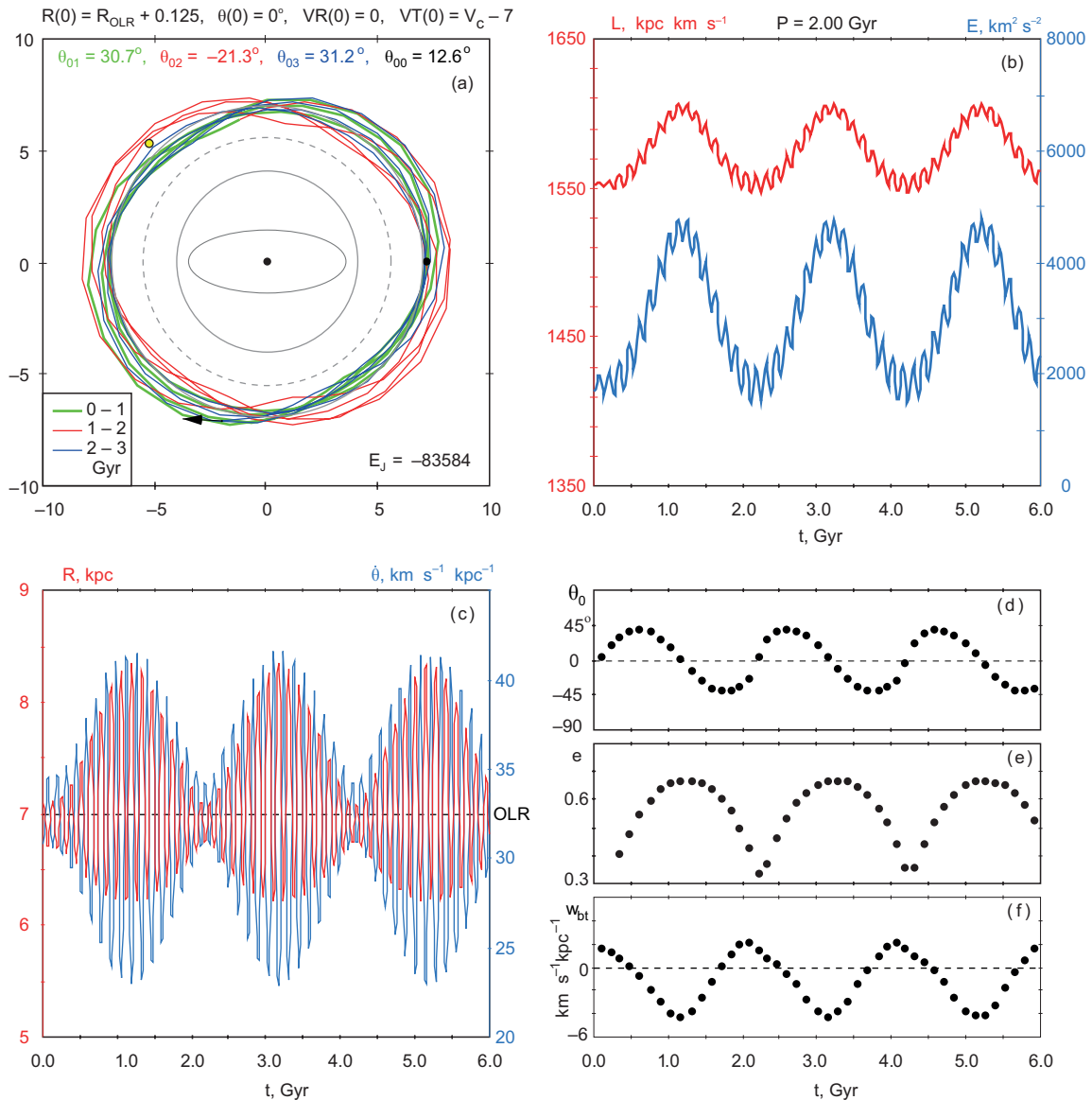


Рис. 5. Пример типичной орбиты, поддерживающей горбы. (а) Орбита в системе отсчета вращающегося бара, в которой рассматриваемая звезда вращается по часовой стрелке. Предположительное положение Солнца показано желтым кружком. В начальный момент времени звезда расположена на расстоянии $R = R_{OLR} + 0.125$ кпк в направлении большой оси бара, $\theta = 0^\circ$ (черный кружок), и имеет радиальную и азимутальную скорости соответственно $V_R = 0$ и $V_T = V_c - 7$ км/с. Орбита звезды в периоды времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет показана соответственно зеленым, красным и синим цветом. Углы θ_{01} , θ_{02} , θ_{03} и θ_{00} определяют ориентацию орбиты относительно большой оси бара в периоды времени 0–1, 1–2, 2–3 млрд лет и на всем интервале 0–3 млрд лет и представлены соответственно зеленым, красным, синим и черным цветом. Хорошо видно, что орбита звезды наклонена вправо (в направлении противоположном вращению Галактики) в периоды времени 0–1 и 2–3 и влево в период 1–2 млрд лет. Также показаны положения бара (эллипс), CR и OLR (сплошные серые линии), резонанса $-4/1$ (пунктирная серая линия), и указано значение E_J . Расстояния, скорости и E_J представлены соответственно в единицах кпк, км/с и км²/с². (б) Изменение углового момента L (красная линия) и полной энергии E (синяя линия) звезды в период времени 0–6 млрд лет. Хорошо видно присутствие короткопериодических и долгопериодических изменений L и E . Период долгопериодических изменений L и E составляет $P = 2.0$ млрд лет. Масштабы изменений L и E показаны соответственно на левой и правой вертикальных осях. (в) Изменение расстояния R (красная линия) и мгновенной угловой скорости $\dot{\theta}$ (синяя линия). Положение OLR показано пунктирной линией. Хорошо видно, что изменения R и $\dot{\theta}$ имеют форму биений. Масштабы изменений R и $\dot{\theta}$ показаны соответственно на левой и правой вертикальных осях. (г) Изменение угла θ_0 , определяющего ориентацию орбиты на интервале одного радиального колебания, со временем. Хорошо видно, что угол θ_0 медленно меняется от $+45^\circ$ до -45° , а затем быстро возвращается обратно. (е) Изменение эксцентриситета орбиты e , вычисленного на интервале одного радиального колебания. (ф) Изменение частоты биений w_{bt} , которая принимает как положительные, так и отрицательные значения.

ный момент времени звезда расположена на расстоянии $R = 7.125$ кпк в направлении большой оси бара и имеет радиальную и азимутальную скорости соответственно $V_R = 0$ и $V_T = V_c - 7$ км/с, которые являются наиболее вероятными значениями V_R и V_T на данном расстоянии в момент $t = 0$. Углы $\theta_{01} = 30.7^\circ \pm 2.1^\circ$, $\theta_{02} = -21.3^\circ \pm 2.3^\circ$ и $\theta_{03} = 31.2^\circ \pm 2.7^\circ$ определяют ориентацию орбиты относительно большой оси бара в периоды времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет и удовлетворяют требованию $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$, $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$, что необходимо для включения звезды в выборку звезд, создающих горбы. Хорошо видно, что орбита звезды наклонена вправо (по часовой стрелке) в периоды времени 0–1 и 2–3 и влево в период 1–2 млрд лет.

Угол $\theta_{00} = 12.6^\circ \pm 2.9^\circ$ определяет ориентацию орбиты на всем интервале времени 0–3 млрд лет. Так как значение θ_{00} мало, $\theta_{00} < 15^\circ$, то мы можем заключить, что рассматриваемая орбита в целом поддерживает внешнее кольцо R_2 , вытянутое параллельно бару.

В галактиках с баром не сохраняются ни угловой момент звезды L , ни ее полная энергия E , но для стационарного бара сохраняется их линейная комбинация в виде интеграла Якоби E_J (например, Бинни, Треймейн, 2008):

$$E_J = E - \Omega_b L. \quad (7)$$

В нашей модели интеграл Якоби сохраняется после выхода бара на полную мощность, $t > T_g$, где $T_g = 0.45$ млрд лет. Рассматриваемая звезда имеет значение $E_J = -83\,584 \text{ км}^2/\text{с}^2$, который сохраняется до единицы последнего знака при $t > T_g$.

Рис. 5(b) показывает изменения удельного углового момента L и удельной полной энергии E рассматриваемой звезды в период времени 0–6 млрд лет. Хорошо видно присутствие короткопериодических и долгопериодических колебаний L и E с периодами соответственно $P = 130 \pm 10$ млн лет и 2000 ± 20 млн лет. Короткопериодические колебания характерны для всех звезд модели и возникают дважды за период обращения звезды относительно бара. Долгопериодические колебания имеют большую амплитуду и возникают у звезд вблизи резонансов.

Рис. 5(c) показывает изменения расстояния R и мгновенной угловой скорости $\dot{\theta}$. Хорошо видно, что колебания R и $\dot{\theta}$ имеют форму биений, для которых характерно периодическое изменение амплитуды колебаний. Рассматриваемая звезда пересекает радиус OLR при каждом радиальном колебании, но средние значения R и $\dot{\theta}$ также медленно меняются. Изменения R и $\dot{\theta}$ происходят в противофазе.

Мы выделили промежутки времени от одного пересечения звезды радиуса OLR с отрицательной радиальной скоростью $V_R < 0$ до другого и на каждом промежутке вычислили средние значения $\bar{R}$ и $\bar{\theta}$. Пример

таких колебаний $\bar{R}$ и $\bar{\theta}$ можно найти в работе Мельник и др. (2023, рис. 11e).

Рис. 5(d) показывает изменение угла θ_0 , определяющего направление вытянутости орбиты на интервале одного радиального колебания. Угол θ_0 отсчитывается от направления большой оси бара. Хорошо видно, что угол θ_0 медленно меняется от $+45^\circ$ до -45° , а затем быстро обратно.

Рис. 5(e) показывает изменение эксцентриситета орбиты e , вычисленного на интервале одного радиального колебания. Эксцентриситет меняется в диапазоне $e = 0.34\text{--}0.67$. Заметим, что минимум эксцентриситета соответствует минимуму среднего расстояния $\bar{R}$.

Рис. 5(f) показывает изменения угловой частоты биений w_{bt} , вычисленной на интервале одного радиального колебания. Угловая частота биений определялась из соотношения:

$$w_{bt} = \kappa(\bar{R}) + 2(\bar{\theta} - \Omega_b), \quad (8)$$

где $\bar{R}$ и $\bar{\theta}$ меняются со временем. Частота биений w_{bt} является частным случаем резонансной частоты (например, Чибя и др., 2021). При вычислении эпиклической частоты κ мы учитывали поправку, связанную с эксцентриситетом орбиты (Страк, 2015a,b). Максимальная поправка к значению κ составляет 0.59 км/с/кпк , что мало по сравнению со значениями $\kappa(\bar{R}) = 43.5\text{--}46.4 \text{ км/с/кпк}$. Видно, что w_{bt} принимает как положительные, так и отрицательные значения, что означает изменение направления смещения угла θ_0 (см. также раздел 6.2).

Рис. 6 показывает еще два примера орбит, создающих горбы. Ориентация обеих орбит в периоды времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет удовлетворяет критерию $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$, $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$. В начальный момент времени обе звезды находятся на некотором удалении от радиуса OLR: первая звезда (a) находится ближе к центру Галактики, $R = R_{OLR} - 1.00$ кпк, а вторая звезда (b) — дальше от центра, $R = R_{OLR} + 0.75$ кпк. Чтобы орбита удовлетворяла приведенному выше критерию, начальные азимутальные скорости этих звезд должны сильно отличаться от скорости кривой вращения V_c . Заметим, что первая (вторая) звезда имеет начальную скорость на 30 км/с больше (меньше) скорости кривой вращения $V_c \text{ км/с}$ на соответствующем расстоянии, что в целом отражает общую тенденцию (рис. 4a).

Рис. 6 также показывает периоды изменения углового момента и энергии рассматриваемых звезд, которые составляют $P = 1.69$ и 1.68 млрд лет. Заметим, что эти значения несколько меньше периода $P = 2.00$ млрд лет, полученного для звезды, представленной на рис. 5. И это отражает общую тенденцию: медианное значение периода P уменьшается по мере удаления начального положения звезды от радиуса OLR (рис. 4b).

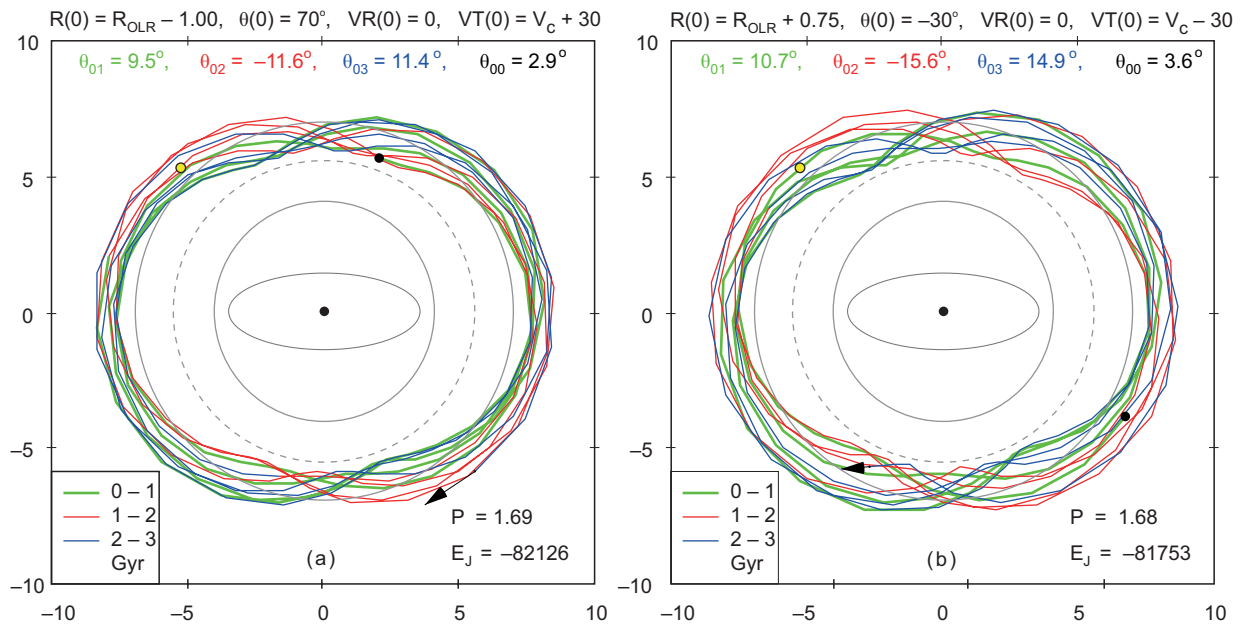


Рис. 6. Другие примеры орбит, поддерживающих горбы. Орбиты рассматриваются в системе отсчета вращающегося бара. Предположительное положение Солнца отмечено желтым кружком. (а) Звезда в начальный момент времени расположена на расстоянии $R = R_{OLR} - 1.00$ кпк под углом $\theta = 70^\circ$ к большой оси бара (черный кружок) и имеет радиальную и азимутальную скорости соответственно $V_R = 0$ и $V_T = V_c + 30$ км/с. (б) Звезда в начальный момент имеет следующие координаты и скорости: $R = R_{OLR} + 0.75$ кпк, $\theta = -30^\circ$, $V_R = 0$ и $V_T = V_c - 30$ км/с (черный кружок). Орбиты звезд в периоды времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет показаны соответственно зеленым, красным и синим цветом. Углы θ_{01} , θ_{02} , θ_{03} и θ_{00} определяют ориентацию орбиты относительно большой оси бара в периоды времени 0–1, 1–2, 2–3 млрд лет и на всем интервале 0–3 млрд лет. Расстояния, скорости, E_J и период P представлены соответственно в единицах кпк, км/с, $\text{км}^2/\text{с}^2$ и млрд лет. Подробнее см. подпись к рис. 5.

Рис. 6 также показывает значения интеграла Якоби рассматриваемых звезд: $E_J = -82126$ и $-81753 \text{ км}^2/\text{с}^2$, которые имеют несколько большие значения, чем $E_J = -83584 \text{ км}^2/\text{с}^2$ звезды, представленной на рис. 5 (см. также раздел 7).

Заметим, что выбор начальных значений радиальной скорости V_R и азимутального угла θ также влияет на период P и среднюю ориентацию орбиты.

6. СТАТИСТИКА ОРБИТ ВБЛИЗИ OLR

6.1. Порядок симметрии и ориентация

Мы отобрали 289 062 звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи радиуса OLR и не пересекают радиус коротации (CR), и определили порядок симметрии орбит m и, если это эллиптические орбиты ($m = 2$), направление их вытянутости.

Для определения порядка симметрии орбит использовалась следующая система уравнений:

$$R_n = R_{00} + \cos(m(\theta_n - \bar{\theta})), \quad (9)$$

где R_n и θ_n — расстояние от центра Галактики и азимутальный угол звезды относительно большой оси бара в моменты времени $t_n = 10n$ млн лет, $n = 0, \dots, 300$. Значения R_{00} и $\bar{\theta}$ определяют соответственно среднее Галактоцентрическое расстояние звезды и среднюю

ориентацию в период времени 0–3 млрд лет. Эту систему уравнений можно переписать в следующем виде:

$$R_n = R_{00} + C_1 \cos(m\theta_n) + C_2 \sin(m\theta_n), \quad (10)$$

где угол $\bar{\theta}$ определяется следующим выражением:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{m} \arctan \frac{C_2}{C_1}, \quad (11)$$

и характеризует среднее направление вытянутости орбиты относительно большой оси бара на интервале времени $t = 0-3$ млрд лет. Угол $\bar{\theta}$ лежит в диапазоне $-90^\circ \leq \bar{\theta} < 90^\circ$ и связан с углом θ_{00} (раздел 5) следующим образом:

$$\theta_{00} = \bar{\theta} + \pi. \quad (12)$$

Мы рассмотрели следующие значения порядка симметрии $m = 2, 3, 4$ и 5 и вычислили соответствующие значения функции $\chi^2(m)$. При этом значение $\sigma_0 = 1$ кпк было принято одинаковым для всех m . Если одно из четырех $\chi^2(m)$, например, $\chi^2(m_1)$, принимало значение меньше трех других на некоторую критическую величину χ_c^2 :

$$\begin{cases} \chi^2(m_1) < \chi^2(m_2) - \chi_c^2, \\ \chi^2(m_1) < \chi^2(m_3) - \chi_c^2, \\ \chi^2(m_1) < \chi^2(m_4) - \chi_c^2, \end{cases} \quad (13)$$

то порядок симметрии орбиты принимался равным m_1 , что соответствует минимальному значению $\chi^2(m_1)$. Если это условие не выполнялось ни для какого m , то мы считали, что форма орбиты близка к круговой, т.е. $m = 0$. Критическое значение χ_c^2 принималось равным $\chi_c^2 = 2$, что позволяет нам отобрать орбиты определенной формы и исключить комбинированные орбиты с элементами, соответствующими различным значениям m .

Табл. 1 представляет количество орбит с порядком симметрии $m = 0, 2, 3, 4$ и 5 и их долю от полной выборки (289 062 звезд). Для $m = 2$ также приводится количество орбит, ориентированных в следующих секторах: $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$, $15^\circ \leq \theta_{00} < 75^\circ$, $75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$, $105^\circ \leq \theta_{00} < 165^\circ$ и $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$. Для каждой выборки звезд также представлено медианное значение периода P и медианное значение дисперсии периода σ_P . Табл. 1 состоит из двух частей: в Части I рассматриваются все звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (289 062 звезды), а в Части II рассматриваются звезды, создающие горбы (26 308 звезд).

Табл. 1 (Часть I) показывает, что большинство орбит, 33.4%, лежащих как внутри, так и снаружи OLR, ориентированы в среднем перпендикулярно большой оси бара, $75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$, т.е. вытянуты вдоль малой оси бара. Однако, эти звезды имеют медианное значение периода $P = 780$ млн лет, следовательно, они не могут создавать горбы с периодом $P \approx 2000$ млн лет. Кроме того, дисперсия периодов σ_P достигает значения $\sigma_P = 745$ млн лет, поэтому такая выборка звезд не может создавать какие-либо организованные изменения в ориентации орбит в течение длительного промежутка времени.

Достаточно много звезд, 11.1%, имеют орбиты, ориентированные под углом $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ к большой оси бара. Здесь медианные значения периода P и дисперсии равны $P = 1730$ и $\sigma_P = 220$ млн лет. Эта выборка звезд вполне может создавать горбы с периодом $P \approx 2000$ млн лет. Общая доля орбит, ориентированных вдоль большой оси бара, т.е. под углом θ_{00} в диапазоне значений $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} \leq 180^\circ$, составляет 16.6%.

Особое внимание мы уделили орбитам с порядком симметрии $m = 3$, так как резонанс $-3/1$ ($R_{-3/1} = 6.02$ кпк), как и OLR, лежит вблизи радиуса, где появляются горбы. Табл. 1 (Часть I) показывает, что доля орбит с $m = 3$ составляет 7.7%, что значительно меньше доли орбит с $m = 2$ (54.8%). Медианное значение периода P для орбит с $m = 3$ равно $P = 490$ млн лет. Следовательно, эти звезды не могут создавать горбы с периодом $P \approx 2000$ млн лет.

Доля орбит с порядком симметрии $m = 4$ составляет только 5.7% от всех звезд вблизи OLR (табл. 1, Часть I). Однако медианное значение периодов здесь довольно велико, $P = 1930$ млн лет. С другой стороны, и дисперсия периодов имеет довольно большое значение, $\sigma_P = 795$ млн лет. В целом, эти звезды могут создавать горбы с периодом $P \approx 2000$ млн лет, но они должны быстро размываться.

Для полноты картины мы рассмотрели порядок симметрии $m = 5$. Доля этих орбит составляет 3.3%, и они не играют существенной роли в создании горбов (табл. 1, Часть I).

Достаточно большая доля звезд, 28.6%, имеет орбиты с порядком симметрии $m = 0$ (табл. 1, Часть I). Это значит, что ни одно из значений m в диапазоне $m = 2-5$ не описывает орбиту существенно лучше, чем другие. Здесь медианное значение периода и дисперсия имеют значения $P = 720$ и $\sigma_P = 590$ млн лет. Таким образом, эта выборка звезд не может создавать колебания с периодом $P \approx 2000$ млн лет.

Другая картина наблюдается для звезд, создающих горбы (табл. 1, Часть II). Здесь 71.6% орбит ориентированы под углом $0^\circ \leq \theta_0 < 15^\circ$. Эти орбиты вытянуты в среднем вдоль большой оси бара и поддерживают кольцо R_2 . Медианное значение периода и дисперсия составляют $P = 1820$ и $\sigma_P = 155$ млн лет. Хорошо видно, что эта выборка звезд может создавать горбы с периодом $P \approx 2000$ млн лет в течение длительного периода времени.

6.2. Доля качающихся орбит вблизи OLR

Мы попытались отделить орбиты, направление вытянутости которых колеблется внутри определенного угла, от орбит, направление вытянутости которых смещается только в одном направлении безо всяких ограничений по углам. Необходимым условием захвата орбиты качаниями является то, что она должна лежать, как внутри, так и снаружи радиуса резонанса. Для каждой из 289 062 звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR, мы вычислили значения частоты биений w_{bt} (8). Критерий колебания орбиты состоит в том, что максимальное и минимальное значения частоты биений w_{bt} должны иметь разные знаки, $\max w_{bt} > 0$ и $\min w_{bt} < 0$, т.е. частота биений должна менять знак за время одного колебания. Если w_{bt} не меняет знак, то направление вытянутости орбиты смещается только в одном направлении: при $w_{bt} > 0$ — в направлении вращения Галактики, а при $w_{bt} < 0$ — в противоположном направлении. Оказалось, что доля орбит, захваченных колебаниями вблизи OLR, составляет 28% от числа орбит, лежащих как внутри, так и снаружи OLR. Медианное значение периода колебаний качающихся орбит составляет $P = 1.96$ млрд лет.

Таблица 1. Симметрия и ориентация орбит

Часть I				
Орбиты, лежащие как внутри, так и снаружи OLR				
θ_0	N	f	P млн лет	σ_P млн лет
All	289 062	100.0%	910	715
$m = 2$				
All	158 332	54.8%	1320	695
$0^\circ \leq \theta_0 < 15^\circ$	32 212	11.1%	1730	220
$15^\circ \leq \theta_0 < 75^\circ$	10 122	3.5%	2020	210
$75^\circ \leq \theta_0 < 105^\circ$	96 650	33.4%	780	745
$105^\circ \leq \theta_0 < 165^\circ$	3316	1.1%	2030	560
$165^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$	16 032	5.5%	1720	270
$m = 3$				
All	22 226	7.7%	490	130
$m = 4$				
All	16 406	5.7%	1930	795
$m = 5$				
All	9480	3.3%	650	80
$m = 0$				
All	82 618	28.6%	720	590
Часть II				
Орбиты, создающие горбы				
All	26 308	100.0%	1850	170
$m = 2$				
All	23 310	88.6%	1850	165
$0^\circ \leq \theta_0 < 15^\circ$	18 824	71.6%	1820	155
$15^\circ \leq \theta_0 < 75^\circ$	4054	15.4%	1990	125
$75^\circ \leq \theta_0 < 105^\circ$	0	0.0%	—	—
$105^\circ \leq \theta_0 < 165^\circ$	0	0.0%	—	—
$165^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$	432	1.6%	1460	40
$m = 3$				
All	24	0.1%	650	5
$m = 4$				
All	1764	6.7%	1810	150
$m = 5$				
All	8	0.0%	1630	40
$m = 0$				
All	1202	4.6%	1880	555

7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД В ПЛОСКОСТИ (E_J , P)

Рис. 7 показывает распределения звезд в плоскости (E_J , P), где E_J — интеграл Якоби, а P — период изменения углового момента и полной энергии. Для орбит с порядком симметрии $m = 2$ цветом показана ориентация орбиты: $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ (голубой), $15^\circ \leq \theta_{00} < 75^\circ$ (зеленый), $75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$ (красный), $105^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$ (темно-синий), где угол θ_{00} определяет направление вытянутости орбиты относительно большой оси бара в период времени 0–3 млрд лет. Орбиты с порядком симметрии $m \neq 2$ показаны черным цветом.

Рис. 7(a) показывает распределение (E_J , P), полученное для звезд модели, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (289 062 звезд). Чтобы рисунок не был перегружен точками, мы приводим только 2% звезд, выбранных случайно. Сплошная красная линия показывает медианные значения периода P , вычисленные в бинах по E_J шириной $100 \text{ км}^2/\text{с}^2$. Вертикальные линии показывают значения E_J , вычисленные для воображаемых звезд, расположенных в точках L_1 , L_4 и на радиусах резонансов $-3/1$, $-4/1$, OLR и имеющих скорости $V_R = 0$ и $V_T = V_c$, где V_c — скорости кривой вращения на соответствующих радиусах. Двойные линии показывают значения E_J , вычисленные для звезд, расположенных на большой (более отрицательное значение) и малой осях бара. Значения E_J , вычисленные для радиуса OLR, равны $E_J = -84\,266$ (большая ось) и $-83\,997 \text{ км}^2/\text{с}^2$ (малая ось). Хорошо видно, что медианное значение периода P растет вблизи OLR и достигают значения $P = 2.00$ млрд лет, после чего резко падает. Заметим также небольшой рост периода P вблизи значения $E_J = -74\,243 \text{ км}^2/\text{с}^2$, соответствующего точке L_4 .

Рис. 7(b) показывает распределение (E_J , P), полученное для звезд, создающих горбы (26 308 звезд). Видно, что большинство звезд имеют орбиты, ориентированные под углом $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ (голубые точки), которые образуют структуру, напоминающую угол: медианное значение P практически линейно растет от $P = 1.60$ до 2.00 млрд лет при уменьшении E_J от $-78\,000$ до $-83\,400 \text{ км}^2/\text{с}^2$, а при дальнейшем уменьшении E_J значение периода P быстро падает.

8. ВКЛАД ЗВЕЗД, СОЗДАЮЩИХ ГОРБЫ, В КОЛЕБАНИЯ СКОРОСТЕЙ V_R И V_T

Рис. 8 показывает медианные значения (а, б) радиальной V_R и (с, д) азимутальной V_T скоростей звезд диска, лежащих в секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и в интервале расстояний $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк, в разные моменты времени. Мы рассматриваем три выборки звезд: все звезды модельного диска, которые попадают в указанный сегмент диска в рассматриваемые моменты времени (черные круж-

ки); звезды, создающие горбы (красные кружки); и все звезды диска за исключением звезд, создающих горбы (голубые кружки). Также показано изменение числа звезд N , создающих горбы и расположенных в указанном сегменте диска в разные моменты времени (сплошная красная линия).

Рис. 8(a) показывает изменение скорости V_R , вычисленной для всех звезд диска и для выборки без звезд, создающих горбы. Хорошо видно, что исключение отобранных звезд существенно изменило фазу колебаний скорости V_R : на месте горбов, кроме первого, появились впадины, а на месте впадин — горбы.

Рассмотрим количественный критерий, показывающий влияние отобранных звезд на колебания скорости V_R . Хорошим критерием является отношение амплитуды A и ошибки ее определения ε_A . Заметим, что отношение $|A/\varepsilon_A|$, вычисленное для всех звезд диска, расположенных в указанном сегменте, составляет $|A/\varepsilon_A| = 11.7$ ($A = 1.76 \pm 0.15$). Однако амплитуда A , вычисленная без звезд, создающих горбы, но при фиксированных периоде и фазе, т. е. при $P = 2.1$ млрд лет и $\varphi = 257^\circ$, которые определяют положения горбов и впадин для всей выборки звезд, равна $A = -0.21 \pm 0.19 \text{ км/с}$. Видно, что в этом случае амплитуда A имеет значение, близкое к ошибке ее определения и отношение $|A/\varepsilon_A| = 1.1$. Следовательно, колебания скорости V_R , полученные для всех звезд в указанном сегменте диска, практически исчезли после удаления звезд, создающих горбы. Правда, появились другие колебания V_R , в которых положения горбов и впадин соответствуют другим моментам времени.

Рис. 8(b) показывает колебания скорости V_R и числа звезд N , вычисленных для выборки звезд, создающих горбы (26308 звезд). Обратим внимание на диапазон изменения скорости V_R : от -50 до 0 км/с . Причем минимумы скорости V_R соответствуют минимальным значениям N . Колебания скорости V_R в этом случае имеют следующие параметры: $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет, $\overline{V_R} = -30.3 \pm 0.9 \text{ км/с}$, $A = 13.1 \pm 1.7 \text{ км/с}$ и $\varphi = 75^\circ \pm 5^\circ$.

Сравнение рис. 8(a) и рис. 8(b) показывает, что медианные скорости V_R звезд, создающих горбы (красные кружки), всегда меньше медианных скоростей всех звезд, лежащих в указанном сегменте (черные кружки). Средние скорости V_R в первом и втором случае равны соответственно $\overline{V_R} = -30.3$ и $\overline{V_R} = 5.2 \text{ км/с}$. Значит, звезды, создающие горбы, “тянут” медианные скорости V_R в сторону более отрицательных значений. Когда число звезд N , создающих горбы (сплошная темно-красная линия), увеличивается, их влияние становится более заметным, и в результате медианные скорости V_R всех звезд уменьшаются. Таким образом, именно периодические изменения числа звезд N , создающих горбы, приводят к колебаниям скорости V_R в указанном сегменте диска.

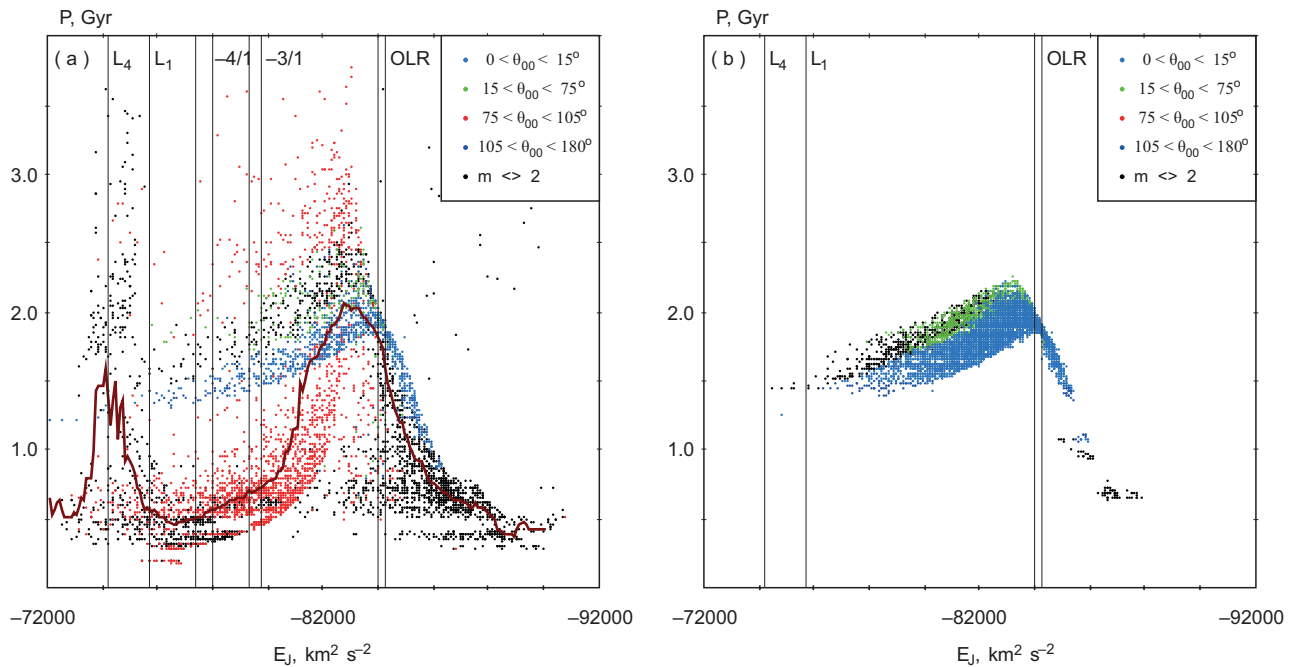


Рис. 7. Распределения звезд в плоскости (E_J, P) , где E_J — интеграл Якоби, а P — период изменения углового момента и энергии. Ориентация орбит для $m = 2$ показана цветом: $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ (голубой), $15^\circ \leq \theta_{00} < 75^\circ$ (зеленый), $75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$ (красный), $105^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$ (темно-синий), где угол θ_{00} определяет направление вытянутости орбиты относительно большой оси бара в период времени 0–3 млрд лет и лежит в диапазоне $0^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$. Орбиты с $m \neq 2$ показаны черным цветом. Вертикальные линии показывают значения E_J , вычисленные для воображаемых звезд, расположенных в точках L_1 , L_4 и на радиусах резонансов $-3/1$, $-4/1$ и OLR в направлениях большой (более отрицательные значения) и малой осей бара, и имеющих азимутальные скорости, равные скоростям кривой вращения на соответствующих радиусах. (a) Все звезды модели, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (289 062 звезды). Показано только 2% звезд. Сплошная красная линия показывает медианные значения периода P в каждом бине по E_J . Хорошо видно, что медианные значения периодов P растут вблизи OLR, а затем резко падают. (b) Звезды, создающие горбы (26 308 звезд). Показано 25% звезд. Большинство звезд имеют орбиты, ориентированные под углом $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ (голубые точки), которые образуют структуру, напоминающую угол: медианное значение P практически линейно растет от $P = 1.6$ до 2.0 млрд лет при уменьшении E_J от $-78\,000$ до $-83\,400 \text{ км}^2/\text{с}^2$, а затем резко падает.

Рис. 8(с) показывает колебания скорости V_T , вычисленной для всех звезд, лежащих в указанном сегменте диска (черные кружки), и для выборки, не включающей звезды, создающие горбы (голубые кружки). Хорошо видно, что исключение звезд, создающих горбы, сдвинуло, за исключением первого горба, фазу колебаний скорости V_T на $\sim 180^\circ$.

Рис. 8(d) показывает колебания скорости V_T и числа звезд N , вычисленных для звезд, создающих горбы. Хорошо видно, что в этом случае скорости V_T (красные точки) лежат в диапазоне от 220 до 245 км/с, кроме одного момента времени ($V_T = 193 \text{ км/с}$), и сдвинуты в сторону более положительных значений по сравнению с V_T , полученными для всех звезд, лежащих в указанном сегменте диска. Параметры колебаний V_T , вычисленные для звезд, создающих горбы, имеют следующие значения: $P = 1.9 \pm 0.1$ млн лет, $\bar{V}_T = 229.7 \pm 0.1 \text{ км/с}$, $A = 4.48 \pm 1.37 \text{ км/с}$ и $\varphi = 295^\circ \pm 11^\circ$. Заметим, что средняя скорость V_T , вычисленная для звезд, создающих горбы, ($\bar{V}_T = 229.7 \text{ км/с}$) на $\sim 11 \text{ км/с}$ больше средней скорости,

полученной для всех звезд, лежащих в указанном сегменте диска ($\bar{V}_T = 218.5 \text{ км/с}$).

Сравнение рис. 8(с) и рис. 8(d) показывает, что колебания скорости V_T , вычисленной для всех звезд в указанном сегменте диска (черные точки), хорошо согласуются с колебаниями числа звезд N , создающих горбы (сплошная темно-красная линия), которые “тянут” значения скоростей V_T в сторону более положительных значений. Следовательно, увеличение N приводит к сдвигу скоростей V_T в положительном направлении.

Влияние звезд, создающих горбы, на положение максимумов и минимумов скорости V_T также можно оценить, используя отношение амплитуды A к ошибке ее определения ε_A . Амплитуда A , вычисленная для всех звезд, лежащих в очерченном сегменте, равна $A = 1.24 \pm 0.14 \text{ км/с}$, но ее значение, вычисленное без звезд, создающих горбы, и при фиксированных значениях периода и фазы, т. е. при $P = 1.9 \pm 0.1$ млрд лет и $\varphi = 329^\circ$, составляет только $A = -0.28 \pm 0.20 \text{ км/с}$.

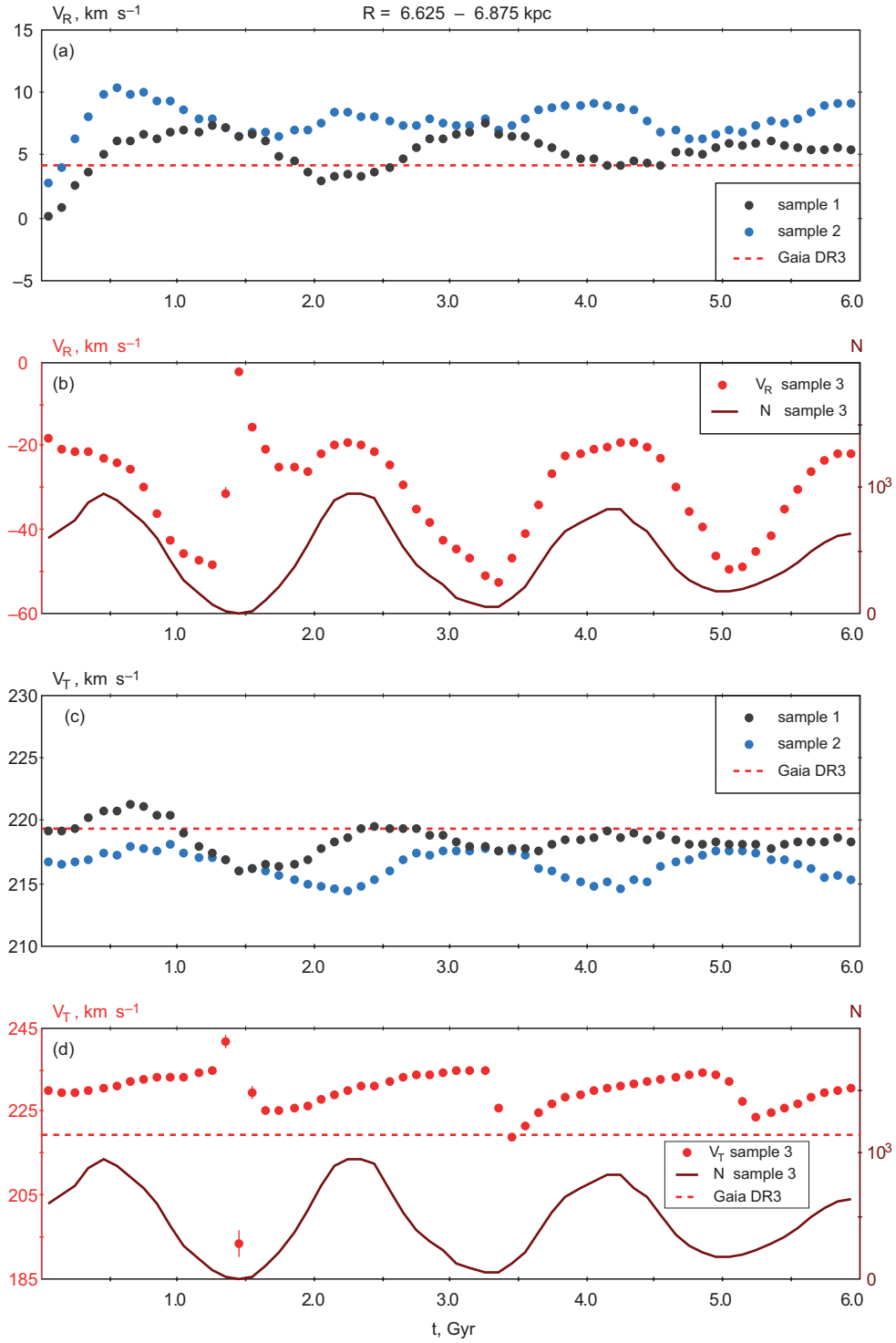


Рис. 8. Медианные значения (а, б) радиальной V_R и (с, д) азимутальной V_T скоростей звезд диска, лежащих в секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и в интервале расстояний $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк, в разные моменты времени. Скорости V_R и V_T вычислены для трех выборок звезд: (1) все звезды модельного диска (черные кружки), (2) все звезды модельного диска, кроме звезд, создающих горбы (голубые кружки) и (3) звезды, создающие горбы (красные кружки). Сплошная темно-красная линия показывает изменение числа звезд N , создающих горбы и расположенных в указанном сегменте диска, в разные моменты времени. Масштаб изменения N показан на правой вертикальной оси. См. также подпись к рис. 2.

Таким образом, отношение A/ε_A падает с 8.9 до 1.4 после исключения звезд, создающих горбы.

Следовательно, именно звезды, создающие горбы, вызывают колебания радиальной и азимутальной скоростей с периодом $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет.

9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД МОДЕЛИ ПО ПЕРИОДУ P

Рис. 9 показывает распределение звезд модели по периоду P изменения углового момента и полной энергии. Рис. 9(a) показывает распределения, построенные для нескольких выборок звезд: все звезды модельного диска; звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи CR; звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR; и звезды, создающие горбы. Хорошо видны два максимума в распределении всех звезд по периоду P , расположенные на $P = 0.6$ и 1.9 млрд лет. К первому максимуму концентрируются звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи CR. Заметим, что период долгопериодических колебаний вокруг точек равновесия L_4 и L_5 составляет 565 ± 2 млн лет в нашей модели (Мельник и др., 2023), поэтому первый максимум, вероятно, связан с так называемыми бананообразными орбитами вокруг точек L_4 и L_5 . Звезды, создающие горбы, концентрируются ко второму максимуму. Распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (289 062 звезды), также имеет два максимума. Оно показано в увеличенном масштабе на рис. 9(b).

Рис. 9(b) показывает, что распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR, также имеет два максимума, расположенных на $P = 0.7$ и $P = 1.9$ млрд лет. Мы выделили орбиты с порядком симметрии $m = 2$, которые ориентированы перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$) и параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$), где угол θ_{00} определяет среднее направление вытянутости орбиты относительно большей оси бара на интервале времени 0–3 млрд лет. Хорошо видно, что орбиты, вытянутые перпендикулярно бару (светло-красные прямоугольники), концентрируются к периоду $P = 0.7$ млрд лет, а орбиты, вытянутые параллельно бару (светло-зеленые прямоугольники) — к периоду $P = 1.9$ млрд лет. Заметим, что эти подмножества орбит поддерживают соответственно внешние кольца R_1 и R_2 .

10. ВОЗРАСТ ГАЛАКТИЧЕСКОГО БАРА

Мы сравнили наблюдательное распределение медианных скоростей V_R , полученных по данным *Gaia* DR3, на интервале расстояний $R = 6$ –9 кпк с модельным распределением в разные моменты времени и вычислили функцию $\chi^2(t)$. Рис. 10 показывает функцию χ^2 на интервале времени 0–6 млрд лет. Значение неопределенности медианной скорости V_R ,

вычисленной в бинах, было принято равным $\varepsilon_{VR} = 0.6$ км/с (см. раздел 3). Хорошо видно, что функция χ^2 имеет два минимума на интервале времени 0.5–6.0 млрд лет, соответствующих моментам $t = 2.5 \pm 0.3$ и 4.5 ± 0.5 млрд лет. Эти минимумы возникают из-за исчезновения горбов на профилях распределения модельных скоростей V_R в соответствующие промежутки времени (рис. 1). Мы не рассматриваем минимум на $t = 0.4$ млрд лет, потому что бар еще не достиг полной силы к этому моменту времени.

Присутствие или отсутствие горбов на профилях распределения модельной скорости V_R может служить индикатором соответствия модели наблюдениям. Наблюдательный профиль распределения скорости V_R , полученный по данным *Gaia* DR3, не имеет горба на расстояниях $R = 6$ –7 кпк (рис. 1). С другой стороны, модельные профили имеют горбы в периоды времени 0.6–1.8, 3.0–3.8, 5.0–5.8 млрд лет. Таким образом, наилучшее согласие модели с наблюдениями на интервале времени 0.5–6.0 млрд лет соответствует моментам $t = 2.5 \pm 0.3$ и 4.5 ± 0.5 млрд лет.

От какого момента времени мы должны отсчитывать возраст бара? В нашем моделировании существуют два критических момента: начало моделирования и момент выхода бара на полную мощность. Реальные дисковые галактики практически всегда имеют в центре хотя бы небольшое овальное возмущение, которое может существовать длительное время. Поэтому мы будем отсчитывать возраст бара от момента его выхода на полную мощность. Так как время роста бара в нашей модели составляет $T_g = 0.45$ млрд лет, то возраст бара должен быть сдвинут на ~ 0.5 млрд лет в сторону меньших значений относительно моментов времени, соответствующих наилучшему согласию моделей с наблюдениями. Таким образом, возраст Галактического бара, вычисленный с момента его выхода на полную мощность, должен находиться вблизи одного из двух значений: 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали модель Галактики с баром, которая хорошо воспроизводит распределения наблюдательных радиальных V_R и азимутальных V_T скоростей звезд вдоль Галактоцентрического расстояния R , полученных по данным *Gaia* DR3. Для построения модельных и наблюдательных профилей распределения скоростей использовались звезды, лежащие вблизи плоскости Галактики $|z| < 200$ пк в узком секторе азимутальных углов $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$. Медианные значения скорости V_R и V_T вычислялись в бинах шириной $\Delta R = 250$ пк. Наилучшее согласие модельных и наблюдательных профилей скоростей соответствует угловой скорости вращения бара $\Omega_b = 55 \pm 3$ км/с/кпк и позиционному углу бара $\theta_b = 45^\circ \pm 15^\circ$. В нашей модели радиус OLR бара и Галактоцентрическое рас-

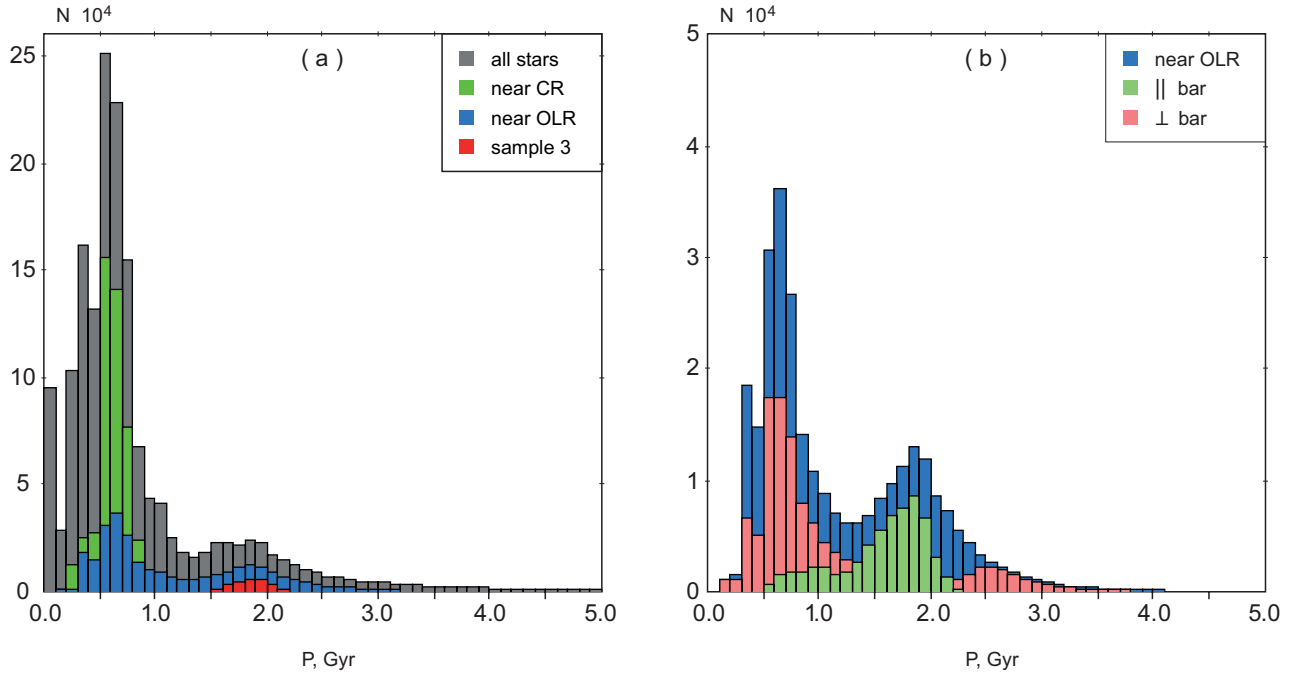


Рис. 9. Распределение звезд модели по периоду P изменения углового момента и энергии. (a) Все звезды модельного диска (серые столбики); звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи CR (зеленые столбики); звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (синие столбики); звезды, создающие горбы (выборка 3, красные столбики). Хорошо видны два максимума в распределении всех звезд по периоду P , расположенные на $P = 0.6$ и $P = 1.9$ млрд лет. К первому максимуму концентрируются звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи CR (зеленые столбики). Распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (синие столбики), также имеют два максимума. Это распределение в увеличенном масштабе показано на правом фрейме. (b) Среди множества звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (синие столбики), были выделены орбиты с порядком симметрии $m = 2$, которые ориентированы перпендикулярно бару, $75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$ (светло-красные столбики), и параллельно бару, $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$ (светло-зеленые столбики). Первое подмножество орбит (светло-красные столбики) имеет максимум распределения на $P = 0.6$, а второе (светло-зеленые столбики) на $P = 1.9$ млрд лет.

стояние Солнца равны соответственно $R_{OLR} = 7.0$ и $R_0 = 7.5$ кпк (Мельник и др., 2023).

Мы нашли, что модельные профили распределения радиальной скорости V_R демонстрируют периодическое увеличение скорости V_R на расстояниях 6–7 кпк (рис. 1). Максимальная высота горбов на профиле V_R равна 1.9 ± 0.12 км/с и соответствует расстоянию $R = 6.75$ кпк. Высота горбов уменьшается со временем. Мы исследовали изменения скорости V_R в бине $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк. Средняя амплитуда изменения скорости V_R на интервале времени 0–6 млрд лет составляет $A = 1.76 \pm 0.15$ км/с. Период появления горбов равен $P = 2.1 \pm 0.1$ млрд лет (рис. 2a).

Азимутальная скорость V_T также демонстрирует периодические изменения в бине расстояний $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк. Амплитуда и период изменений скорости V_T равны $A = 1.24 \pm 0.14$ км/с и $P = 1.9 \pm 0.1$ млрд лет (рис. 2b).

Таким образом, скорости V_R и V_T , вычисленные для сегмента модельного диска: $|\theta - \theta_0| < 15^\circ$ и $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк, демонстрируют колебания с периодом $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет.

Орбиты, захваченные качаниями вблизи линдбладовских резонансов, имеют свойство периодически менять направление вытянутости (Вайнберг, 1994). Мы вычислили углы θ_{01} , θ_{02} и θ_{03} , которые определяют направление вытянутости орбиты относительно большой оси бара на интервалах времени соответственно 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет с начала моделирования. Мы нашли, что звезды, орбиты которых меняют ориентацию следующим образом: $0^\circ < \theta_{01} < 45^\circ$, $-45^\circ < \theta_{02} < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta_{03} < 45^\circ$, вносят существенный вклад в формирование горбов. В периоды времени 0–1 и 2–3 млрд лет орбиты этих звезд ориентированы так, что создают отрицательные скорости в секторе $|\theta - \theta_\odot| < 15^\circ$ и в диапазоне расстояний 6–7 кпк, а в период времени 1–2 млрд лет меняют свою ориентацию и просто уходят из рассматриваемой области (рис. 3). Выборка звезд, создающих горбы, включает 26 308 звезд, что составляет только 9% от всех звезд, орбиты которых лежат, как внутри, так и снаружи радиуса OLR.

Мы исследовали распределение начальных координат и скоростей звезд, создающих горбы (рис. 4). Максимум распределения звезд по начальному рас-

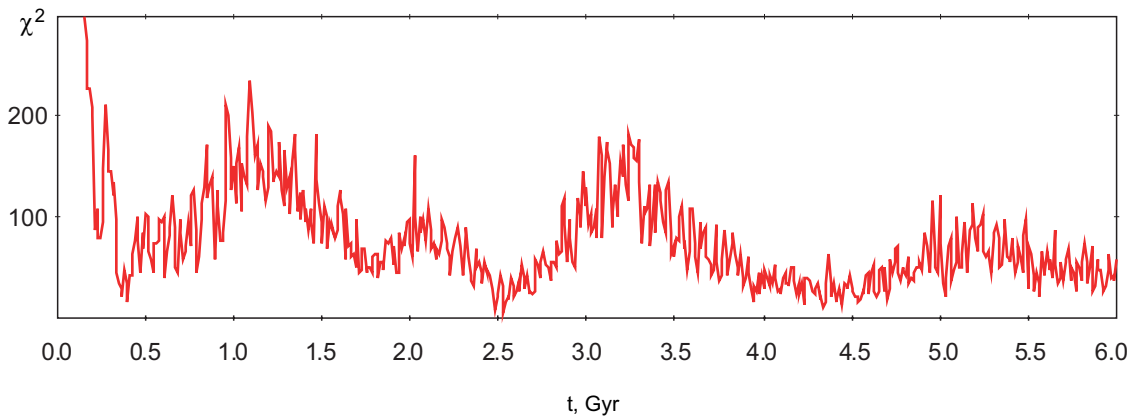


Рис. 10. Сравнение наблюдательного распределения медианной скорости V_R , полученного по данным *Gaia* DR3 на интервале расстояний $R = 6\text{--}9$ кпк, с модельным распределением в разные моменты времени. Хорошо видно, что функция χ_R^2 имеет два минимума на интервале времени 0.5–6.0 млрд лет, соответствующих моментам $t = 2.5 \pm 0.3$ и 4.5 ± 0.5 млрд лет.

стоянию R соответствует бину $R = 7.00\text{--}7.25$ кпк, где в начальный момент времени расположено максимальное количество звезд, создающих горбы. Мы обнаружили уменьшение начальной азимутальной скорости V_T с увеличением начального расстояния R . Медианные значения начальных радиальных скоростей V_R звезд, создающих горбы, близки к нулю при дисперсии скоростей ~ 30 км/с.

Типичная орбита звезды, создающей горбы, показана на рис. 5. Изменения углового момента L и полной энергии E звезды демонстрируют короткопериодические и долгопериодические колебания с периодами соответственно 0.13 и 2.0 млрд лет. Изменения расстояния R и мгновенной угловой скорости $\dot{\theta}$ имеют форму биений. Угол θ_0 , который определяет направления вытянутости орбиты относительно большой оси бара в течение одного радиального колебания, меняется в диапазоне от -45° до 45° . Угол θ_0 , среднее расстояние $\bar{R}$, средняя угловая скорость $\bar{\dot{\theta}}$, эксцентриситет орбиты и частота биений w_{bt} (8) изменяются с периодом $P = 2.0 \pm 0.1$ млрд лет.

Мы исследовали порядок симметрии m и ориентацию орбит вблизи OLR. Были отобраны орбиты, которые лежат как внутри, так и снаружи OLR и не пересекают CR (289 062 звезд). Из них 54.8% имеют порядок симметрии $m = 2$; 7.7% — 3; 5.7% — 4 и 3.3% — 5; 28.6% орбит имеют форму, близкую к круговой. Большинство орбит с порядком симметрии 2 вытянуты перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$), что составляет 33.4% от общей выборки. Доля орбит, вытянутых вдоль большой оси бара ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} \leq 180^\circ$), составляет только 16.6% (табл. 1, Часть I).

Среди звезд, создающих горбы (26308 звезд), 88.6% имеет порядок симметрии $m = 2$. Большинство (71.6%) орбит с порядком симметрии $m = 2$ вытянуты вдоль большой оси бара под углом $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$. Таким образом, большинство звезд, создающих горбы, поддерживают внешнее кольцо R_2 . Медианное зна-

чение периода P , вычисленное для звезд, создающих горбы, равно $P = 1.85$ млрд лет. (табл. 1, Часть II).

Доля качающихся орбит, которые меняют направление вытянутости в определенном диапазоне углов, $\theta_1 < \theta_0 < \theta_2$, составляет 28% от числа звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR (раздел 6.2). Медианное значение периода колебаний качающихся орбит равно $P = 1.96$ млрд лет.

Мы исследовали распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR, в плоскости (E_J, P) . Оказалось, что медианное значение периода P увеличивается по мере уменьшения энергии Якоби E_J и приближения к OLR, а затем резко падает. Распределение звезд, создающих горбы, еще более четко демонстрирует эту тенденцию (рис. 7).

Мы исследовали влияние звезд, создающих горбы, на колебания медианного значения радиальной скорости V_R звезд, лежащих в сегменте диска: $|\theta - \theta_0| < 15^\circ$ и $R = 6.75 \pm 0.125$ кпк (рис. 8). Исключение звезд, создающих горбы, существенно изменило фазу колебаний: на месте горбов, кроме первого, появились впадины, а на месте впадин — горбы. Отношение амплитуды A к ошибке ее определения ε_A , вычисленных для выборки, не включающей звезды, создающие горбы, и при фиксированных значениях периода и фазы, равно $|A/\varepsilon_A| = 1.1$, что существенно меньше значения, полученного для всех звезд, лежащих в указанном сегменте диска, $|A/\varepsilon_A| = 11.7$.

Аналогичный тест, проведенный для азимутальных скоростей V_T , показал, что исключение звезд, создающих горбы, при фиксированных значениях периода и фазы приводит к уменьшению значения $|A/\varepsilon_A|$ с 8.9 до 1.4.

Распределение звезд модели по периоду P изменения углового момента и энергии имеет два максимума, расположенных на $P = 0.6$ и 1.9 млрд лет (рис. 9а). К первому максимуму концентрируются звезды, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи CR.

Период $P = 0.6$ млрд лет практически совпадает с периодом долгопериодических колебаний вокруг точек равновесия L_4 и L_5 , поэтому первый максимум, вероятно, связан с так называемыми бананообразными орбитами. Распределение звезд, орбиты которых лежат как внутри, так и снаружи OLR, также имеет два максимума, на $P = 0.7$ и $P = 1.9$ млрд лет. При этом орбиты, вытянутые перпендикулярно и параллельно бару, концентрируются к первому и второму максимумам, соответственно. Эти орбиты поддерживают соответственно внешние кольца R_1 и R_2 (рис. 9б).

Сравнение модельных и наблюдательных профилей распределения скорости V_R показало, что функция χ_R^2 имеет два минимума, соответствующих моментам времени $t = 2.5 \pm 0.3$ и 4.5 ± 0.5 млрд лет (рис. 10), которые возникают из-за исчезновения горбов на профилях распределения модельных скоростей V_R . Таким образом, возраст Галактического бара, определенный с момента его выхода на полную мощность, должен лежать вблизи одного из двух значений: 2.0 ± 0.3 или 4.0 ± 0.5 млрд лет.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы благодарим анонимных рецензентов за полезные замечания и интересную дискуссию. Эта работа была выполнена с использованием данных Европейского Космического Агентства (ESA) миссии *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанных Консорциумом обработки и анализа данных (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>) *Gaia*. Поддержка DPAC была обеспечена национальными институтами, в частности, институтами, участвующими в многостороннем соглашении *Gaia*. Е.Н. Подзолкова — обладатель стипендии Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (Grant No. 21-2-2-44-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азано и др. (T. Asano, M.S. Fujii, J. Baba, J. Bedorf, E. Sellentin, S. Portegies Zwart), *MNRAS* **514**, 460 (2022).
2. Антоха и др. (T. Antoja, A. Helmi, W. Dehnen, et al.), *Astron. Astrophys.* **563**, 60 (2014).
3. Атанассула (E. Athanassoula), *MNRAS* **259**, 328 (1992).
4. Атанассула и др. (E. Athanassoula, O. Bienayme, L. Martinet, D. Pfenniger), *Astron. Astrophys.* **127**, 349 (1983).
5. Беле и др. (A. Boehle, A.M. Ghez, R. Schodel, et al.), *Astrophys. J.* **830**, 17 (2016).
6. Бенжамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler, et al.), *Astrophys. J.* **630**, L149 (2005).
7. Бенсби и др. (T. Bensby, S. Feltzing, A. Gould, et al.), *Astron. Astrophys.* **605**, A89 (2017).
8. Берд и др. (G. Byrd, P. Rautiainen, H. Salo, R. Buta, D.A. Crocker) *Astron. J.* **108**, 476 (1994).
9. Бика и др. (E. Bica, C. Bonatto, B. Barbuy, S. Ortolani), *Astron. Astrophys.* **450**, 105 (2006).

10. Бинни, Тремейн (J. Binney and S. Tremaine), *Galactic Dynamics*, (Princeton: Princeton Univ. Press, 2008).
11. Блок и др. (D. L. Block, I. Puerari, J. H. Knapen, et al.), *Astron. Astrophys.* **375**, 761 (2001).
12. Бови и др. (J. Bovy, H.W. Leung, J.A. Hunt, et al.), *MNRAS* **490**, 4740 (2019).
13. Бранхам (R.L. Branham), *Astrophys. Space Sci.* **362**, 29 (2017).
14. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
15. Бута (R. Buta), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **96**, 39 (1995).
16. Бута и др. (R. Buta, E. Laurikainen, H. Salo) *Astron. J.* **127**, 279 (2004).
17. Бута, Ком (R. Buta and F. Combes), *Fund. Cosmic Physics* **17**, 95 (1996).
18. Бута, Крокер (R. Buta and D.A. Crocker), *Astron. J.* **102**, 1715 (1991).
19. Вайнберг (M.D. Weinberg), *Astrophys. J.* **420**, 597 (1994).
20. Вальенари и др. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, A1 (2023).
21. Герхард (O. Gerhard), *Mem. S. A. It. Suppl.* **18**, 185 (2011).
22. Глушкова и др. (E.V. Glushkova, A.K. Dambis, A.M. Melnik, A.S. Rastorguev), *Astron. Astrophys.* **329**, 514 (1998).
23. Гонсалес-Фернандес и др. (C. Gonzalez-Fernandez, M. Lopez-Corredoira, E.B. Amores, D. Minniti, P. Lucas, I. Toledo), *Astron. Astrophys.* **546**, 107 (2012).
24. Гроеневеген и др. (M.A.T. Groenewegen, A. Udalski, G. Bono), *Astron. Astrophys.* **481**, 441 (2008).
25. Дамбис и др. (A.K. Dambis, L.N. Berdnikov, A.Y. Kniazev, et al.), *MNRAS* **435**, 3206 (2013).
26. Двек и др. (E. Dwek, R.G. Arendt, M.G. Hauser, et al.), *Astrophys. J.* **445**, 716 (1995).
27. Дебаттиста и др. (V.P. Debattista, O.A. Gonzalez, R.E. Sanderson, et al.), *MNRAS* **485**, 5073 (2019).
28. де Вокулер, Фримен (G. de Vaucouleurs and K.C. Freeman), *Vis. in Astron.*, **14**, 163 (1972).
29. Денен (W. Dehnen), *Astron. J.* **119**, 800 (2000).
30. Диас-Гарсия и др. (S. Diaz-Garcia, H. Salo, E. Laurikainen, M. Herrera-Endoqui), *Astron. Astrophys.* **587**, 160 (2016).
31. Иванек и др. (P. Iwanek, R. Poleski, S. Kozlowski, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **264**, 20 (2023).
32. Кабрера-Лаверс и др. (A. Cabrera-Lavers, P.L. Hammersley, C. Gonzalez-Fernandez, et al.), *Astron. Astrophys.* **465**, 825 (2007).
33. Калнайс (A.J. Kalnajs), *Dynamics of Disc Galaxies* (Ed. B. Sundelius, Goteborgs: Goteborgs Univ. Press, 1991), p. 323.
34. Кац и др. (Gaia Collaboration, D. Katz, T. Antoja, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A11 (2018).
35. Контопулос (G. Contopoulos), *Celest. Mech.* **31**, 193 (1983).
36. Контопулос, Гросбол (G. Contopoulos and P. Grosbol), *Astron. Astrophys. Rev.* **1**, 261 (1989).
37. Контопулос, Папаяннопулос (G. Contopoulos and Th. Papayannopoulos), *Astron. Astrophys.* **92**, 33 (1980).
38. Коул, Вайнберг (A. A. Cole and M. D. Weinberg), *Astrophys. J.* **574**, L43 (2002).

39. Линдегрен и др. (L. Lindegren, S.A. Klioner, J. Hernandez, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A2 (2021).
40. Мельник (А.М. Melnik), *MNRAS* **485**, 2106 (2019).
41. Мельник, Дамбис (А.М. Melnik and A.K. Dambis), *Astrophys. Space Sci.* **365**, 112 (2020).
42. Мельник и др. (А.М. Melnik, A.K. Dambis, E.N. Podzolkova, L.N. Berdnikov), *MNRAS* **507**, 4409 (2021).
43. Мельник и др. (А.М. Melnik, E.N. Podzolkova, A.K. Dambis), *MNRAS* **525**, 3287 (2023).
44. Мельник А.М., Раутиайнен П., Письма в Астрон. журн. **35**, 676 (2009) [А.М. Melnik, P. Rautiainen, *Astron. Lett.*, **35**, 609 (2009)]
45. Мельник, Раутиайнен (А.М. Melnik, P. Rautiainen), *MNRAS* **418**, 2508 (2011).
46. Мельник и др. (А.М. Melnik, P. Rautiainen, L.N. Berdnikov, A.K. Dambis, A.S. Rastorguev), *Astron. Nachr.* **336**, 70 (2015).
47. Мельник и др. (А.М. Melnik, P. Rautiainen, E.V. Glushkova, A.K. Dambis), *Astrophys. Space Sci.* **361**, 60 (2016).
48. Минчев и др. (I. Minchev, J. Nordhaus, A.C. Quillen), *Astrophys. J.* **664**, L31 (2007).
49. Монари и др. (G. Monari, B. Famaey, A. Siebert, A. Duchateau, T. Lorscheider, O. Bienayme), *MNRAS* **465**, 1443 (2017).
50. Нараф (D.M. Nataf), *Publ. Astron. Soc. Aust.* **33**, 23 (2016).
51. Нараф (D.M. Nataf), *Publ. Astron. Soc. Aust.* **34**, 41 (2017).
52. Непал и др. (S. Nepal, C. Chiappini, G. Guiglion, et al.), *Astron. Astrophys.* **681**, L8 (2024).
53. Несс, Ланг (M. Ness and D. Lang), *Astron. J.* **152**, 14 (2016).
54. Никифоров (I.—I. Nikiforov), *ASP Conf. Ser.* **316**, 199 (2004).
55. Нишияма и др. (S. Nishiyama, T. Nagata, S. Sato, et al.), *Astrophys. J.* **647**, 1093 (2006).
56. Прусти и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
57. Пфеннигер (D. Pfenniger), *Astron. Astrophys.* **134**, 373 (1984).
58. Раутиайнен, Мельник (P. Rautiainen and A.M. Melnik), *Astron. Astrophys.* **519**, 70 (2010).
59. Раутиайнен, Сало (P. Rautiainen and H. Salo), *Astron. Astrophys.* **348**, 737 (1999).
60. Раутиайнен, Сало (P. Rautiainen and H. Salo), *Astron. Astrophys.* **362**, 465 (2000).
61. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, Y. Xu), *Astrophys. J.* **705**, 1548 (2009).
62. Сандерс и др. (J.L. Sanders, D. Kawata, N. Matsunaga, M.C. Sormani, L.C. Smith, D. Minniti, O. Gerhard), *MNRAS* **530**, 2972 (2024).
63. Селлвуд, Уилкинсон (J.A. Sellwood and A. Wilkinson), *Rep. on Prog. in Phys.* **56**, 173 (1993).
64. Страк (C. Struck), *MNRAS* **446**, 3139 (2015).
65. Страк (C. Struck), *MNRAS* **450**, 2217 (2015).
66. Трик и др. (W.H. Trick, F. Fragkoudi, J.A.S. Hunt, J.T. Mackereth, S.D.M. White), *MNRAS* **500**, 2645 (2021).
67. Фист и др. (M.W. Feast, C.D. Laney, T.D. Kinman, F. van Leeuwen, P.A. Whitelock), *MNRAS* **386**, 2115 (2008).
68. Фрэнсис, Андерсон (Ch. Francis and E. Anderson), *MNRAS* **441**, 1105 (2014).
69. Фудзии и др. (M.S. Fujii, J. Bedorf, J. Baba, S. Portegies Zwart), *MNRAS* **482**, 1983 (2019).
70. Хассельквист и др. (S. Hasselquist, G. Zasowski, D.K. Feuillet, et al.), *Astrophys. J.* **901**, 109 (2020).
71. Чибя и др. (R. Chiba, J. Friske, R. Schonrich), *MNRAS* **500**, 4710 (2021).
72. Шварц (M.P. Schwarz), *Astrophys. J.* **247**, 77 (1981).
73. Шен и др. (J. Shen, R.M. Rich, J. Kormendy, et al.), *Astrophys. J.* **720**, L72 (2010).
74. Эйзенхауэр и др. (F. Eisenhauer, R. Genzel, T. Alexander, et al.), *Astrophys. J.* **628**, 246 (2005).