

УДК 524.6-34:52-17

ПОТОК ГЕРКУЛЕСА И ВНЕШНЕЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЕ КОЛЬЦО R_1R_2 © 2025 А. М. Мельник^{1*}, Е. Н. Подзолкова^{1,2}¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2025 года; после доработки 24 марта 2025 года; принята к публикации 26 марта 2025 года

Мы исследовали формирование потока Геркулеса в модельном Галактическом диске, включающем внешнее резонансное кольцо R_1R_2 , расположенное вблизи внешнего линдбладовского резонанса (OLR) бара. Область Геркулеса и область анти-Геркулеса, введенная для калибровки, были ограничены в пространстве окрестностью Солнца $r < 0.5$ кпк, а на плоскости (V_R, V_T) эллипсами с центрами $V_R = 25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (Геркулес) и $V_R = -25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (анти-Геркулес). Число звезд в области Геркулеса достигает максимума в период времени 2–3 млрд лет с начала моделирования, а число звезд в области анти-Геркулеса колеблется с периодом 1.8 ± 0.1 млрд лет. Большинство звезд модельного диска, расположенных в области Геркулеса, имеют орбиты, вытянутые перпендикулярно бару, а в области анти-Геркулеса — параллельно бару. Медианное значение начальных расстояний звезд в области Геркулеса немного меньше, чем радиус OLR, а в области анти-Геркулеса — немного больше. В области Геркулеса присутствуют два типа орбит. Орбиты первого типа все время лежат внутри фигуры, ограниченной двумя эллипсами, вытянутыми перпендикулярно бару. Орбиты второго типа большую часть времени вытянуты под углом -60° или 60° к большой оси бара. Распределение звезд области Геркулеса по периоду медленных колебаний углового момента имеет два максимума: $P = 0.7$ млрд лет и 2.6 млрд лет, соответствующие орбитам первого и второго типа. В области анти-Геркулеса большинство орбит захвачено качаниями относительно большой оси бара с периодом 1.9 млрд лет. В целом орбиты в области Геркулеса поддерживают внешнее кольцо R_1 , вытянутое перпендикулярно бару, а в области анти-Геркулеса — кольцо R_2 , вытянутое параллельно бару. Звезды каталога Gaia DR3, расположенные в области Геркулеса, оказались в среднем более яркими, более голубыми и обладающими большей светимостью, чем звезды области анти-Геркулеса, что, возможно, вызвано эффектами селекции, связанными с различным распределением этих выборок звезд по Галактической широте b .

Ключевые слова: Галактика: кинематика и динамика — Галактика: окрестности Солнца — каталоги: Gaia DR3

1. ВВЕДЕНИЕ

Потоком Геркулеса, или движущейся группой Геркулеса, называют группу звезд, расположенных вблизи Солнца, которые двигаются с большой радиальной скоростью в направлении от центра Галактики и заметно отстают от скорости кривой вращения в азимутальном направлении. Часто поток Геркулеса выделяют в плоскости скоростей (U, V) , где положительная радиальная скорость U направлена к центру Галактики, а положительная азимутальная скорость V — в сторону вращения Галактики. Положение потока Геркулеса на плоскости (U, V) зависит от принятых значений компонентов движения Солнца к апексу, но часто выделяют движущуюся группу, центр кото-

рой в плоскости (U, V) расположен вблизи значений $(-40, V_c - 40) \text{ км с}^{-1}$, где V_c — скорость кривой вращения на расстоянии Солнца (Dehnen, 1998). Поток Геркулеса назван по имени звезды ζ Herculis, которая движется с похожей скоростью (Eggen, 1958). В целом определение потока Геркулеса весьма размыто.

В дальнейшем мы будем использовать радиальные и азимутальные скорости, V_R и V_T , вычисленные относительно центра Галактики и исправленные за движение Солнца к апексу; при этом положительная скорость V_R соответствует направлению от центра Галактики, а положительная скорость V_T — направлению в сторону Галактического вращения.

Моделирование движения звезд в галактиках с баром показало, что движущиеся группы, похожие

*E-mail: anna@sai.msu.ru

на поток Геркулеса, возникают вблизи внешнего линдбладовского резонанса (OLR) бара. Положение OLR бара вблизи солнечного круга дает ограничение на значение угловой скорости вращения бара Ω_b , которое должно составлять $\Omega_b \approx 1.9\Omega_0$, где Ω_0 — угловая скорость вращения диска Галактики на расстоянии Солнца (Dehnen, 2000; Fux, 2001; Minchev et al., 2007; Antoja et al., 2014; Monari et al., 2017; Hunt et al., 2018).

Альтернативные концепции состоят в том, что поток Геркулеса вызван либо присутствием в Галактике спиральных рукавов (Michtchenko et al., 2018), либо движением звезд по бананообразным орбитам вблизи радиуса коротации (CR) бара (Pérez-Villegas et al., 2017), либо совместным возмущением, вызванным баром и спиральными рукавами (Chakrabarty and Sideris, 2008; Hattori et al., 2019).

Bensby et al. (2007) нашли, что звезды потока Геркулеса имеют большой разброс возрастов и металличностей. Современные исследования с привлечением данных LAMOST, APOGEE и GALAH показали, что металличность звезд потока Геркулеса в среднем несколько выше, чем металличность звезд окружающего диска (Quillen et al., 2018; Liang et al., 2023).

Использование данных каталога Gaia (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2021; Vallenari et al., 2023) позволило выделить внутри потока Геркулеса более тонкую структуру (Ramos et al., 2018; Lucchini et al., 2023).

Мы исследуем формирование потока Геркулеса, используя модель Галактики, в которой диск формирует внешнее резонансное кольцо R_1R_2 , расположенное вблизи OLR бара (Schwarz, 1981; Buta and Crocker, 1991; Byrd et al., 1994; Buta, 1995; Buta and Combes, 1996; Rautiainen and Salo, 1999, 2000; Mel'nik and Rautiainen, 2009; Rautiainen and Mel'nik, 2010; Melnik, 2019). Эллиптическое кольцо R_1 лежит немного ближе к центру Галактики и вытянуто перпендикулярно бару, а эллиптическое кольцо R_2 находится немного дальше от центра и вытянуто параллельно бару. Основой резонансных колец являются периодические орбиты, вблизи которых существует большое количество квазипериодических орбит (Contopoulos and Papayannopoulos, 1980; Contopoulos and Grosbol, 1989).

Weinberg (1994) показал, что вблизи линдбладовских резонансов бара существуют орбиты, которые периодически меняют направление вытянутости относительно большой оси бара. При этом угловой момент и полная энергия звезд меняются с тем же периодом. Мы обнаружили, что качания (librations) направления вытянутости орбит приводят к периодическому изменению морфологии

внешних колец и появлению горбов на профилях распределения радиальных скоростей, V_R , вдоль расстояния R (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024). Орбиты, захваченные резонансами бара, могут создавать и другие кинематические особенности (Fragkoudi et al., 2019; Chiba et al., 2021; Trick et al., 2021; Drimmel et al., 2023).

2. МОДЕЛЬ

Мы используем 2D-модель Галактики с аналитическим баром (de Vaucouleurs and Freeman, 1972; Athanassoula et al., 1983; Pfenniger, 1984), которая наилучшим образом воспроизводит распределение радиальных, V_R , и азимутальных, V_T , скоростей вдоль галактоцентрического расстояния R , полученных по данным Gaia EDR3 и Gaia DR3 (Melnik et al., 2021). Модель включает бар, экспоненциальный диск, классический балдж и гало. Массы бара, диска и балджа равны соответственно $1.2 \times 10^{10} M_\odot$, $3.25 \times 10^{10} M_\odot$ и $5 \times 10^9 M_\odot$. Модель имеет плоскую кривую вращения на периферии, а угловая скорость вращения модельного диска на расстоянии Солнца составляет $\Omega_0 = 30 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Бар вращается с угловой скоростью $\Omega_b = 55 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, что соответствует положениям CR и OLR бара на расстояниях $R_{CR} = 4.04 \text{ кпк}$ и $R_{OLR} = 7.00 \text{ кпк}$. Резонанс бара $-4/1$ находится на расстоянии $R_{-4/1} = 5.52 \text{ кпк}$. Сила бара (максимальное отношение амплитуды тангенциальной силы к средней радиальной силе на том же радиусе) составляет $Q_b = 0.3142$, что позволяет его классифицировать как умеренно сильный бар (Block et al., 2001; Buta et al., 2004; Díaz-García et al., 2016). Бар включается постепенно, набирая полную силу за четыре оборота бара, что соответствует времени роста $T_g = 0.45$ млрд лет. Модель содержит 10^7 частиц. Время моделирования — 6 млрд лет.

Наилучшее согласие модели с наблюдениями соответствует позиционному углу Солнца относительно большой оси бара $\theta_\odot = -45^\circ$. Так как наша модель имеет порядок симметрии $m = 2$, то оба значения позиционного угла, $\theta_\odot = -45^\circ$ и 135° , равнозначны (более подробно см. Melnik et al., 2021).

Интервалы времени, на которых модель наилучшим образом согласуется с наблюдениями, соответствуют периодам $t = 2.5 \pm 0.3$ и 4.5 ± 0.5 млрд лет с начала моделирования, когда исчезают горбы на профилях распределения радиальных скоростей (Melnik and Podzolkova, 2024). В дальнейшем мы будем использовать период времени $t = 2.5\text{--}2.6$ млрд лет для сравнения модели с наблюдениями.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Мы рассматриваем звезды каталога Gaia DR3 (Prusti et al., 2016; Katz et al., 2018b; Brown et al., 2021; Vallenari et al., 2023), расположенные на расстоянии $r < 0.5$ кпк от Солнца и вблизи плоскости Галактики, $|z| < 0.2$ кпк, имеющие отношение параллакса к его ошибке $\varpi/\varepsilon_\varpi > 5$, ошибку $RUWE < 1.4$ и измеренную спектрометром Gaia лучевую скорость V_R . На Рис. 1 приведено распределение наблюдательной выборки звезд в плоскости (V_R, V_T) . Цветом показано отношение числа звезд в площадках 2×2 км с⁻¹ к среднему числу звезд в площадках, содержащих как минимум 10 звезд. Хорошо видно, что наблюдательное распределение вытянуто в сторону положительных значений V_R и малых значений V_T .

Прямо сравнить модель с наблюдениями довольно сложно. Во-первых, наблюдательная и модельная выборки звезд содержат разное количество объектов. Во-вторых, наблюдательная выборка содержит примесь звезд толстого диска и гало, которые отсутствуют в модельной выборке. В-третьих, наблюдательная выборкаотягощена эффектами селекции, главный из которых связан с выбором звезд с известной лучевой скоростью, V_R .

Эффективный предел на измерение величин G и астрометрии Gaia — 1 050 000 источников/градус² (Prusti et al., 2016). Если программа обработки Gaia выбирает, какой из двух звезд назначить окно для измерений, то она всегда будет выбирать более яркую звезду, поэтому скученность звезд уменьшается полноту каталога за счет недостатка слабых объектов. Размер окон для измерения BP/RP фотометрии и лучевых скоростей еще больше, поэтому пределы на число одновременно измеряемых объектов здесь ниже и равны соответственно 750 000 и 35 000 источников/градус². Вероятность того, что спектрометр Gaia успешно измерит лучевую скорость звезды, V_r , зависит от ее звездной величины G_{RVS} , цвета $G - G_{RP}$ и плотности ярких звезд в данной области неба (Boubert and Everall, 2020; Rybizki et al., 2021; Everall and Boubert, 2022; Castro-Ginard et al., 2023).

Для калибровки числа звезд мы использовали область анти-Геркулеса, расположенную симметрично области Геркулеса относительно линии $V_R = 0$. На рис. 1 показано положение областей Геркулеса и анти-Геркулеса, которые ограничены эллипсами с центрами $V_R = 25$ км с⁻¹ и $V_T = 200$ км с⁻¹ (Геркулес) и $V_R = -25$ км с⁻¹ и $V_T = 200$ км с⁻¹ (анти-Геркулес) и полуосями $\Delta V_R = 15$ км с⁻¹ и $\Delta V_T = 12$ км с⁻¹. Кроме того, мы исключили из рассмотрения звезды с большим значением вертикальной скорости: $|V_z| > 50$ км с⁻¹. Значение дисперсии скоростей

звезд Gaia DR3 в вертикальном направлении на расстоянии Солнца составляет $\sigma_z = 15.46$ км с⁻¹, поэтому ограничение $|V_z| > 50$ км с⁻¹ соответствует примерно 3σ . При этом из областей Геркулеса и анти-Геркулеса было исключено соответственно 1.3% и 2.2% звезд. Таким образом, финальные выборки звезд Gaia DR3 содержат 148 404 и 108 005 объектов, соответствующих областям Геркулеса и анти-Геркулеса (см. также Раздел 4.7).

При вычислении скоростей V_R , V_T и V_z относительно центра Галактики (см. уравнения (3), (4) и (5) в Melnik et al., 2021) использовались следующие данные о движении Солнца. Компоненты скорости Солнца в направлении на центр Галактики, в сторону Галактического вращения и перпендикулярно плоскости Галактики, а также угловая скорость вращения диска Галактики на расстоянии Солнца были приняты равными соответственно $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (10, 12, 7)$ км с⁻¹ и $\Omega_0 = 30$ км с⁻¹ кпк⁻¹, что согласуется с кинематикой ОБ-ассоциаций (Melnik and Dambis, 2020).

Галактоцентрическое расстояние Солнца было принято $R_0 = 7.5$ кпк (Glushkova et al., 1998; Nikiiforov, 2004; Eisenhauer et al., 2005; Bica et al., 2006; Nishiyama et al., 2006; Feast et al., 2008; Groenewegen et al., 2008; Reid et al., 2009; Dambis et al., 2013; Francis and Anderson, 2014; Boehle et al., 2016; Branham, 2017; Iwanek et al., 2023). В целом выбор значения R_0 в диапазоне 7–9 кпк практически не влияет на наши результаты. При таком выборе R_0 азимутальная скорость вращения диска на расстоянии Солнца имеет значение $V_T = 225$ км с⁻¹.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Распределение звезд модели в плоскости (V_R, V_T) в разные периоды времени

Формирование области Геркулеса в модельном диске происходит довольно медленно. Рисунок 2 показывает распределение звезд модели, расположенных на расстоянии $r < 0.5$ кпк от Солнца, в плоскости (V_R, V_T) в разные периоды времени. Мы разбили область $-80 < V_R < 80$ км с⁻¹ и $160 < V_T < 270$ км с⁻¹ на площадки размером 2×2 км с⁻¹, вычислили число звезд n в площадках в разные моменты времени и сравнили его со средним значением числа звезд \bar{n} в площадках, содержащих как минимум одну звезду, $n \geq 1$, в таком же диапазоне скоростей. По мере увеличения отношения n/\bar{n} цвет ячейки меняется (см. шкалу справа).

Мы рассматриваем периоды времени $t = 0-100$, 1000–1100, 1500–1600 и 2500–2600 млн лет с начала моделирования. Для увеличения числа звезд в

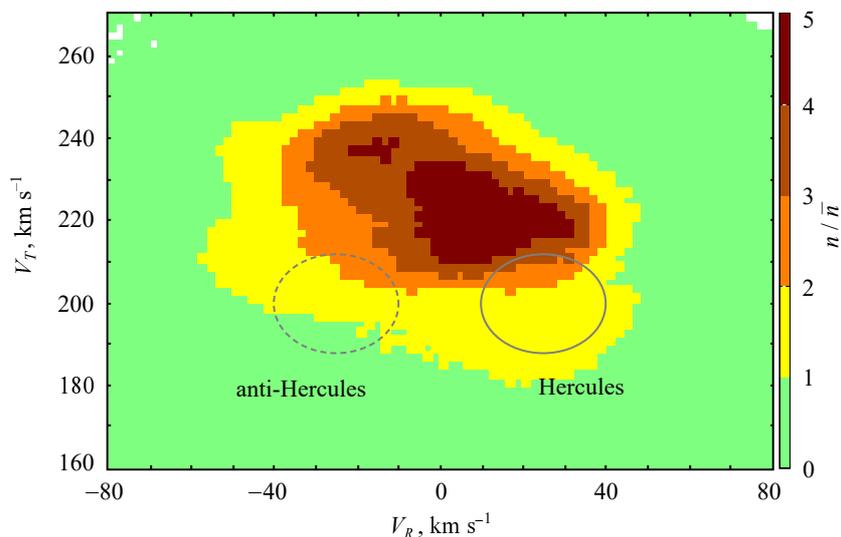


Рис. 1. Распределение звезд каталога Gaia DR3 в плоскости (V_R, V_T) . Цветом показано отношение числа звезд в площадках $2 \times 2 \text{ км с}^{-1}$ к среднему числу звезд в ячейках, содержащих как минимум 10 звезд (см. цветовую шкалу справа). Рассматриваются звезды, расположенные на расстоянии $r < 0.5$ кпк от Солнца, вблизи плоскости Галактики, $|z| < 200$ пк, имеющие отношение параллакса к ошибке параллакса $\varpi/\varepsilon_\varpi > 5$, ошибку $RUWE < 1.4$, скорость в вертикальном направлении $|V_z| < 50 \text{ км с}^{-1}$ и измеренную спектрометром Gaia лучевую скорость. Положение областей Геркулеса и анти-Геркулеса показано эллипсами с центрами $V_R = 25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (Геркулес, сплошная линия) и $V_R = -25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (анти-Геркулес, штриховая линия) и полуосями $\Delta V_R = 15 \text{ км с}^{-1}$ и $\Delta V_T = 12 \text{ км с}^{-1}$.

модельной выборке мы суммируем число звезд n , которые попадают в круг $r < 0.5$ кпк в 10 моментов времени, разнесенных друг от друга на 10 млн лет и расположенных на интервале времени 100 млн лет. В каждый из рассмотренных моментов времени круг $r < 0.5$ кпк, где r — гелиоцентрическое расстояние, включает разные звезды.

Позиционный угол Солнца относительно большой оси бара принят $\theta_\odot = 135^\circ$. В системе координат, в которой бар неподвижен, звезды на расстоянии Солнца вращаются в сторону, противоположную вращению Галактики, со средней скоростью $R_0(\Omega_0 - \Omega_b)$, что составляет 188 км с^{-1} , и за 10 млн лет в среднем перемещаются на 1.9 кпк, что заметно превышает размер круга $r < 0.5$. В целом эта оценка получена для круговых орбит, а реальные орбиты могут иметь петли, но проверка подтвердила, что суммарная выборка действительно не включает одни и те же звезды в разные моменты времени.

Рисунок 2 показывает, что распределение звезд в плоскости (V_R, V_T) меняется со временем. В начальный момент оно имеет эллиптическую форму с центром $V_R = 0 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = \Omega_0 R_0 - 7 = 218 \text{ км с}^{-1}$. Разность -7 км с^{-1} между наиболее вероятным значением скорости в начальный момент и скоростью кривой вращения $\Omega_0 R_0$ является следствием асимметричного дрейфа (например, Binney and Tremaine, 2008). Однако со временем распределение звезд деформируется: появляются отростки, расположенные как справа,

так и слева от центрального сгущения. Так называемый поток Геркулеса соответствует положительным радиальным скоростям $20\text{--}30 \text{ км с}^{-1}$ и азимутальным скоростям около 200 км с^{-1} , отстающим от скорости кривой вращения ($V_c = 225 \text{ км с}^{-1}$) на значение примерно 25 км с^{-1} . Для определенности мы ограничили поток Геркулеса эллипсом с центром $V_R = 25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ и полуосями $\Delta V_R = 15 \text{ км с}^{-1}$ и $\Delta V_T = 12 \text{ км с}^{-1}$. Видно, что наибольшее число звезд модели в области Геркулеса соответствует периоду времени $T = 2.5\text{--}2.6$ млрд лет с начала моделирования (рис. 2d).

В дальнейшем мы будем рассматривать еще и область анти-Геркулеса, которая нужна нам для сравнения модели с наблюдениями. Области Геркулеса и анти-Геркулеса расположены симметрично относительно вертикальной оси $V_R = 0$. Строгое определение областей/потоков Геркулеса и анти-Геркулеса состоит в следующем: звезда принадлежит области/потоку Геркулеса или анти-Геркулеса, если она пролетает на расстоянии $r < 0.5$ кпк от Солнца в рассматриваемый период времени и при этом ее скорости V_R и V_T лежат внутри эллипса с центром $V_R = 25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (Геркулес) или $V_R = -25 \text{ км с}^{-1}$ и $V_T = 200 \text{ км с}^{-1}$ (анти-Геркулес) и полуосями $\Delta V_R = 15 \text{ км с}^{-1}$ и $\Delta V_T = 12 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 2d).

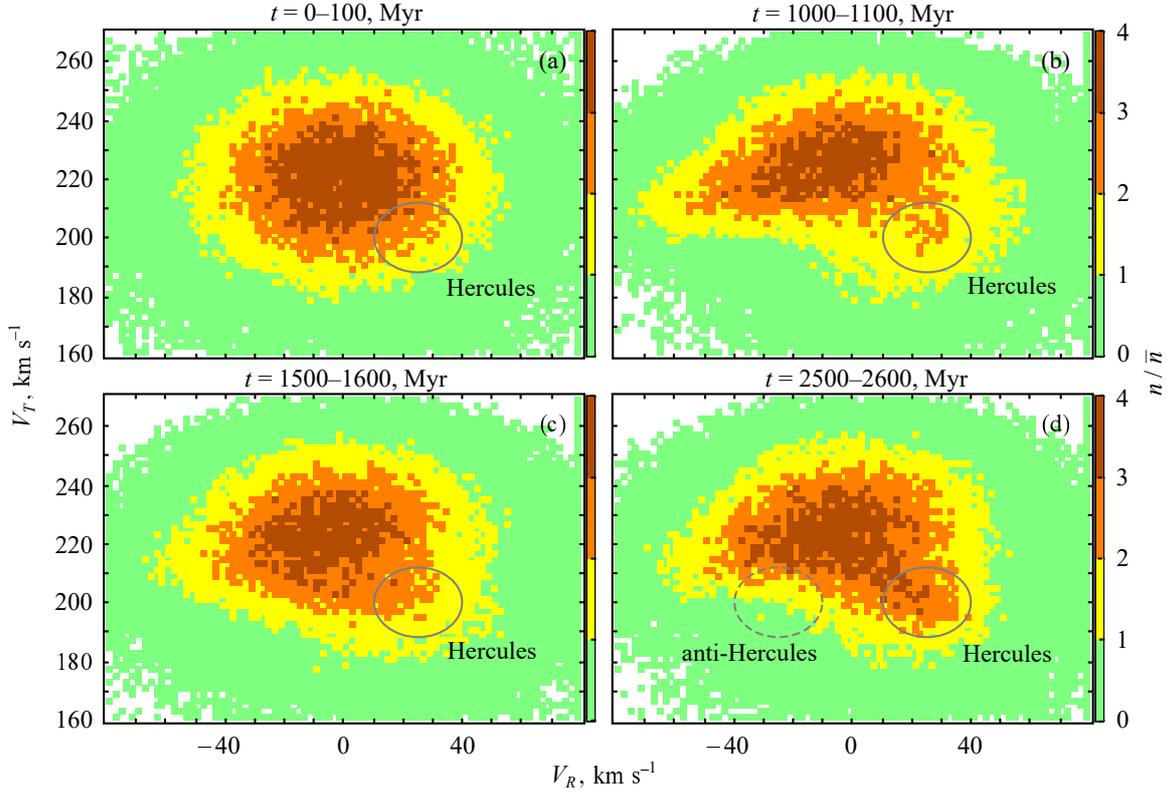


Рис. 2. Распределение звезд модели, расположенных на расстоянии от Солнца $r < 0.5$ кпк, в плоскости (V_R, V_T) в разные периоды времени. Мы вычислили число звезд n в площадках 2×2 км с $^{-1}$ и сравнили их со средним значением числа звезд \bar{n} в аналогичных ячейках, содержащих как минимум одну звезду $n \geq 1$, в области $-80 < V_R < 80$ км с $^{-1}$ и $160 < V_T < 270$ км с $^{-1}$. По мере увеличения отношения n/\bar{n} цвет ячейки меняется от зеленого к коричневому (см. цветовую шкалу справа). Положение области Геркулеса показано эллипсом с центром $V_R = 25$ км с $^{-1}$ и $V_T = 200$ км с $^{-1}$ и полуосями соответственно $\Delta V_R = 15$ км с $^{-1}$ и $\Delta V_T = 12$ км с $^{-1}$. Видно, что число звезд в области Геркулеса достигает максимального значения в период времени, близкий к $t = 2500$ млн лет с начала моделирования. На панели (d) также показано положение области анти-Геркулеса (штриховая линия), которая нужна для калибровки.

4.2. Изменение числа звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса со временем

Мы вычислили число звезд модели в областях Геркулеса, N_H , и анти-Геркулеса, N_{aH} , в период времени 0–6 млрд лет. Каждое из 60 значений N_H и N_{aH} представляет собой сумму мгновенных значений числа звезд, полученных для 10 моментов времени, разнесенных на 10 млн лет. Рисунок 3а показывает, что число звезд в области Геркулеса (N_H , красная линия) достигает первого максимума на интервале 2.0–2.6 млрд лет, затем уменьшается, а второй максимум N_H соответствует периоду 4.3–5.2 млрд лет и скорее похож на плато. Число звезд в области анти-Геркулеса (N_{aH} , синяя линия) демонстрирует хорошо выраженные колебания с периодом $P = 1.8 \pm 0.1$ млрд лет. Мы уже сталкивались с изменением числа звезд в некоторых областях с периодом, близким к 2.0 млрд лет, что вызвано качанием орбит вблизи OLR (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024). Обратим внимание, что максимум в распределении N_H (красная

линия) в период времени $t = 2.0$ –2.6 млрд лет соответствует минимуму в распределении N_{aH} (синяя линия).

Рисунок 3б показывает изменение относительной разности числа звезд, f , в областях Геркулеса и анти-Геркулеса:

$$f = 2 \frac{N_H - N_{aH}}{N_H + N_{aH}}, \quad (1)$$

которая не зависит ни от числа звезд в модели, ни от числа звезд в наблюдательной выборке.

Кроме того, на рис. 3б штриховой линией показано наблюдательное значение f ($f_g = 0.315 \pm 0.004$), вычисленное для звезд Gaia DR3, расположенных в области $r < 0.5$ кпк и $|z| < 0.2$ кпк и в эллипсах на плоскости (V_R, V_T) , соответствующих областям Геркулеса и анти-Геркулеса.

Для звезд модели минимальное и максимальное значения f составляют соответственно $f = -0.009$ и 0.656, а среднее значение f , полученное на интервале времени 0–6 млрд лет, — $\bar{f} = 0.291 \pm 0.011$.

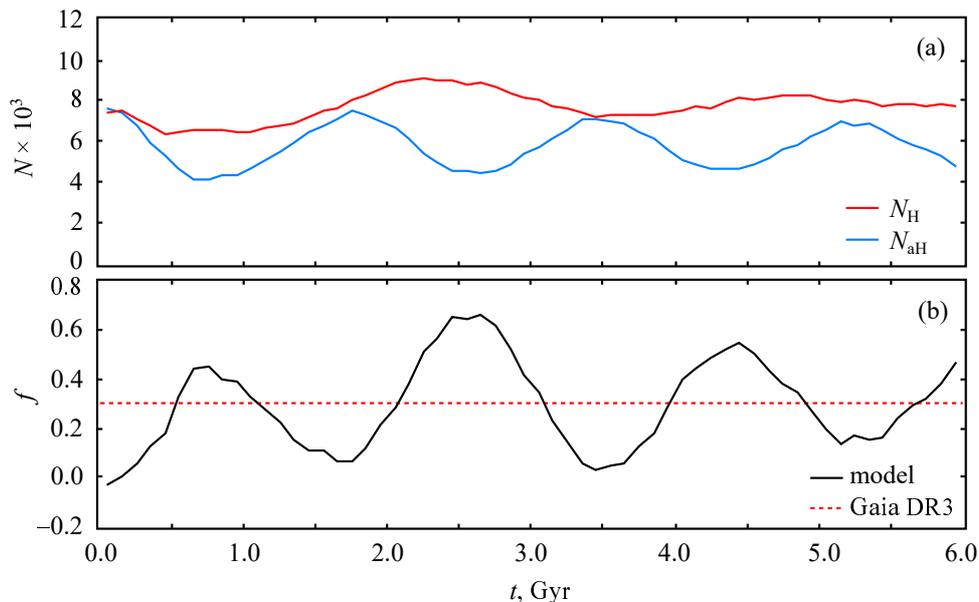


Рис. 3. Панель (а): изменение числа звезд модели в области Геркулеса (N_H , красная линия) и в области анти-Геркулеса ($N_{аН}$, синяя линия). Панель (b): изменение относительной разности звезд, f , в областях Геркулеса и анти-Геркулеса (уравнение (1)) со временем, вычисленной для звезд модели (черная кривая) и для звезд Gaia DR3 ($f_g = 0.315$, красная штриховая линия).

Таким образом, наблюдательное значение, f_g , вычисленное для звезд Gaia DR3, и среднее значение f , полученное для звезд модели, совпадают в пределах 1.6σ . Сравнение модельного и наблюдательного значений f показывает, что существует много моментов времени, когда они совпадают.

Однако значение f_g может быть ощутимо занижено. Выборка звезд Gaia в окрестности $r < 0.5$ кпк от Солнца содержит заметное количество звезд толстого диска и гало, даже внутри слоя $|z| < 200$ пк. Предположим, что распределение скоростей звезд толстого диска и гало в области $r < 0.5$ кпк симметрично относительно линии $V_R = 0$ км с⁻¹. Тогда числитель в уравнении (1) неотягощен эффектами селекции, так как количество звезд толстого диска и гало в областях Геркулеса и анти-Геркулеса должно быть примерно одинаково. Но знаменатель в уравнении (1) должен содержать удвоенное количество звезд толстого диска и гало. Поэтому значение f_g , вычисленное только для звезд тонкого диска, может быть заметно выше значения $f_g = 0.315$, полученного нами. Кроме того, эффекты селекции, связанные с выбором наиболее ярких звезд для измерения лучевых скоростей в густонаселенных площадках, также приводят к занижению значения f_g (см. раздел 4.7).

4.3. Ориентация орбит в областях Геркулеса и анти-Геркулеса

Рисунок 4а показывает распределение звезд модели в плоскости (V_R, V_T) . Рассматриваются толь-

ко звезды, которые попали в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ – 2.6 млрд лет с начала моделирования. Мы разделили звезды модели на три группы в зависимости от ориентации их орбит:

- 1) эллиптические орбиты, то есть орбиты с порядком симметрии $n_s = 2$, вытянутые перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$);
- 2) эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ или $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$);
- 3) прочие орбиты.

Угол θ_{00} определяет среднюю ориентацию орбиты относительно большей оси бара в период времени $t = 0$ – 3 млрд лет с начала моделирования. Чтобы рисунок не был перегружен объектами, мы приводим только 2% звезд. Также показаны границы областей Геркулеса и анти-Геркулеса. Заметим, что в области Геркулеса большинство звезд имеют орбиты, вытянутые перпендикулярно бару, а в области анти-Геркулеса — параллельно бару.

На рис. 4б показана наиболее вероятная ориентация орбит в различных областях плоскости (V_R, V_T) . Мы разбили плоскость (V_R, V_T) в диапазоне значений $-80 < V_R < 80$ км с⁻¹ и $160 < V_T < 270$ км с⁻¹ на площадки размером 2×2 км с⁻¹ и для каждой площадки вычислили число звезд n_\perp , орбиты которых имеют эллиптическую форму ($n_s = 2$) и вытянуты перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$); число звезд n_\parallel , орбиты

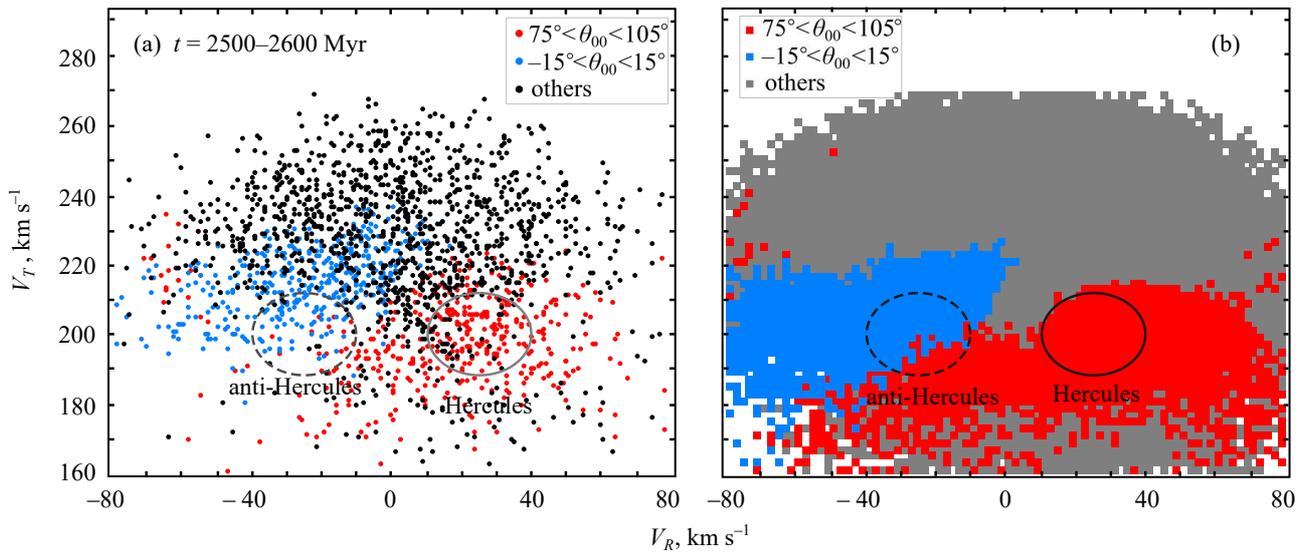


Рис. 4. Панель (а) демонстрирует распределение звезд модели в плоскости (V_R, V_T) и ориентацию их орбит относительно бара. Звезды с эллиптическими орбитами, вытянутыми перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$), показаны красным цветом; звезды с эллиптическими орбитами ($n_s = 2$), вытянутыми параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$), — синим цветом; все прочие случаи — серым цветом. Угол θ_{00} определяет среднюю ориентацию орбиты относительно большой оси бара в период времени 0–3 млрд лет. Представлено 2% звезд. Рассматриваются звезды модели, которые попадают в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ – 2.6 млрд лет. Также показаны границы областей Геркулеса (сплошная линия) и анти-Геркулеса (штриховая линия). Панель (b) демонстрирует распределение площадок размером $2 \times 2 \text{ км с}^{-1}$ в плоскости (V_R, V_T) , цвет которых показывает наиболее вероятную ориентацию орбит. Площадки, в которых большая часть звезд имеет эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$), показаны красным цветом; площадки, в которых большая часть звезд имеет эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ \cup 165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$), показаны синим цветом; площадки, в которых большая часть звезд имеет другую ориентацию орбит или другой порядок симметрии, показаны серым цветом. Хорошо видно, что большинство звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса имеют эллиптические орбиты, вытянутые соответственно перпендикулярно и параллельно бару.

которых имеют эллиптическую форму ($n_s = 2$) и вытянуты параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ или $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$); и число звезд n_{oth} с другим значением n_s ($n_s \neq 2$) или другой ориентацией орбиты. Если большинство звезд в площадке имеют эллиптические орбиты, вытянутые перпендикулярно бару ($n_\perp > n_\parallel$ и $n_\perp > n_{\text{oth}}$), то площадка показана красным цветом; если у большинства звезд имеются эллиптические орбиты, вытянутые параллельно бару ($n_\parallel > n_\perp$ и $n_\parallel > n_{\text{oth}}$), то — синим цветом; и если большинство орбит имеет другой порядок симметрии или другую ориентацию ($n_{\text{oth}} > n_\perp$ и $n_{\text{oth}} > n_\parallel$), то площадка представлена серым цветом. Видно, что в областях Геркулеса и анти-Геркулеса большинство звезд имеют эллиптические орбиты, вытянутые соответственно перпендикулярно и параллельно бару.

Рисунок 5 показывает распределения эллиптических орбит по углу θ_{00} в областях Геркулеса и анти-Геркулеса. Заметим, что доля эллиптических орбит ($n_s = 2$) в этих областях достигает значений соответственно 85% и 87%. На рис. 5 видно, что практически все звезды (84%) в области Геркулеса имеют орбиты, вытянутые перпендикулярно

бару ($75^\circ \leq \theta_0 < 105^\circ$), а в области анти-Геркулеса большинство звезд имеют орбиты, вытянутые параллельно бару: 54% ориентированы под углом θ_{00} в диапазоне $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$ и 14% — под углом θ_{00} в диапазоне $0^\circ \leq \theta_{00} \leq 15^\circ$; и только 18% вытянуты перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$).

Среди всех звезд модели, которые попадают в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ – 2.6 млрд лет, 21% имеют эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$), и 19% — эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ или $165^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$). Причем в последнем случае 11% имеют орбиты, ориентированные под углом θ_{00} в диапазоне $0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$, и 8% — в диапазоне $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$. Таким образом, распределения орбит по углу θ_{00} в областях Геркулеса и анти-Геркулеса существенно отличаются от общего распределения звезд в окрестности Солнца.

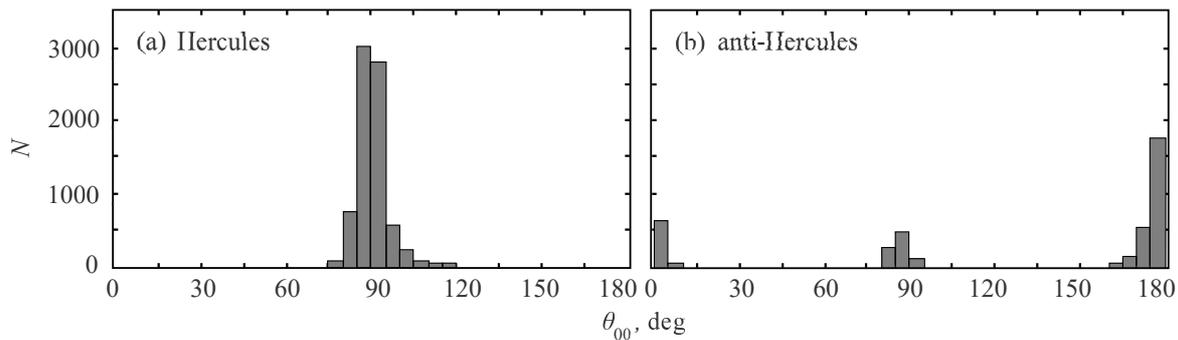


Рис. 5. Распределения эллиптических орбит ($n_s = 2$) по углу θ_{00} в областях Геркулеса (а) и анти-Геркулеса (б). Угол θ_{00} лежит в диапазоне $0^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$ и определяет среднюю ориентацию орбит относительно большой оси бара в период времени $t = 0$ –3 млрд лет. Рассматриваются звезды модели, которые попадают в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ –2.6 млрд лет. Видно, что большинство звезд в области Геркулеса имеют орбиты, вытянутые перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$), а в области анти-Геркулеса — вытянутые параллельно бару, а именно под углом θ_{00} в диапазоне $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$.

4.4. Начальные значения R , V_T и V_R в областях Геркулеса и анти-Геркулеса

Рисунок 6 демонстрирует распределение числа звезд модели N в областях Геркулеса и анти-Геркулеса вдоль начального значения галактоцентрического расстояния, $R(0)$. Ширина бина по $R(0)$ равна 250 пк. Рассматриваются звезды модели, которые попадают в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ –2.6 млрд лет. Медианные значения начальных расстояний R в областях Геркулеса и анти-Геркулеса равны соответственно 6.8 кпк и 7.3 кпк, то есть большинство звезд прилетают в область Геркулеса с расстояний, меньших, чем радиус OLR ($R_{\text{OLR}} = 7.0$ кпк), а в область анти-Геркулеса — с расстояний, больших, чем R_{OLR} .

На рис. 6а и 6с также показаны медианные значения начальной азимутальной скорости, $V_T(0)$, и \pm дисперсия V_T , вычисленные в каждом бине по $R(0)$. Обращает на себя внимание общая тенденция: уменьшение значения V_T с ростом R (хотя в области Геркулеса наблюдается небольшое плато, 7.0–8.0 кпк), что может быть связано с сильно вытянутыми орбитами. Чтобы звезда могла быстро попасть на радиус OLR с начального расстояния $R(0)$, меньшего (большего), чем $R_{\text{OLR}} = 7.0$ кпк, она должна иметь большую (меньшую) азимутальную скорость, чем в среднем имеют звезды на этом расстоянии.

Рисунки 6б и 6д показывают медианные значения начальной радиальной скорости, $V_R(0)$, и \pm дисперсию V_R . Медианные значения $V_R(0)$ в области Геркулеса колеблются в диапазоне $[-2; 8]$ км с⁻¹. Интересно, что в бине $R(0) = 7.00$ –7.25 кпк, соответствующем максимальному количеству звезд N , медианная радиальная скорость составляет $V_R(0) \approx 0$. Это связано

с тем, что наиболее вероятное значение начальной радиальной скорости равно нулю, $V_R(0) = 0$ км с⁻¹, поэтому таких звезд в модели много.

Что касается области анти-Геркулеса (рис. 6д), то здесь медианное значение начальной скорости резко уменьшается с 25 км с⁻¹ до 3 км с⁻¹ на интервале 6.0–7.5 кпк и колеблется в диапазоне $[-5, 3]$ км с⁻¹ на интервале 7.5–8.5 кпк. И опять мы видим, что бины с максимальным количеством частиц N соответствуют $V_R(0) \approx 0$ км с⁻¹.

Дисперсия начальных значений азимутальных скоростей в областях Геркулеса и анти-Геркулеса составляет $\sigma_T \approx 20$ км с⁻¹, что близко к дисперсии скоростей звезд на расстоянии R_0 . Дисперсия начальных значений радиальных скоростей в области Геркулеса составляет $\sigma_R \approx 30$ км с⁻¹, что тоже близко к дисперсии скоростей окружающего диска. А в области анти-Геркулеса дисперсия начальных значений радиальных скоростей заметно больше, $\sigma_R \approx 38$ км с⁻¹, что, возможно, связано с качаниями орбит.

4.5. Орбиты в областях Геркулеса и анти-Геркулеса

На рис. 7 представлены типичные орбиты звезд в областях Геркулеса (а, б) и анти-Геркулеса (с, д). Галактика вращается против часовой стрелки. Орбиты анализируются в системе отсчета вращающегося бара. Все рассматриваемые звезды находятся за пределом радиуса коротации бара ($R > R_{\text{CR}}$), поэтому в системе отсчета бара они вращаются в сторону, противоположную вращению Галактики, то есть по часовой стрелке. Предполагаемое положение Солнца относительно бара и начальное положение звезды показаны соответственно желтым и черным кружками. Начальные значения расстояний радиальной и азимутальной скоростей звезд

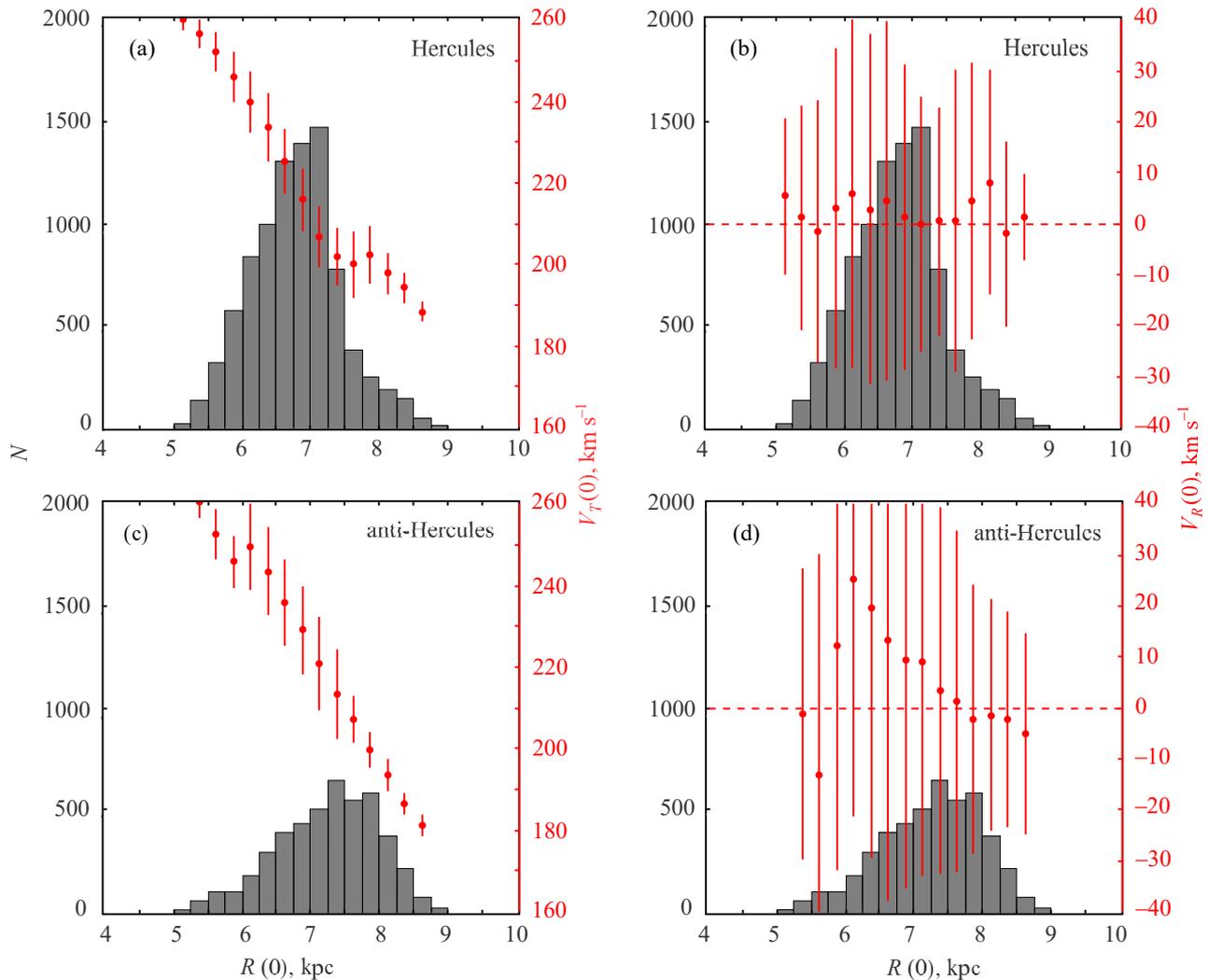


Рис. 6. Распределения числа звезд модели N вдоль начального значения расстояния, $R(0)$ (серые столбики) в областях Геркулеса (a, b) и анти-Геркулеса (c, d). На эти гистограммы наложены медианные значения начальной азимутальной скорости, $V_T(0)$ (a, c) и медианные значения начальной радиальной скорости, $V_R(0)$ (b, d) (красные кружки), вычисленные в каждом бине по R . Красные вертикальные линии показывают \pm дисперсию медианных скоростей. Масштаб изменений V_T и V_R показан на правых вертикальных осях. Хорошо видна общая тенденция изменения V_T : уменьшение значения $V_T(0)$ с ростом $R(0)$, хотя в области Геркулеса наблюдается небольшое плато (7.0–8.0 кпк). Медианные значения скорости $V_R(0)$ в области Геркулеса колеблются в диапазоне $[-2, 8]$ км с $^{-1}$, а в области анти-Геркулеса они резко уменьшаются с 25 км с $^{-1}$ до 3 км с $^{-1}$ на интервале 6.0–7.5 кпк, а затем колеблются в диапазоне $[-5, 3]$ км с $^{-1}$ на интервале 7.5–8.5 кпк. В целом бины по R , содержащие максимальное количество звезд, имеют близкое к нулю значение начальной радиальной скорости, $V_R(0)$. Рассматриваются звезды модели, которые попадают в окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк в период времени $t = 2.5$ –2.6 млрд лет.

приведены над каждой панелью. Сегменты орбит, пройденные звездами на интервалах времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет, показаны соответственно зеленым, красным и синим цветом. Для каждой орбиты приводятся значения угла θ_{00} , характеризующего среднюю ориентацию орбиты относительно большой оси бара на интервале времени 0–3 млрд лет. Мы также будем рассматривать угол θ_0 , определяющий ориентацию орбиты относительно большой оси бара на интервале времени одного радиального колебания звезды (от одного пересече-

ния среднего радиуса орбиты с отрицательной радиальной скоростью до другого). Для каждой звезды приводится период P изменения углового момента и полной энергии, а также энергия Якоби E_J , которая сохраняется после выхода бара на полную мощность.

Рисунок 8а показывает колебания углового момента L звезд А, В, С и D, орбиты которых показаны на рис. 7 соответственно на панелях (a), (b), (c) и (d). Отчетливо видны быстрые и медленные колебания L . Быстрые колебания с пе-

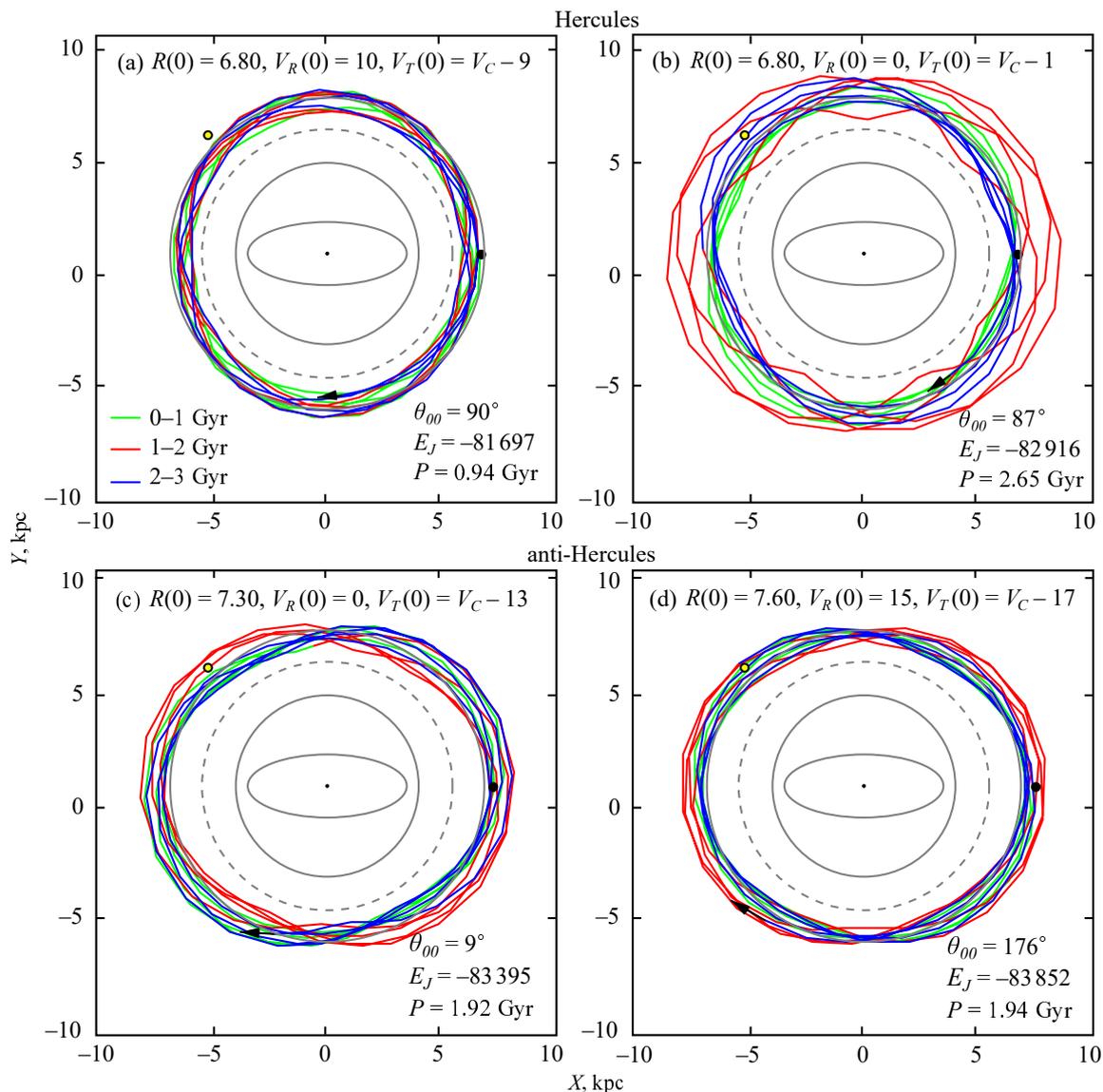


Рис. 7. Типичные орбиты звезд в областях Геркулеса (панели (a) и (b)) и анти-Геркулеса (панели (c) и (d)). Орбиты представлены в системе отсчета бара, в которой рассматриваемые звезды вращаются в направлении, противоположном вращению Галактики. Горизонтальная ось X направлена вдоль бара, вертикальная Y — поперек бара. Предполагаемое положение Солнца и начальное положение звезды показаны соответственно желтым и черным кружками. Начальные значения расстояний, радиальной и азимутальной скорости звезд приведены на каждой панели. Сегменты орбит, пройденные звездами на интервалах времени 0–1, 1–2 и 2–3 млрд лет, показаны соответственно зеленым, красным и синим цветом. Для каждой орбиты приводятся значения угла θ_{00} , характеризующего среднюю ориентацию орбиты относительно большой оси бара на интервале времени 0–3 млрд лет, энергия Якоби E_J и период P изменения углового момента звезды. Значения расстояний, скоростей и E_J даны соответственно в единицах кпк, км с⁻¹ и км² с⁻². Также показаны положения бара (эллипс), CR и OLR (сплошные серые линии) и резонанса $-4/1$ (серая штриховая линия). Отметим, что орбиты в области Геркулеса в среднем вытянуты перпендикулярно бару, а орбиты в области анти-Геркулеса — параллельно бару.

риодом $P = 0.13$ млрд лет происходят два раза за один период обращения звезды относительно бара. Медленные колебания являются результатом биений между частотой, с которой звезда встречает возмущения от бара $2(\Omega - \Omega_b)$, и эпициклической частотой κ (подробнее см. Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024). Периоды медленных

колебаний L звезд А, В, С и D составляют соответственно $P = 0.94, 2.65, 1.92$ и 1.94 млрд лет.

Рисунки 8b, 8c, 8d, 8e показывают колебания угла θ_0 , характеризующего направление вытянутости орбиты на интервале времени одного радиального колебания. Панели (b), (c), (d) и (e) этого рисунка соответствуют орбитам звезд, показанных на рис. 7a, 7b, 7c, 7d. Периоды P медленных измене-

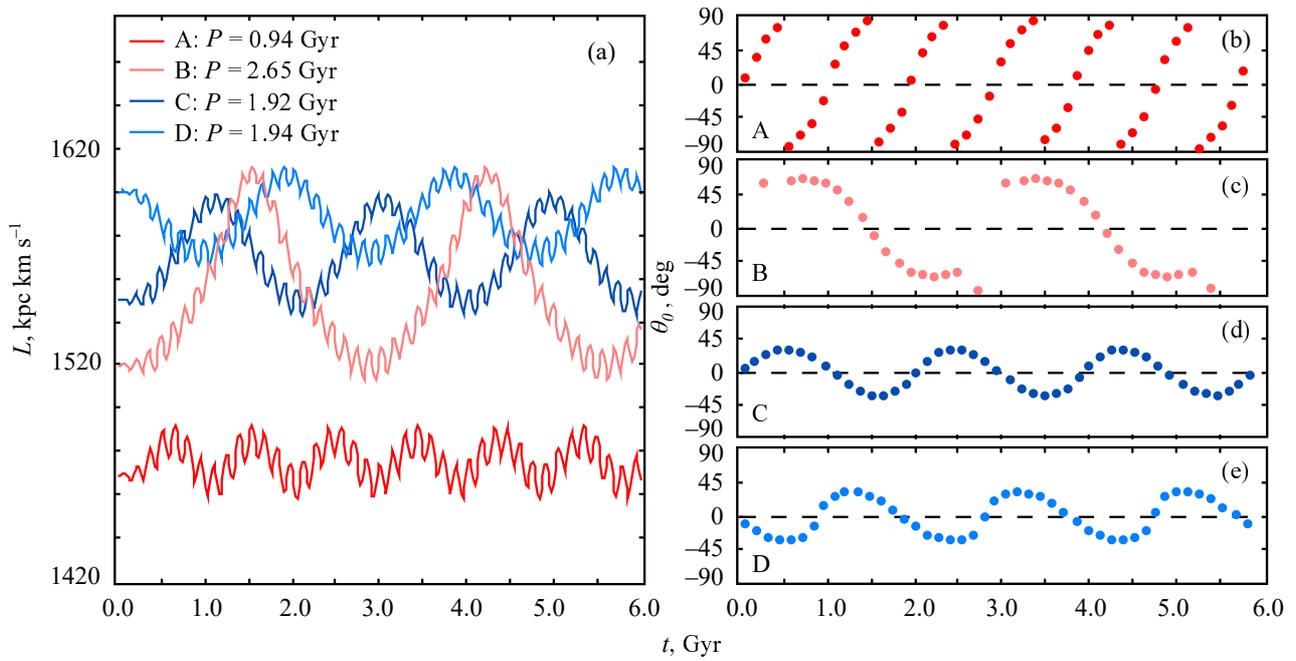


Рис. 8. Панель (a): колебания углового момента L звезд А, В, С и D, орбиты которых показаны на рис. 7 соответственно на панелях (a), (b), (c) и (d). Хорошо видны быстрые и медленные колебания L . Периоды медленных колебаний L звезд А, В, С и D равны соответственно 0.94, 2.65, 1.92 и 1.94 млрд лет. Панели (b)–(e): колебания угла θ_0 , характеризующего направление вытянутости орбиты на интервале одного радиального колебания звезды. Отчетливо видно, что на панели (b) значение θ_0 только увеличивается, а на панелях (c), (d), (e) значения θ_0 совершают колебания.

ний углового момента L совпадают с периодами изменения направления вытянутости орбиты. Заметим, что эксцентриситет и средний радиус орбиты также меняются с периодом P (см., например, рис. 11 в Melnik et al., 2023).

На рис. 7а изображена типичная орбита звезды в области Геркулеса. Начальное расстояние, $R(0)$, равно 6.8 кпк, что меньше радиуса OLR ($R_{\text{OLR}} = 7.0$ кпк), а начальная азимутальная скорость составляет $V_T(0) = 216 \text{ км с}^{-1}$, что немного меньше наиболее вероятного значения начальной азимутальной скорости (218 км с^{-1}) на этом расстоянии. Начальная радиальная скорость составляет $V_R(0) = 10 \text{ км с}^{-1}$. Небольшая положительная радиальная скорость нужна, чтобы орбита была достаточно вытянута и звезда попадала в окрестность $r < 0.5$ кпк от Солнца. Заметно, что орбита меняется со временем, но при этом все время лежит внутри фигуры, ограниченной двумя эллипсами, вытянутыми перпендикулярно бару. Среднее значение угла θ_{00} составляет $\theta_{00} = 90^\circ$.

Рисунок 8b показывает изменение направления вытянутости орбиты звезды (рис. 7а) со временем. Отметим, что угол θ_0 практически линейно увеличивается от значения -90° до 90° , а затем начинается новый оборот. Значения $\theta_0 = \pm 90^\circ$ соответствуют одной и той же ориентации эллиптической орбиты. Изменение направления вытянутости

орбиты звезды А происходит только в направлении увеличения θ_0 . Таким образом, здесь мы имеем дело не с колебаниями в ориентации орбиты, а с вращением направления вытянутости орбиты в одном направлении. В рассматриваемом случае орбита вращается в положительном направлении, то есть в сторону вращения Галактики. Заметим, что скорость вращения орбиты слегка увеличивается при ориентации орбиты параллельно бару ($\theta_0 \approx 0^\circ$).

На рис. 7b представлена еще одна типичная для области Геркулеса орбита. Начальные значения расстояния и азимутальной скорости рассматриваемой звезды составляют $R(0) = 6.8$ кпк и $V_T(0) = 224 \text{ км с}^{-1}$. Отчетливо видно, что направление вытянутости орбиты меняется от $\theta_0 = \pm 90^\circ$ (вытянута перпендикулярно бару) до $\theta_0 = 0^\circ$ (вытянута параллельно бару). Угол θ_{00} , определяющий среднюю ориентацию орбиты, составляет $\theta_{00} = 87^\circ$, так как большую часть времени на интервале 0–3 млрд лет орбита вытянута перпендикулярно бару. Рисунок 8c показывает, что колебания угла θ_0 не являются синусоидальными. Мы видим резкий скачок от значения $\theta_0 = -90^\circ$ к 60° , далее θ_0 уменьшается по синусоидальному закону до -60° , после чего идет быстрая перестройка орбиты: сначала значение θ_0 падает до -90° , а затем резко увеличивается до $\theta_0 = 60^\circ$. Заметим, что расстояние R от центра Галактики до звезды меняется в очень широком диапазоне значений, $R = 6.0\text{--}8.8$ кпк, то

есть звезда очень близко подходит к резонансу $-4/1$ ($R_{-4/1} = 5.5$ кпк) во внутренней области и уходит на расстояния, превышающие радиус OLR ($R_{\text{OLR}} = 7.0$ кпк) на 1.8 кпк во внешней области. В целом перед нами орбита с широким диапазоном изменения расстояния R .

Возможно, именно эти орбиты (рис. 7b) увеличивают число звезд N_H в области Геркулеса в период времени 2–3 млрд лет (рис. 3a). Видно, что угол θ_0 в промежутке времени 1.8–2.6 млрд лет имеет значение, близкое к $\theta_0 \approx -60^\circ$ (рис. 8c). При этом орбита наклонена влево (по вращению Галактики) относительно малой оси бара и проходит вблизи Солнца (рис. 7b, синяя линия). Кроме того, звезда, пролетая мимо Солнца, имеет положительную радиальную скорость, а значит, может попасть в область Геркулеса на плоскости (V_R, V_T). В другие промежутки времени эта звезда не попадает в окрестность Солнца ($r < 0.5$ кпк) с положительной радиальной скоростью ($10 < V_R < 40$ км с⁻¹): в период времени 0.5–1.3 млрд лет орбита звезды наклонена вправо относительно малой оси бара (рис. 7b, зеленая линия) и проходит на большом расстоянии от Солнца, а в период времени 1.3–1.8 млрд лет орбита вытянута практически параллельно бару ($\theta_0 \approx 0^\circ$) и звезда пролетает вблизи Солнца с отрицательными радиальными скоростями (рис. 7b, красная линия).

Рисунок 7c показывает типичную орбиту звезды в области анти-Геркулеса. Начальные значения расстояния и азимутальной скорости составляют $R(0) = 7.3$ кпк и $V_T(0) = 212$ км с⁻¹. Нетрудно заметить, что орбита в среднем вытянута практически параллельно бару ($\theta_{00} = 9^\circ$). То, что значение $\theta_{00} \neq 0^\circ$, связано с тем, что большую часть времени на интервале 0–3 млрд лет орбита наклонена вправо относительно малой оси бара. Направление вытянутости орбиты колеблется практически по синусоидальному закону от -45° до 45° с периодом $P = 1.92$ млрд лет (рис. 8d). В наших предыдущих работах мы показали, что качания таких орбит вызывают периодическое изменение морфологии внешних колец и появление горбов на профилях распределения радиальных скоростей, V_R , вдоль расстояния R (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024).

На рис. 7d представлена еще одна орбита звезды в области анти-Геркулеса. Начальные значения расстояния и азимутальной скорости составляют $R(0) = 7.6$ кпк и $V_T(0) = 208$ км с⁻¹. Угол θ_{00} равен 176° , то есть орбита большую часть времени на интервале 0–3 млрд лет наклонена влево относительно малой оси бара. Отчетливо видно, что угол θ_0 медленно уменьшается от 45° до -45° , а затем быстро увеличивается обратно до 45° (рис. 8e).

Сравнение рис. 8d и 8e, а также рис. 7c и 7d указывает на то, что качания направления вытянутости орбит звезд С и D происходят практически в противофазе.

В целом орбиты звезд в области Геркулеса (рис. 7a и 7b) поддерживают внешнее кольцо R_1 , вытянутое перпендикулярно бару, а в области анти-Геркулеса (рис. 7c и 7d) — кольцо R_2 , вытянутое параллельно бару.

Эксцентриситеты орбит, показанных на рис. 7, также меняются с периодами, равными периодам медленных изменений углового момента звезд. Диапазоны изменения эксцентриситетов звезд А, В, С и D равны соответственно 0.38–0.58 (a), 0.44–0.73 (b), 0.43–0.70 (c), 0.30–0.62 (d). Таким образом, звезды В и С имеют более вытянутые орбиты, чем звезды А и D.

4.6. Распределение орбит по периоду P в областях Геркулеса и анти-Геркулеса

На рис. 9 построено распределение орбит по периоду P медленных колебаний углового момента в областях Геркулеса (a) и анти-Геркулеса (b). Заметно, что в области Геркулеса распределение имеет два максимума, соответствующих периодам $P = 0.7$ млрд лет и 2.6 млрд лет. Первый максимум ($P = 0.7$ млрд лет) создается орбитами, которые все время лежат внутри фигуры, ограниченной двумя эллипсами, вытянутыми перпендикулярно бару (рис. 7a), поэтому эти орбиты в среднем вытянуты перпендикулярно бару, а звезды на них проводят большую часть времени внутри радиуса OLR, $R \leq R_{\text{OLR}}$. Вторым максимумом ($P = 2.6$ млрд лет) создается орбитами, которые большую часть времени вытянуты под углом $\theta_0 \approx 60^\circ$ или $\theta_0 \approx -60^\circ$ к большой оси бара и небольшую часть времени — параллельно бару (рис. 7b). Кроме того, эти орбиты характеризуются существенным диапазоном изменения расстояний R , $\Delta R > 2.5$ кпк. При этом звезды примерно половину времени находятся внутри радиуса OLR и половину — снаружи.

Рисунок 9b показывает, что максимум распределения орбит по периоду P в области анти-Геркулеса соответствует $P = 1.9$ млрд лет. Этот период совпадает с наиболее вероятным значением периода изменения углового момента звезд на качающихся орбитах вблизи OLR (Melnik and Podzolkova, 2024). Таким образом, мы ожидаем, что большинство орбит в области анти-Геркулеса качаются относительно большой оси бара.

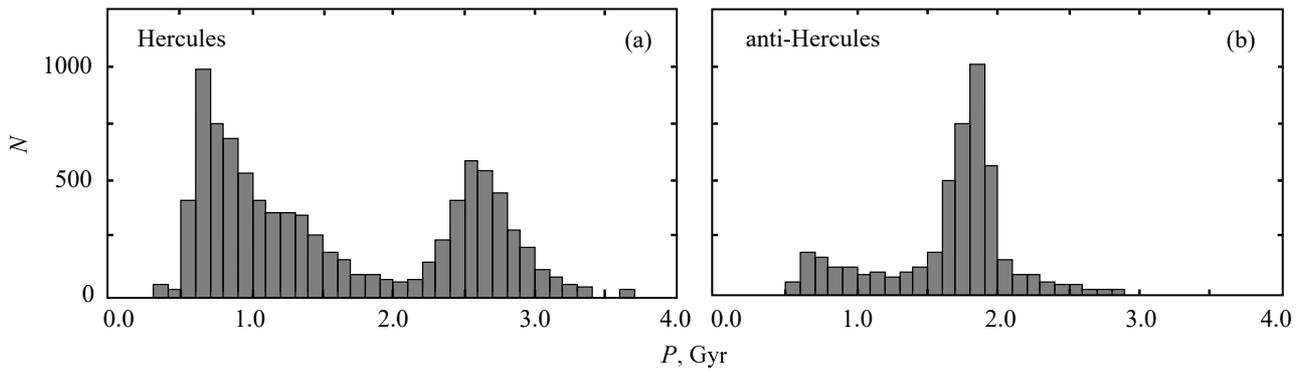


Рис. 9. Распределение орбит по периоду P медленных колебаний углового момента в областях Геркулеса (a) и анти-Геркулеса (b). Можно видеть, что в области Геркулеса распределение имеет два максимума, расположенных на $P = 0.7$ млрд лет и 2.6 млрд лет, а в области анти-Геркулеса положение максимума соответствует $P = 1.9$ млрд лет.

Таблица 1. Медианные значения величины G , цвета $G - G_{RP}$, абсолютной величины M_G и числа звезд N с известными значениями соответствующих параметров в областях Геркулеса и анти-Геркулеса по данным Gaia DR3

Области	G , mag	N_G	$G - G_{RP}$, mag	$N_{G-G_{RP}}$	M_G , mag	N_{M_G}
Геркулес	13.4174 ± 0.0042	148 403	0.6682 ± 0.0005	147 903	5.7723 ± 0.0045	148 403
анти-Геркулес	13.4972 ± 0.0048	108 002	0.6792 ± 0.0006	107 656	5.9110 ± 0.0054	108 002

4.7. Сравнение с данными Gaia DR3

Исследование модельных выборок звезд показало, что в начальный момент времени звезды в области Геркулеса находятся в среднем немного ближе к центру Галактики, чем звезды в области анти-Геркулеса (раздел 4.4). Если диск Галактики формировался изнутри наружу (например, Chiappini et al., 2001), то можно ожидать, что звезды в области Геркулеса должны быть в среднем более старыми и красными, чем в области анти-Геркулеса. Здесь мы используем тот факт, что большинство звезд каталога Gaia лежат на главной последовательности (ГП) диаграммы Герцшпрунга–Рассела (Babusiaux et al., 2018a). Эта гипотеза была бы верна, если бы подавляющее число звезд в окрестности Солнца образовались до эпохи формирования бара, однако недавние эпизоды звездообразования способны поменять распределение возрастов звезд в этих областях. Кроме того, эффекты селекции зависят не только от величины G и цвета, но и от направления на звезду. В густо населенных областях на небе программа обработки автоматически выбирает более яркие объекты (например, Boubert and Everall, 2020).

Таблица 1 представляет медианные оценки величины G , цвета $G - G_{RP}$ и абсолютной величины M_G звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса, полученные по данным Gaia DR3. Также приводятся их ошибки и число звезд с известными значениями соответствующих параметров. Абсолютные звездные величины M_G вычислялись без учета

поглощения (оно должно быть мало в окрестности 0.5 кпк от Солнца):

$$M_G = G - 5 \lg r - 10, \quad (2)$$

где r — гелиоцентрическое расстояние, выраженное в кпк. Мы используем значение $G - G_{RP}$, потому что оно точнее, чем $G_{BP} - G_{RP}$, и определено для большего количества звезд (Andrae et al., 2018; Vallenari et al., 2023).

Данные таблицы 1 указывают на то, что область Геркулеса содержит немного более яркие, более голубые и обладающие большей светимостью звезды, чем область анти-Геркулеса. Хотя различия медианных значений не превосходят 0^m14 , их статистическая значимость (отношение значения к ошибке) превышает 8σ .

На рис. 10a показано распределение разностей Δn числа звезд Gaia DR3 в области Геркулеса и нормированного числа звезд в области анти-Геркулеса, вычисленных в малых площадках на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. По горизонтальной оси отложен цвет $G - G_{RP}$, а по вертикальной — абсолютная звездная величина M_G . Размеры площадок равны соответственно 0^m026 и 0^m157 . Нормировка на число звезд необходима, так как области Геркулеса и анти-Геркулеса содержат разное количество звезд. Коэффициент нормировки $k = 1.37$ равен отношению числа звезд с известными значениями лучевых скоростей, параллакс, величин G и G_{RP} в областях Геркулеса и анти-Геркулеса. Площадки, в которых число

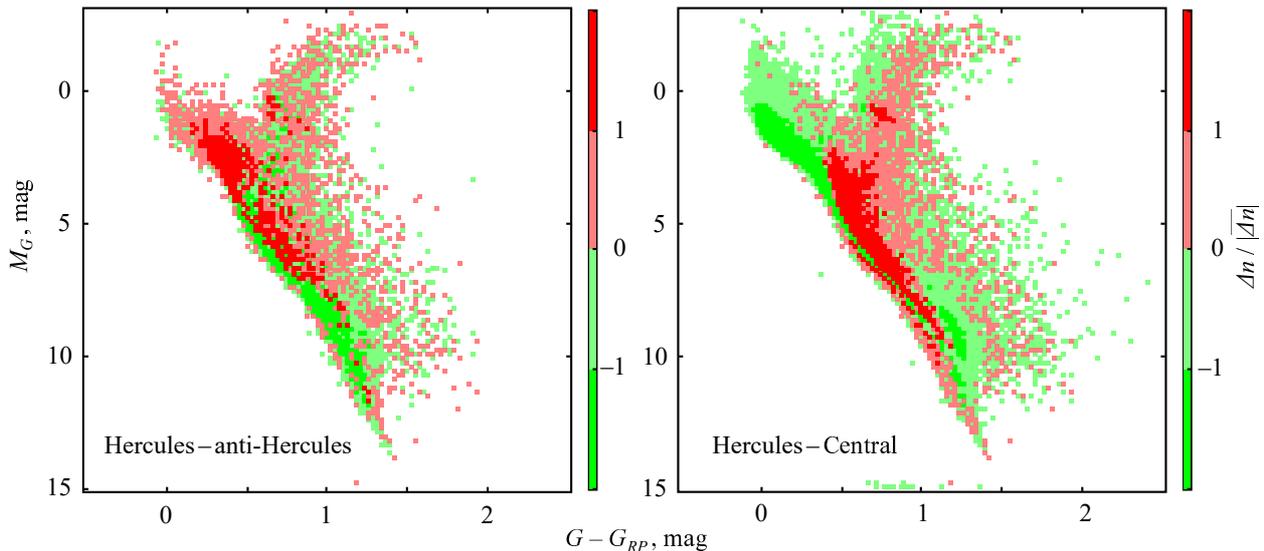


Рис. 10. Распределение разностей Δn числа звезд Gaia DR3 области Геркулеса и нормированного числа звезд области анти-Геркулеса (а) и центральной области (б) на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. По горизонтальной оси отложен цвет $G - G_{RP}$, а по вертикальной — абсолютная звездная величина M_G . Размеры площадок равны соответственно $0^{\text{m}}026$ и $0^{\text{m}}157$. Площадки, в которых число звезд области Геркулеса больше (меньше) нормированного числа звезд другой области (а именно, области анти-Геркулеса (а) и центральной области (б)), показаны соответственно оттенками красного (зеленого). Среднее значение разности Δn составляет $|\overline{\Delta n}| \approx 7$. Превышение числа звезд одной области над числом звезд другой области более чем на $|\overline{\Delta n}|$ показано соответственно ярким красным или зеленым цветом (см. цветовую палитру справа). На панели (а) хорошо видно, что верхняя часть главной последовательности, соответствующая наиболее голубым и ярким звездам, окрашена в красный цвет, что указывает на преобладание звезд в области Геркулеса над звездами в области анти-Геркулеса в этой части диаграммы, а ветвь красных гигантов представлена обеими областями примерно в одинаковой мере. На панели (б) центральная область включает относительно больше голубых и ярких звезд главной последовательности, чем область Геркулеса, а ветвь красных гигантов представлена в основном звездами области Геркулеса.

звезд области Геркулеса больше (меньше) нормированного числа звезд области анти-Геркулеса, показаны соответственно оттенками красного (зеленого). Среднее значение разности Δn составляет $|\overline{\Delta n}| \approx 7$. Отметим, что часть ГП, соответствующая наиболее голубым и ярким звездам, окрашена в красный цвет, что указывает на избыток звезд в области Геркулеса по сравнению с областью анти-Геркулеса в этой части диаграммы. Заметим, что ветвь красных гигантов представлена обеими областями примерно в одинаковой мере. Следовательно, область Геркулеса, вероятно, содержит большую долю относительно молодых звезд, чем область анти-Геркулеса. Однако этот результат может быть также вызван эффектами селекции: звезды в областях Геркулеса и анти-Геркулеса по-разному распределены в пространстве, хотя и ограничены поверхностями $r < 0.5$ кпк и $|z| < 0.2$ кпк, что будет обсуждаться далее.

Для полноты картины мы также сравнили между собой распределения звезд области Геркулеса и центральной области (рис. 10b). Центральная область содержит 361 617 звезд Gaia DR3, расположенных в окрестности Солнца $r < 0.5$ и $|z| < 0.2$ кпк, удовлетворяющих критерию

$|V_z| < 50$ км с⁻¹ и лежащих на плоскости (V_R , V_T) внутри эллипса с центром $V_R = 0$ км с⁻¹ и $V_T = 225$ км с⁻¹ и полуосями $\Delta V_R = 15$ км с⁻¹ и $\Delta V_T = 12$ км с⁻¹. Так как скорость кривой вращения на расстоянии Солнца составляет $V_c = 225$ км с⁻¹, то центральная область содержит большую долю звезд со скоростями, близкими к скорости кривой вращения, а следовательно, и доля молодых звезд здесь должна быть больше. Коэффициент нормировки в этом случае составляет $k = 0.41$. Верхняя часть ГП окрашена в зеленый цвет, то есть центральная область действительно содержит относительно больше голубых звезд, чем область Геркулеса, а ветвь красных гигантов представлена в основном звездами области Геркулеса. Следовательно, доля молодых звезд в центральной области действительно больше, чем в области Геркулеса.

Однако различия в распределении звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, возможно, все же вызваны эффектами селекции. Функция селекции звезд Gaia DR3 в различные выборки, например в выборку звезд с известной лучевой скоростью, имеет низкое значение в плоскости Галактики и особенно в направлении на центр Галактики, что указывает

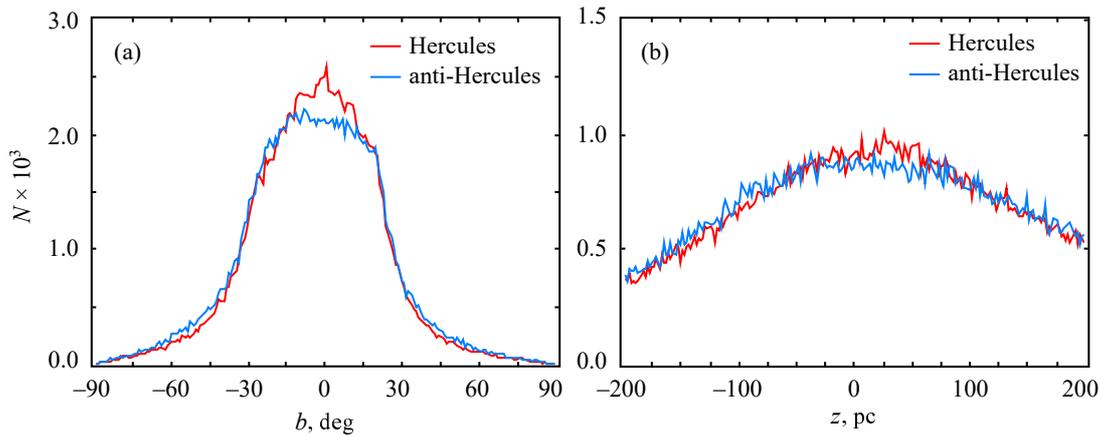


Рис. 11. Нормированные распределения числа звезд N в областях Геркулеса (красная линия) и анти-Геркулеса (синяя линия) вдоль Галактической широты b (a) и Галактической координаты z (b). Ширина бинов: $\Delta b = 1^\circ$ (a) и $\Delta z = 2$ пк (b). На панели (a) хорошо видно, что область Геркулеса содержит значительный избыток звезд вблизи плоскости Галактики по сравнению с областью анти-Геркулеса, который составляет в среднем 11% в диапазоне $|b| < 10^\circ$ и достигает максимального значения 22% при $b = 0^\circ$. Распределения звезд в обеих областях асимметричны относительно линии $b = 0^\circ$, и N падает гораздо быстрее в направлении положительных значений широты b . На панели (b) также виден избыток звезд в области Геркулеса вблизи плоскости Галактики по сравнению с областью анти-Геркулеса, который составляет в среднем 10% на интервале $z = 14\text{--}54$ пк. Максимальное значение числа звезд в области Геркулеса соответствует $z = 24$ пк. Распределение звезд в области анти-Геркулеса имеет широкий максимум, соответствующий интервалу $z \in [-46, 66]$ пк.

на недостаток звезд ($G < 21^m$) с измеренной лучевой скоростью в этих направлениях (Castro-Ginard et al., 2023). Так как звезды Gaia DR3 в областях Геркулеса и анти-Геркулеса по-разному распределены на небе, то и влияние эффектов селекции на эти выборки может быть различным.

Рисунок 11a показывает распределения числа звезд N в областях Геркулеса и анти-Геркулеса вдоль Галактической широты b . Оба распределения были нормированы на число звезд в области Геркулеса $N_H = 148\,404$, то есть число звезд в каждом секторе в области анти-Геркулеса было умножено на коэффициент $k = 1.37$. Ширина секторов $\Delta b = 1^\circ$. Хорошо видно, что вблизи плоскости Галактики область Геркулеса по сравнению с областью анти-Геркулеса содержит значительный избыток звезд, который в среднем равен 11% в диапазоне $|b| < 10^\circ$ и достигает максимального значения 22% при $b = 0^\circ$. Вероятно, более слабая концентрация звезд к плоскости Галактики в области анти-Геркулеса позволила спектрометру Gaia измерить лучевые скорости для большей части слабых звезд в этой области по сравнению с областью Геркулеса. Тем самым число звезд в области анти-Геркулеса, $N_{ан}$, было увеличено за счет слабых звезд, что уменьшило относительное содержание ярких звезд в этой выборке. Заметим также, что распределения звезд в обеих областях асимметричны относительно линии $b = 0^\circ$ и N падает гораздо быстрее в направлении положительных значений b , чем в противоположном направлении.

Рисунок 11b показывает распределения числа звезд N в областях Геркулеса и анти-Геркулеса вдоль Галактической координаты z , нормированные на число звезд в области Геркулеса. Ширина бинов: $\Delta z = 2$ пк. При вычислении z значение координаты Солнца z_\odot принималось равным 27 пк (Bland-Hawthorn and Gerhard, 2016). Здесь мы также видим избыток звезд в области Геркулеса вблизи плоскости Галактики по сравнению с областью анти-Геркулеса, который составляет в среднем 10% на интервале $z = 14\text{--}54$ пк. Максимальное значение числа звезд в области Геркулеса соответствует $z = 24$ пк. Распределение звезд в области анти-Геркулеса имеет широкий максимум, соответствующий интервалу $z \in [-46, 66]$ пк.

Рисунок 12 демонстрирует распределения числа звезд N (a), величины G (b), цвета $G - G_{RP}$ (c) и абсолютной величины M_G (d) звезд Gaia DR3, расположенных в областях Геркулеса и анти-Геркулеса, вдоль Галактической долготы l . Для каждого сектора по долготе шириной $\Delta l = 5^\circ$ мы вычисляли число звезд N внутри этого сектора, а также медианные значения величин G , $G - G_{RP}$ и M_G .

Рисунок 12a показывает распределения числа звезд N вдоль долготы l , нормированные на число звезд в области Геркулеса. Нетрудно заметить, что область Геркулеса содержит относительно больше звезд в направлении на центр Галактики ($l < 60^\circ \cup l > 300^\circ$), чем область анти-Геркулеса, а в остальных направлениях ($60^\circ < l < 300^\circ$) преобладают звезды в области анти-Геркулеса. Из-

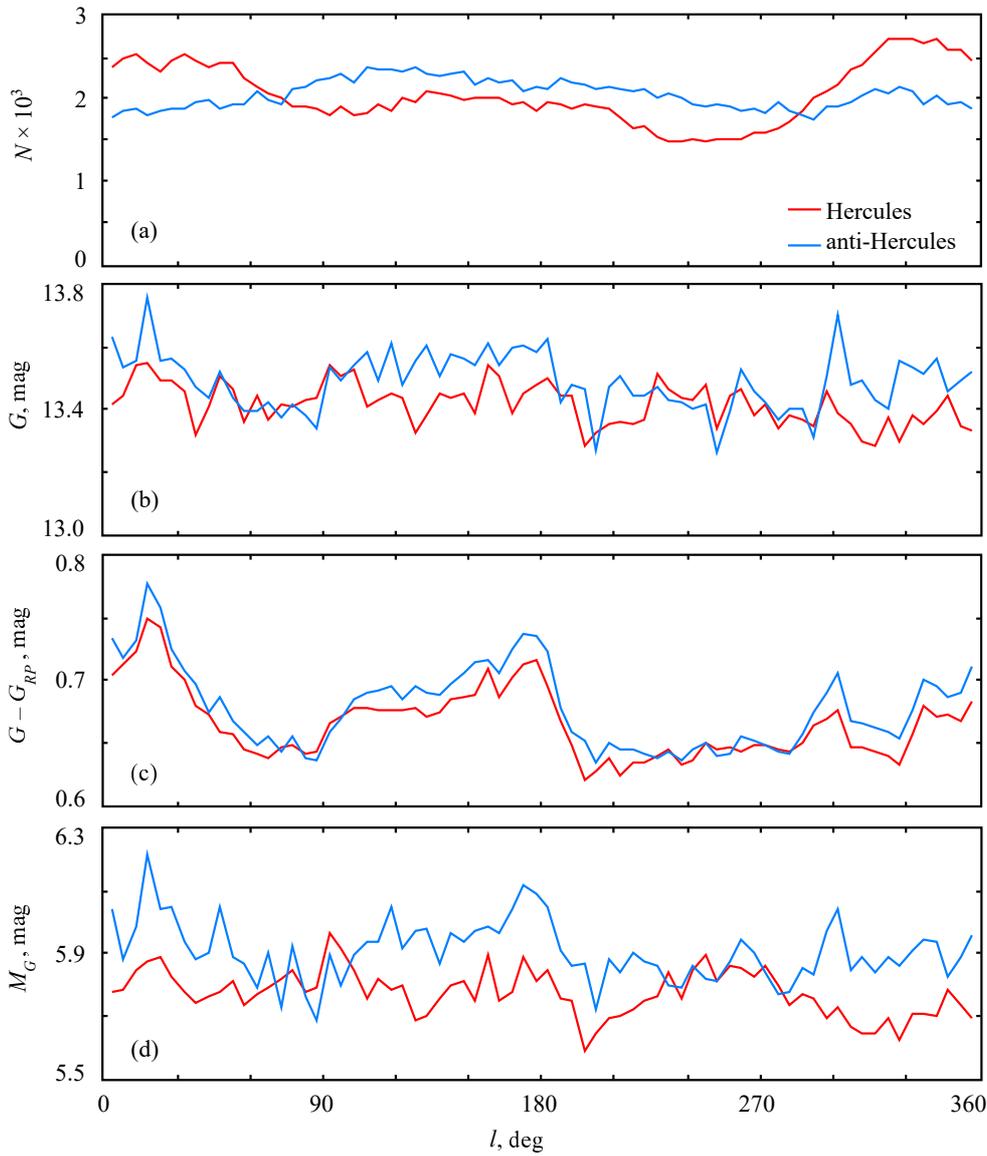


Рис. 12. Распределения числа звезд N (a), величины G (b), цвета $G - G_{RP}$ (c) и абсолютной величины M_G (d) звезд в области Геркулеса (красная линия) и анти-Геркулеса (синяя линия) вдоль Галактической долготы l , вычисленные по данным Gaia DR3. Значения N и медианные значения G , $G - G_{RP}$ и M_G вычислялись в секторах шириной $\Delta l = 5^\circ$. На панели (a) видно, что область Геркулеса содержит относительно больше звезд в направлении на центр Галактики ($l < 60^\circ \cup l > 300^\circ$), чем область анти-Геркулеса. На панели (b) в направлении на центр Галактики ($l < 45^\circ \cup l > 300^\circ$) и во втором квадранте ($90^\circ < l < 180^\circ$) звезды в области Геркулеса в среднем ярче, чем звезды в области анти-Геркулеса, а в остальных направлениях яркость звезд в обеих областях примерно одинакова. На панели (c) звезды в области Геркулеса в среднем имеют более голубой цвет, чем в области анти-Геркулеса. На панели (d) практически везде область Геркулеса содержит более яркие звезды, чем область анти-Геркулеса.

быток звезд в области Геркулеса в направлении на центр Галактики может быть связан с орбитами, показанными на рис. 7а, которые пересекают окрестность Солнца $r < 0.5$ кпк с края, ближайшего к центру Галактики. Мы провели эксперименты с исключением из наших выборок звезд, лежащих в различных секторах по долготе l , в том числе и в центральном секторе, $l < 60^\circ \cup l > 300^\circ$, но это не привело к исчезновению избытка звезд области Геркулеса в верхней части ГП (рис. 10а).

Рисунок 12b показывает распределения медианных значений G звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса, вычисленных в секторах по долготе l . Хорошо видно, что в направлении на центр Галактики ($l < 45^\circ \cup l > 300^\circ$) и во втором квадранте ($90^\circ < l < 180^\circ$) звезды в области Геркулеса в среднем ярче, чем в области анти-Геркулеса, а в остальных направлениях яркость звезд в обеих выборках примерно одинакова.

Рисунок 12с показывает распределения цвета звезд $G - G_{RP}$ в областях Геркулеса и анти-Геркулеса. Интересно, что звезды в обеих областях имеют более красный цвет в направлении на центр Галактики ($l < 45^\circ \cup l > 315^\circ$) и во втором квадранте ($90^\circ < l < 180^\circ$), а в третьем квадранте ($180^\circ < l < 270^\circ$) происходит резкое поголубение звезд обеих выборок. Заметим, что звезды в области Геркулеса в среднем имеют более голубой цвет, чем в области анти-Геркулеса.

Рисунок 12d показывает распределения абсолютной величины M_G . Практически везде область Геркулеса содержит более яркие звезды, чем область анти-Геркулеса. Исключение составляют два сектора: $70^\circ < l < 110^\circ$ и $230^\circ < l < 290^\circ$, где медианные значения M_G примерно одинаковы в обеих областях. Заметим также, что звезды в области Геркулеса расположены в среднем дальше от Солнца, чем в области анти-Геркулеса, медианные оценки гелиоцентрических расстояний r в этих областях составляют соответственно $r = 338.7 \pm 0.3$ пк и 321.5 ± 0.4 пк.

Различия в яркости, цвете и светимости звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса, возможно, вызваны различной концентрацией этих звезд на небе к плоскости Галактики, что приводит к недооценке числа слабых звезд в области Геркулеса по сравнению с областью анти-Геркулеса. В целом недостаток звезд с измеренной лучевой скоростью в области Геркулеса по сравнению с областью анти-Геркулеса должен приводить к занижению значения f_g , выведенного по данным Gaia DR3 (см. уравнение (1)).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали формирование потока Геркулеса, используя модель Галактики с аналитическим баром. Модельный диск формирует внешнее резонансное кольцо $R_1 R_2$, расположенное вблизи OLR бара. Эта модель хорошо воспроизводит распределения радиальных, V_R , и азимутальных, V_T , скоростей звезд вдоль галактоцентрического расстояния R , полученных по данным Gaia EDR3 и Gaia DR3. Положения Солнца и радиуса OLR бара соответствуют расстояниям $R_0 = 7.5$ кпк и $R_{OLR} = 7.0$ кпк (Melnik et al., 2021; 2023).

Мы исследовали изменение числа звезд модели в областях Геркулеса и анти-Геркулеса со временем (рис. 2). Область анти-Геркулеса нужна для калибровки числа звезд. Строгое определение областей Геркулеса и анти-Геркулеса включает два критерия. Во-первых, в рассматриваемый период времени звезды должны оказаться в окрестности Солнца $r < 0.5$ кпк. Во-вторых, эти звезды должны иметь скорости V_R и V_T , которые на плоскости (V_R, V_T) расположены внутри эллипсов с

центрами $V_R = 25$ км с⁻¹ и $V_T = 200$ км с⁻¹ (Геркулес) или $V_R = -25$ км с⁻¹ и $V_T = 200$ км с⁻¹ (анти-Геркулес) и полуосями $\Delta V_R = 15$ км с⁻¹ и $\Delta V_T = 12$ км с⁻¹. Скорости V_R и V_T вычисляются относительно центра Галактики.

Число звезд в области Геркулеса, N_H , достигает первого максимума в период времени 2.0–2.6 млрд лет с начала моделирования, а затем уменьшается. Второй максимум N_H соответствует периоду 4.3–5.2 млрд лет и скорее похож на плато. Интересно, что число звезд N_H достигает максимумов именно в те периоды времени, когда исчезают горбы на профилях распределения скоростей V_R по R (2.5 ± 0.3 млрд лет и 4.5 ± 0.5 млрд лет) и модель наилучшим образом согласуется с наблюдениями (Melnik and Podzolkova, 2024).

Число звезд в области анти-Геркулеса, N_{aH} , демонстрирует хорошо выраженные колебания с периодом $P = 1.8 \pm 0.1$ млрд лет. Вероятно, эти колебания связаны с качаниями орбит вблизи OLR с периодом, близким к $P \approx 2.0$ млрд лет (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024).

Мы вычислили относительную разность числа звезд, f , в областях Геркулеса и анти-Геркулеса (уравнение (1)), которая не зависит от числа звезд в модельных и наблюдательных выборках. Значение f , вычисленное для звезд модельного диска, колеблется в диапазоне $[-0.009, 0.656]$ и имеет среднее значение $\bar{f} = 0.291 \pm 0.011$, которое расположено довольно близко к значению $f_g = 0.315 \pm 0.004$, полученному для звезд каталога Gaia DR3 (рис. 3). Таким образом, существует много моментов времени, когда модельные значения f совпадают с наблюдательным значением, f_g . С другой стороны, засоренность наблюдательной выборки звездами толстого диска и гало может привести к занижению значения f_g .

Мы исследовали ориентацию орбит звезд модельного диска в областях Геркулеса и анти-Геркулеса в период времени $t = 2.5$ – 2.6 млрд лет с начала моделирования. Звезды модели были разделены на три группы в зависимости от ориентации их орбит:

- 1) эллиптические орбиты, то есть орбиты с порядком симметрии $n_s = 2$, вытянутые перпендикулярно бару ($75^\circ \leq \theta_{00} < 105^\circ$);
- 2) эллиптические орбиты ($n_s = 2$), вытянутые параллельно бару ($0^\circ \leq \theta_{00} < 15^\circ$ или $165^\circ \leq \theta_{00} < 180^\circ$);
- 3) прочие орбиты.

Угол θ_{00} определяет среднюю ориентацию орбит в период времени $t = 0$ – 3 млрд лет относительно большой оси бара. Оказалось, что в области Геркулеса 84% орбит имеют эллиптическую форму и

вытянуты перпендикулярно бару, а в области анти-Геркулеса 68% орбит имеют $n_s = 2$ и вытянуты параллельно бару (рис. 4, 5). Это сильно отличается от распределения всех звезд, оказавшихся в рассматриваемый период времени в окрестности $r < 0.5$ кпк от Солнца: 21% имеют эллиптические орбиты, вытянутые перпендикулярно бару, и 19% — эллиптические орбиты, вытянутые параллельно бару.

Мы исследовали распределение звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса вдоль начальных значений расстояния, $R(0)$, а также изменение начальных радиальных, $V_R(0)$, и азимутальных, $V_T(0)$, скоростей с изменением $R(0)$ (рис. 6). Медианные значения $R(0)$ в областях Геркулеса и анти-Геркулеса равны соответственно 6.8 кпк и 7.3 кпк, то есть большинство звезд прилетают в область Геркулеса с расстояний меньших, чем радиус OLR ($R_{\text{OLR}} = 7.0$ кпк), а в область анти-Геркулеса — с расстояний больших, чем R_{OLR} . Медианные значения $V_T(0)$, вычисленные в бинах по $R(0)$, уменьшаются с ростом $R(0)$, хотя в области Геркулеса наблюдается небольшое плато (7.0–8.0 кпк). Что касается начальной радиальной скорости, то бины с максимальным количеством частиц N соответствуют значению скорости $V_R(0) \approx 0$ км с⁻¹; это хорошо согласуется с фактом равенства нулю наиболее вероятного значения начальной радиальной скорости в модельном диске.

В наших предыдущих работах мы показали, что период P медленных изменений углового момента L и полной энергии E звезды совпадает с периодом изменения направления вытянутости, среднего размера и эксцентриситета орбиты (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024).

В области Геркулеса присутствует два типа орбит (рис. 7а, 7б). Орбиты первого типа (рис. 7а) меняют ориентацию, размер и эксцентриситет с периодом $P \approx 0.7$ млрд лет, но при этом все время лежат внутри фигуры, ограниченной двумя эллипсами, вытянутыми перпендикулярно бару. Направление вытянутости этих орбит смещается только в направлении вращения Галактики (рис. 8б). Орбиты второго типа (рис. 7б) большую часть времени вытянуты под углом $\theta_0 \approx -60^\circ$ или $\theta_0 \approx 60^\circ$ к большой оси бара и небольшую часть времени — параллельно бару. Эти орбиты качаются относительно большой оси бара в диапазоне углов $[-60, 60^\circ]$ с периодом $P \approx 2.6$ млрд лет (рис. 8с). Возможно, именно эти орбиты вызывают увеличение числа звезд в области Геркулеса, N_H , в период времени 2–3 млрд лет (рис. 3а).

Орбиты в области анти-Геркулеса качаются относительно большой оси бара в диапазоне углов $[-45^\circ; 45^\circ]$ с периодом $P \approx 1.9$ млрд лет

(рис. 7с, 7д). Заметим, что качания орбит, показанных на рис. 7с, вызывают периодические изменения морфологии внешних колец и появление горбов на профилях распределения радиальных скоростей, V_R , вдоль расстояния R (Melnik et al., 2023; Melnik and Podzolkova, 2024).

В среднем орбиты в области Геркулеса вытянуты перпендикулярно бару и поддерживают внешнее кольцо R_1 , а орбиты в области анти-Геркулеса вытянуты параллельно бару и поддерживают внешнее кольцо R_2 .

Мы исследовали распределение числа орбит по периоду P медленных колебаний углового момента в областях Геркулеса и анти-Геркулеса (рис. 9). Оказалось, что в области Геркулеса распределение имеет два максимума, соответствующих значениям $P = 0.7$ млрд лет и 2.6 млрд лет. Вероятно, такое двугорбое распределение связано с присутствием в области Геркулеса двух типов орбит (рис. 7а, 7б). В области анти-Геркулеса распределение имеет хорошо выраженный максимум, соответствующий периоду $P = 1.9$ млрд лет, который совпадает с наиболее вероятным значением периода P качающихся орбит вблизи OLR (Melnik and Podzolkova, 2024).

Анализ данных Gaia DR3 показал, что область Геркулеса содержит избыток звезд в верхней части главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга–Рассела по сравнению с областью анти-Геркулеса (рис. 10а, таблица 1). Этот результат может быть вызван недостатком слабых звезд в области Геркулеса, что приводит к увеличению доли ярких звезд в этой выборке. Различие в относительном содержании ярких звезд в областях Геркулеса и анти-Геркулеса может быть связано с тем, что звезды в области Геркулеса сильнее концентрируются на небе к плоскости Галактики, что создает трудности для спектрометра Gaia в измерении их лучевых скоростей (рис. 11). В целом эффекты селекции (раздел 4.7) также должны уменьшать значение f_g , вычисленное по данным Gaia DR3.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим А. К. Дамбиса за плодотворное обсуждение и полезные советы, а также анонимного рецензента 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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова. Е. Н. Подзолкова — обладатель стипендии Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-2-2-44-1).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Andrae, M. Fouesneau, O. Creevey, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A8 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201732516
2. T. Antoja, A. Helmi, W. Dehnen, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, id. A60 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201322623
3. E. Athanassoula, O. Bienayme, L. Martinet, and D. Pfenniger, *Astron. and Astrophys.* **127** (2), 349 (1983).
4. C. Babusiaux et al. (Gaia Collab.) *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A10 (2018a). DOI:10.1051/0004-6361/201832843
5. T. Bensby, M. S. Oey, S. Feltzing, and B. Gustafsson, *Astrophys. J.* **655** (2), L89 (2007). DOI:10.1086/512014
6. E. Bica, C. Bonatto, B. Barbuy, and S. Ortolani, *Astron. and Astrophys.* **450** (1), 105 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20054351
7. J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics*, 2nd ed. (Princeton University Press, Princeton, 2008).
8. J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016). DOI:10.1146/annurev-astro-081915-023441
9. D. L. Block, I. Puerari, J. H. Knapen, et al., *Astron. and Astrophys.* **375**, 761 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010775
10. A. Boehle, A. M. Ghez, R. Schödel, et al., *Astrophys. J.* **830** (1), article id. 17 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/830/1/17
11. D. Boubert and A. Everall, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (4), 4246 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2305
12. R. L. Branham, *Astrophys. and Space Sci.* **362** (2), article id. 29 (2017). DOI:10.1007/s10509-017-3015-1
13. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
14. R. Buta, *Astrophys. J. Suppl.* **96**, 39 (1995). DOI:10.1086/192113
15. R. Buta and F. Combes, *Fundamentals of Cosmic Physics* **17**, 95 (1996).
16. R. Buta and D. A. Crocker, *Astron. J.* **102**, 1715 (1991). DOI:10.1086/115991
17. R. Buta, E. Laurikainen, and H. Salo, *Astron. J.* **127** (1), 279 (2004). DOI:10.1086/379962
18. G. Byrd, P. Rautiainen, H. Salo, et al., *Astron. J.* **108**, 476 (1994). DOI:10.1086/117085
19. A. Castro-Ginard, A. G. A. Brown, Z. Kostrzewa-Rutkowska, et al., *Astron. and Astrophys.* **677**, id. A37 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346547
20. D. Chakrabarty and I. V. Sideris, *Astron. and Astrophys.* **488** (1), 161 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:20079316
21. C. Chiappini, F. Matteucci, and D. Romano, *Astrophys. J.* **554** (2), 1044 (2001). DOI:10.1086/321427
22. R. Chiba, J. K. S. Friske, and R. Schönrich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **500** (4), 4710 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa3585
23. G. Contopoulos and P. Grosbøl, *Astron. Astrophys. Rev.* **1** (3–4), 261 (1989). DOI:10.1007/BF00873080
24. G. Contopoulos and T. Papayannopoulos, *Astron. and Astrophys.* **92** (1–2), 33 (1980).
25. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (4), 3206 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt1514
26. W. Dehnen, *Astron. J.* **115** (6), 2384 (1998). DOI:10.1086/300364
27. W. Dehnen, *Astron. J.* **119** (2), 800 (2000). DOI:10.1086/301226
28. G. de Vaucouleurs and K. C. Freeman, *Vistas in Astronomy* **14**, 163 (1972). DOI:10.1016/0083-6656(72)90026-8
29. S. Diaz-Garcia, H. Salo, E. Laurikainen, and M. Herrera-Endoqui, *Astron. and Astrophys.* **587**, id. A160 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201526161
30. R. Drimmel, S. Khanna, E. D’Onghia, et al., *Astron. and Astrophys.* **670**, A10 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202244605
31. O. J. Eggen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **118**, 154 (1958). DOI:10.1093/mnras/118.2.154
32. F. Eisenhauer, R. Genzel, T. Alexander, et al., *Astrophys. J.* **628** (1), 246 (2005). DOI:10.1086/430667
33. A. Everall and D. Boubert, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **509** (4), 6205 (2022). DOI:10.1093/mnras/stab3262
34. M. W. Feast, C. D. Laney, T. D. Kinman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **386** (4), 2115 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13181.x
35. F. Fragkoudi, D. Katz, W. Trick, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (3), 3324 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1875
36. C. Francis and E. Anderson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441** (2), 1105 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu631
37. R. Fux, *Astron. and Astrophys.* **373**, 511 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010561

38. E. V. Glushkova, A. K. Dambis, A. M. Mel'nik, and A. S. Rastorguev, *Astron. and Astrophys.* **329**, 514 (1998).
39. M. A. T. Groenewegen, A. Udalski, and G. Bono, *Astron. and Astrophys.* **481** (2), 441 (2008). DOI:10.1051/0004-6361/20079101
40. K. Hattori, N. Gouda, H. Tagawa, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (4), 4540 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz266
41. J. A. S. Hunt, J. Bovy, A. Pérez-Villegas, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474** (1), 95 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2777
42. P. Iwanek, R. Poleski, S. Kozłowski, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **264** (1), id. 20 (2023). DOI:10.3847/1538-4365/acad7a
43. D. Katz et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, A11 (2018b). DOI:10.1051/0004-6361/201832865
44. X. Liang, S.-J. Yoon, J. Zhao, et al., *Astrophys. J.* **956** (2), id. 146 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acf295
45. S. Lucchini, E. Pellett, E. D'Onghia, and J. A. L. Aguerri, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **519** (1), 432 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac3519
46. A. M. Melnik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (2), 2106 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz425
47. A. M. Melnik and A. K. Dambis, *Astrophys. and Space Sci.* **365** (7), article id. 112 (2020). DOI:10.1007/s10509-020-03827-0
48. A. M. Melnik, A. K. Dambis, E. N. Podzolkova, and L. N. Berdnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (3), 4409 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2067
49. A. M. Melnik and E. N. Podzolkova, *Astronomy Letters* **50**, 481 (2024). DOI:10.1134/S1063773724700385
50. A. M. Melnik, E. N. Podzolkova, and A. K. Dambis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **525** (3), 3287 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad2520
51. A. M. Mel'nik and P. Rautiainen, *Astronomy Letters* **35** (9), 609 (2009). DOI:10.1134/S1063773709090047
52. T. A. Michtchenko, J. R. D. Lépine, A. Pérez-Villegas, et al., *Astrophys. J.* **863** (2), article id. L37 (2018). DOI:10.3847/2041-8213/aad804
53. I. Minchev, J. Nordhaus, and A. C. Quillen, *Astrophys. J.* **664** (1), L31 (2007). DOI:10.1086/520578
54. G. Monari, B. Famaey, A. Siebert, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (2), 1443 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw2807
55. I. Nikiforov, *ASP Conf. Ser.* **316**, 199 (2004).
56. S. Nishiyama, T. Nagata, S. Sato, et al., *Astrophys. J.* **647** (2), 1093 (2006). DOI:10.1086/505529
57. A. Pérez-Villegas, M. Portail, C. Wegg, and O. Gerhard, *Astrophys. J.* **840** (1), article id. L2 (2017). DOI:10.3847/2041-8213/aa6c26
58. D. Pfenniger, *Astron. and Astrophys.* **134** (2), 373 (1984).
59. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
60. A. C. Quillen, G. De Silva, S. Sharma, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478** (1), 228 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty865
61. P. Ramos, T. Antoja, and F. Figueras, *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A72 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833494
62. P. Rautiainen and A. M. Mel'nik, *Astron. and Astrophys.* **519**, id. A70 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014646
63. P. Rautiainen and H. Salo, *Astron. and Astrophys.* **348**, 737 (1999).
64. P. Rautiainen and H. Salo, *Astron. and Astrophys.* **362**, 465 (2000).
65. M. J. Reid, K. M. Menten, X. W. Zheng, A. Brunthaler, and Y. Xu, *Astrophys. J.* **705**, 1548 (2009).
66. J. Rybizki, H.-W. Rix, M. Demleitner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **500** (1), 397 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa3089
67. M. P. Schwarz, *Astrophys. J.* **247**, 77 (1981). DOI:10.1086/159011
68. W. H. Trick, F. Fragkoudi, J. A. S. Hunt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **500** (2), 2645 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa3317
69. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
70. M. D. Weinberg, *Astrophys. J.* **420**, 597 (1994). DOI:10.1086/173589

Hercules Stream and the Outer Elliptical Ring $R_1 R_2$ **A. M. Melnik¹ and E. N. Podzolkova^{1,2}**¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

We study the formation of the Hercules stream in the model Galactic disk which includes the outer resonance ring $R_1 R_2$ located near the Outer Lindblad Resonance (OLR) of the bar. The Hercules region and the anti-Hercules region introduced for calibration were restricted in space by the solar neighbourhood $r < 0.5$ kpc, and on the (V_R, V_T) plane by ellipses centered at $V_R = 25 \text{ km s}^{-1}$ and $V_T = 200 \text{ km s}^{-1}$ (Hercules), and at $V_R = -25 \text{ km s}^{-1}$ and $V_T = 200 \text{ km s}^{-1}$ (anti-Hercules). The number of stars in the Hercules region reaches a maximum in the time period of 2–3 Gyr from the start of simulation and the number of stars in the anti-Hercules region oscillates with a period of 1.8 ± 0.1 Gyr. The majority of stars in the model disk located in the Hercules and anti-Hercules regions have orbits elongated perpendicular and parallel to the bar, respectively. The median value of the initial distances of stars in the Hercules (anti-Hercules) region is slightly smaller (larger) than the OLR radius, respectively. There are two types of orbits in the Hercules region. Orbits of the first type always lie inside a figure bounded by two ellipses elongated perpendicular to the bar. Orbits of the second type are elongated at the angles of -60° or 60° to the major axis of the bar most of the time. The distribution of stars in the Hercules region along the period of slow oscillations in the angular momentum has two maxima: $P = 0.7$ Gyr and 2.6 Gyr corresponding to orbits of the first and second type. In the anti-Hercules region, most orbits are captured by libration relative to the major axis of the bar with a period of 1.9 Gyr. In general, orbits in the Hercules and anti-Hercules regions support the outer rings R_1 and R_2 elongated perpendicular and parallel to the bar, respectively. Stars from the Gaia DR3 catalog located in the Hercules region appear to be, on average, brighter, bluer, and more luminous than stars in the anti-Hercules region which is probably caused by selection effects due to different distributions of these stellar samples over the Galactic latitude b .

Keywords: *Galaxy: kinematics and dynamics—Galaxy: neighborhood of the Sun—catalogs: Gaia DR3*