

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНОГО УЗОРА ГАЛАКТИКИ ПО ТРЕМ ВЫБОРКАМ ЗВЕЗД

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 09.03.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.; принята к публикации 28.03.2023 г.

Привлечены полученные нами ранее по трем звездным выборкам оценки амплитуд скоростей возмущения f_R и f_θ , вызванные влиянием спиральной волны плотности. Это галактические мазерные источники с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, ОБ2-звезды и цефеиды. По этим данным получены новые оценки угловой скорости вращения спирального узора в Галактике Ω_p : 24.61 ± 2.06 , 24.71 ± 1.29 и 25.98 ± 1.37 км/с/кпк, по выборке мазеров, ОБ2-звезд и цефеид соответственно. Значения радиуса коротации для этих трех выборок составили R_{cor}/R_0 : 1.16 ± 0.09 , 1.15 ± 0.06 и 1.09 ± 0.06 , что говорит о том, что коротационный круг расположен между Солнцем и отрезком рукава Персея.

Ключевые слова: спиральный узор, радиус коротации, структура Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010823030026, **EDN:** CRCTGK

ВВЕДЕНИЕ

Изучение спиральной структуры Галактики представляет большой интерес. Хорошо известны индикаторы спиральной структуры, например, водородные облака, ОБ-звезды или цефеиды. Предложены различные методы определения значений таких параметров, как угол закрутки спирального узора i , количество спиральных рукавов m , угловая скорость вращения спирального узора Ω_p , положение радиуса коротации R_{cor} . Однако нет полного согласия между результатами различных авторов.

Начиная с пионерских работ Линя, Шу (1964), Линя и др. (1969), Юаня (1969), посвященных применению линейной теории спиральной волны плотности к анализу реальных данных, этой проблеме посвящено огромное количество научных публикаций. Можно отметить, например, работы Марочника и др. (1972), Крезе, Меннесье (1973), Била, Овендена (1978), Мишурова и др. (1979), Локтина, Маткина (1992), Мишурова и др. (1997), Амарала, Лепине (1997), Расторгуева и др. (2001), Фернандеса и др. (2001), Диаса, Лепине (2005), Юнкейры и др. (2015), Дамбиса и др. (2015), Диаса и др. (2019), Кастро-Гинарда и др. (2021), Йоши, Малхотры (2022).

Раньше часто использовали двухрукавную модель спирального узора с $m = 2$ и $i \sim -6^\circ$. В последнее время больше склоняются к четырехрукавной модели с $m = 4$ и $i \sim -12^\circ$. Большая доказательная база в пользу именно четырехрукавного глобального узора собрана в обзорах Валле (1995, 2002, 2008, 2017a). Правда, речь идет о глобальном спиральном узоре с постоянным углом закрутки, одинаковым для всех рукавов. В последнее же время приобретает популярность четырехрукавная модель с секторной структурой рукавов (Рид и др., 2014, 2019), которая подкреплена анализом мазерных источников с высокоточными измерениями их тригонометрических параллаксов, полученных в результате РСДБ-наблюдений.

Большой интерес представляют точные значения угловой скорости вращения спирального узора и радиуса коротации. Однако современные оценки этих параметров лежат в широком интервале. Например, в обзоре Герхарда (2011) сделан вывод о том, что значение угловой скорости вращения спиральной структуры немного меньше скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Это означает, что радиус коротации находится немного дальше R_0 . По индикаторам с возрастными 10^7 – 10^8 лет среднее значение Ω_p составляет 25.2 км/с/кпк. Однако работы, посвященные распределению звездных скоростей в окрестностях Солнца, дают более широкий диапазон Ω_p : 17 –

*Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

28 км/с/кпк. Жак Валле регулярно делает обзор параметров спиральной структуры Галактики. В одной из последних таких работ он нашел (Валле, 20176), что в среднем Ω_p близко к значению $23 \pm \pm 2$ км/с/кпк.

Положение радиуса коротации имеет важное, а иногда и критическое значение при моделировании некоторых процессов. Дело в том, что во вращающейся системе координат волна плотности движется от коротации к центру Галактики и от коротации во внешние области Галактики. Как показано в работе Ачаровой и др. (2010), комбинированный эффект коротационного резонанса и турбулентной диффузии является причиной формирования бимодального радиального распределения железа и кислорода в галактическом диске. Другой пример, рассеянные звездные скопления, находящиеся в области коротации, испытывающие при этом небольшие радиальные колебания, рассеиваются при разрушении по огромному дисковому пространству (Мишурув, Ачарова, 2011).

В ряде наших работ (Бобылев, Байкова, 2022а,б,г) были найдены амплитуды скоростей возмущения f_R и f_θ , вызванные влиянием спиральной волны плотности, а также получены оценки угловой скорости вращения Галактики. Эти параметры были найдены по трем выборкам: по галактическим мазерам с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, по ОВ2-звездам и цефеидам. Для определения скоростей f_R и f_θ применялся спектральный анализ остаточных скоростей звезд. Целью настоящей работы являются оценка угловой скорости вращения спирального узора Ω_p в Галактике и положение радиуса коротации $R_{\text{кор}}$ на основе этих данных.

МЕТОД

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно записать так:

$$R = R_0 e^{(\theta - \theta_0) \text{tg } i}, \quad (1)$$

где R — расстояние от центра Галактики до звезды; R_0 — расстояние от центра Галактики до Солнца; θ — позиционный угол звезды: $\text{tg } \theta = y_1/(R_0 - x_1)$, где x_1, y_1 — гелиоцентрические галактические прямоугольные координаты звезды, причем ось x_1 направлена от Солнца к галактическому центру, а направление оси y_1 совпадает с направлением галактического вращения; θ_0 — некоторый произвольно выбранный начальный угол; i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали). После логарифмирования левой

и правой частей, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \theta \text{tg } i + \text{const}. \quad (2)$$

Согласно теории спиральной волны плотности Линя, Шу (1964), уравнение (2) выглядит так (Юань, 1969):

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \text{tg } i \left(\theta + \frac{\chi - \chi_0}{m} - \Omega_p t \right), \quad (3)$$

где χ — радиальная фаза волны, χ_0 — положение Солнца в волне, Ω_p — угловая скорость вращения спирального узора, t — время, а m — количество спиральных рукавов.

В основе подхода, который мы применяем в настоящей работе, лежит вытекающее из линейной теории волн плотности Линя, Шу (1964) соотношение (Рольфс, 1980):

$$\begin{aligned} \chi &= m[\Omega_p - \Omega(R)]t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \text{ctg } i = \\ &= \kappa \nu t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \text{ctg } i, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Omega = \Omega(R)$ — угловая скорость вращения Галактики, $\kappa^2 = 4\Omega^2 \left(1 + \frac{R}{2\Omega} \frac{d\Omega}{dR}\right)$ — эпициклическая частота ($\kappa > 0$), $\nu = m(\Omega_p - \Omega)/\kappa$ — частота, с которой пробная частица встречает проходящее спиральное возмущение.

Влияние спиральной волны плотности на пространственные прямоугольные гелиоцентрические скорости звезды U и V носит периодический характер, поэтому представляется в следующем виде (Крезе, Меннесье, 1973; Мишурув и др., 1979):

$$\begin{aligned} U &= f_R \cos \chi, \\ V &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (5)$$

где амплитуды скоростей возмущения f_R и f_θ можно найти из наблюдений, например, путем решения кинематических уравнений, либо путем спектрального анализа остаточных (освобожденных от пекулярного движения Солнца и вращения Галактики) скоростей звезд. Отметим, что обе скорости возмущения f_R и f_θ , которые найдены нами на основе спектрального анализа, являются положительными.

Таблица 1. Оценки параметров спирального узора Ω_p и R_{cor}

Параметры	Мазеры	ОВ2-звезды	Цефеиды
N_*	150	1812	363
Ω_0 , км/с/кпк	30.18 ± 0.38	29.71 ± 0.06	28.87 ± 0.23
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.368 ± 0.077	-4.014 ± 0.018	-3.894 ± 0.063
f_R , км/с	8.1 ± 1.4	4.8 ± 0.7	5.5 ± 2.0
f_θ , км/с	6.1 ± 1.7	4.1 ± 0.9	7.1 ± 2.0
σ_R , км/с	12	13.4	15
Источник	(1)	(2)	(3)
Ω_p , км/с/кпк	24.61 ± 2.06	24.71 ± 1.29	25.98 ± 1.37
R_{cor} , кпк	9.37 ± 0.78	9.34 ± 0.49	8.84 ± 0.47
R_{cor}/R_0	1.16 ± 0.09	1.15 ± 0.06	1.09 ± 0.06
$\mathfrak{I}_\nu^{(2)}/\mathfrak{I}_\nu^{(1)}$	0.672	0.635	0.569

Примечание. N_* — количество использованных звезд; (1) — Бобылев, Байкова (2022б); (2) — Бобылев, Байкова (2022а,в); (3) — Бобылев, Байкова (2022г).

С другой стороны, f_R и f_θ имеют следующий вид:

$$f_R = \frac{kA}{\varkappa} \frac{\nu}{1 - \nu^2} \mathfrak{I}_\nu^{(1)}(x), \quad (6)$$

$$f_\theta = -\frac{kA}{2\Omega} \frac{1}{1 - \nu^2} \mathfrak{I}_\nu^{(2)}(x), \quad (7)$$

где A — амплитуда потенциала спиральной волны, $k = m \operatorname{ctg} i / R$ — радиальное волновое число, $\mathfrak{I}_\nu^{(1)}(x)$ и $\mathfrak{I}_\nu^{(2)}(x)$ — редукционные факторы

$$\mathfrak{I}_\nu^{(1)}(x) = \frac{1 - \nu^2}{x} \left[1 - \frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \right. \quad (8)$$

$$\left. \times \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))} \cos(\nu s) ds \right],$$

$$\mathfrak{I}_\nu^{(2)}(x) = (\nu^2 - 1) \frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \quad (9)$$

$$\times \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))} \cos(\nu s) ds \right],$$

являющиеся функциями координаты $x = k^2 \sigma_R^2 / \varkappa^2$, где σ_R — среднеквадратическое значение дисперсии радиальных скоростей звезд. Соотношения (6)–(9) позволяют определить Ω_p после подстановки значений параметров (f_R , f_θ , Ω_0 , Ω'_0 , σ_R), полученных из наблюдений.

Амплитуду потенциала спиральной волны оцениваем на основе известного соотношения (Фернандес и др. 2008):

$$A = \frac{(R_0 \Omega_0)^2 f_{r0} \operatorname{tg} i}{m}, \quad (10)$$

где значение отношения радиальной компоненты гравитационной силы, соответствующей спиральным рукавам, к общей гравитационной силе Галактики, f_{r0} , берем равным 0.04 ± 0.01 (Бобылев, Байкова, 2012). В настоящей работе используем четырехрукавную модель спирального узора Галактики $m = 4$ с углом закрутки $i = -12.5^\circ$. Значение R_0 принимаем равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору Бобылева, Байковой (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Зная отношение $\mathfrak{I}_\nu^{(2)}/\mathfrak{I}_\nu^{(1)}$, найденное значение Ω_p можно проконтролировать согласно выражению, полученному из (6) и (7) для $R = R_0$ и $\Omega = \Omega_0$:

$$\Omega_p - \Omega_0 = -\frac{\mathfrak{I}_\nu^{(2)}}{\mathfrak{I}_\nu^{(1)}} \frac{f_R}{f_\theta} \frac{2\Omega_0}{m} \left(1 + \frac{R_0 \Omega'_0}{2\Omega_0} \right). \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 суммированы результаты определения угловой скорости спирального узора Ω_p и радиуса коротации R_{cor} , найденные в настоящей работе по

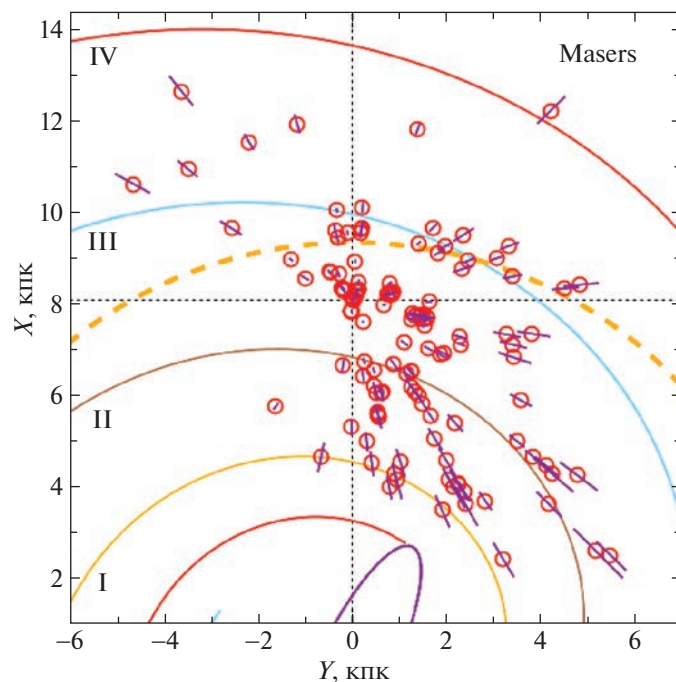


Рис. 1. Распределение 150 мазеров и радиозвезд с ошибками тригонометрических параллаксов менее 10% в проекции на галактической плоскости XY , для каждой звезды даны бары ошибок определения расстояний, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, отмечен центральный галактический бар, жирной пунктирной линией показан найденный круг коротации.

трем выборкам молодых объектов. Это мазеры, OB2-звезды и цефеиды.

Значения радиуса коротации были вычислены на основе соотношения, полученного путем приравнивания линейной скорости вращения Галактики и найденной скорости вращения спирального узора:

$$R_{\text{кор}} = R_0 + (\Omega_p - \Omega_0)/\Omega'_0. \quad (12)$$

Мазеры

В работе Бобылева, Байковой (2022б) проанализирована выборка мазеров и радиозвезд с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами. Причем рассматривались только объекты с ошибками измерения параллаксов менее 10%.

Основными источниками данных послужили каталоги Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020). В список Рида и др. (2019) включены данные о 199 мазерах. РСДБ-наблюдения проводились на нескольких радиочастотах в рамках проекта BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey¹). Хирота и др. (2020) представили каталог из 99 источников мазерного излучения, наблюдавшихся исключительно на частоте 22 ГГц

по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry²).

Распределение использованных мазеров и радиозвезд в проекции на галактической плоскости XY дано на рис. 1. На рисунке использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ дан согласно работе Бобылева, Байковой (2014), здесь он построен со значением $R_0 = 8.1$ кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие четыре спиральные рукава: I — Щита, II — Киля—Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав.

На рис. 1 хорошо представлен Местный рукав (около 70 источников). Тем не менее видна концентрация звезд к отрезкам рукавов Персея, Киля—Стрельца и Щита.

Оценки угловой скорости вращения Галактики и двух ее производных были получены по 150 мазерам из области Галактики $R > 4$ кпк. А оценки скоростей возмущений f_R и f_θ найдены с применением

¹<http://bessel.vlbi-astrometry.org>

²<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

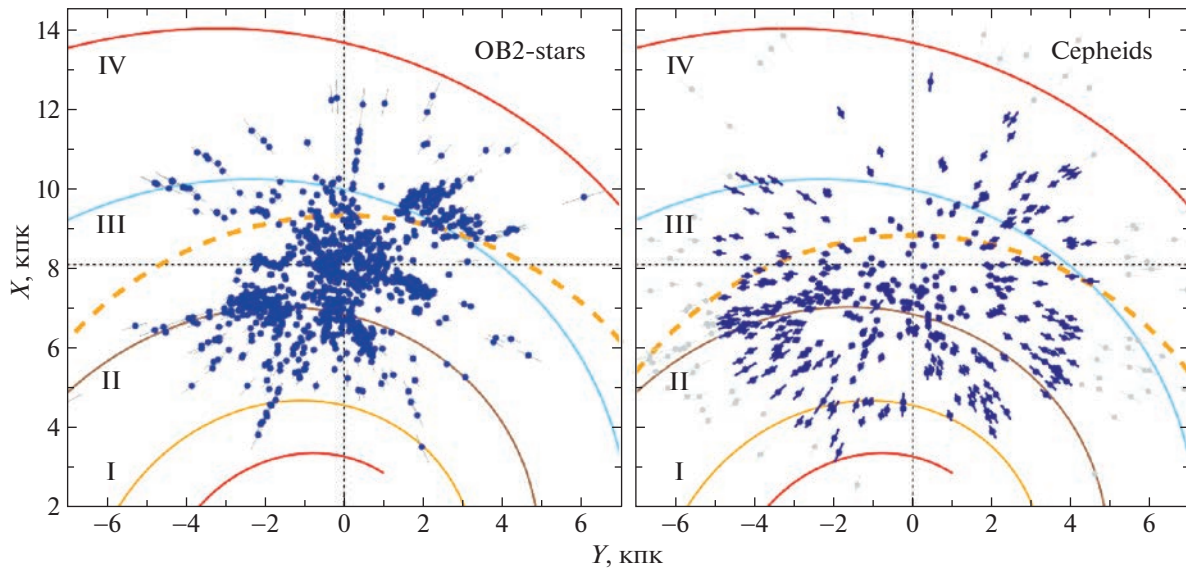


Рис. 2. Распределение OB2-звезд (слева) и цефеид (справа) в проекции на галактической плоскости XY , даны бары ошибок, которые соответствуют заявленным ошибкам определения расстояний в соответствующем каталоге, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, жирными пунктирными линиями показаны соответствующие круги коротации.

спектрального анализа остаточных скоростей мазеров, расположенных в околосолнечной окрестности радиусом 5 кпк. По этой выборке мазеров мы вычислили среднеквадратическое значение дисперсии радиальных скоростей $\sigma_R = 12$ км/с.

OB2-звезды

Оценки угловой скорости вращения Галактики и ее производных были определены в работе Бобылева, Байковой (2022a) из анализа собственных движений 9750 OB2-звезд. Для этого была использована выборка OB2-звезд из работы Сюя и др. (2021) с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2021).

По этой выборке также были найдены главные оси эллипсоида дисперсий остаточных скоростей OB2-звезд $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (11.79, 9.66, 7.21) \pm \pm (0.06, 0.05, 0.04)$ км/с и показано, что первая ось этого эллипсоида отклонена от направления на центр Галактики на небольшой угол, составляющий около 12° . Таким образом, значение σ_1 можно использовать в качестве дисперсии радиальных скоростей σ_R в соотношениях (6)–(9).

В работе Бобылева, Байковой (2022b) была изучена кинематика полных пространственных скоростей OB2-звезд. Это 1812 звезд с измеренными лучевыми скоростями, собственными движениями и тригонометрическими параллаксами.

Распределение этих OB2-звезд и в проекции на галактической плоскости XY дано на рис. 2. По ним были определены амплитуды скоростей возмущения f_R и f_θ с применением спектрального анализа остаточных скоростей. Как можно видеть из рисунка, хорошо представлены Местный рукав, а также рукава Киля–Стрельца и Персея.

Непосредственное вычисление дисперсии радиальных скоростей по этой выборке OB2-звезд дало значение $\sigma_R = 13.4$ км/с. Таким образом, ошибки лучевых скоростей увеличили значение σ_R по сравнению с $\sigma_1 = 11.79$ км/с, что была получена из анализа только собственных движений звезд.

Цефеиды

Оценки угловой скорости вращения Галактики и ее производных по выборке цефеид были определены в работе Бобылева, Байковой (2022 г). Для этого была использована выборка из 363 цефеид моложе 120 млн лет, которые расположены не далее 5 кпк от Солнца. Их средний возраст составил 85 млн лет. Собственные движения этих звезд были взяты нами из каталога Gaia EDR3.

Основой для изучения выборки цефеид нам послужила работа Сковрон и др. (2019), где для 2431 классической цефеиды даны расстояние, возраст, период пульсации и фотометрические данные. Наблюдения этих переменных звезд были выполнены в рамках программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Удальский и др.,

2015). Расстояния до цефеид были вычислены на основе калибровочных соотношений период—светимость, найденных Вангом и др. (2018) по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне для восьми полос. Это четыре полосы каталога космического телескопа WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Чен и др., 2018), W1–W4: [3.35], [4.60], [11.56] и [22.09] мкм и четыре полосы обзора GLIMPSE (Spitzer Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire, Бенджамин и др., 2003): [3.6], [4.5], [5.8] и [8.0] мкм. Для каждой звезды в каталоге Сковрон и др. (2019) вычислено значение поглощения A_{K_s} по картам поглощения. Согласно этим авторам, ошибка определения расстояния до цефеид в их каталоге составляет $\sim 5\%$. Оценки возраста Сковрон и др. (2019) получили по методике Андерсона и др. (2016) с учетом периода осевого вращения звезды и индекса металличности.

Распределение цефеид моложе 120 млн лет в проекции на галактической плоскости XY дано на рис. 2. Темными точками на рисунке отмечены 363 цефеиды, расположенные не далее 5 кпк от Солнца, где выборка удовлетворяет условию полноты. На рисунке хорошо представлен только отрезок рукава Киля—Стрельца. По этим 363 цефеидам определены амплитуды скоростей возмущения f_R и f_θ на основе спектрального анализа остаточных скоростей звезд. Значение $\sigma_R = 15$ км/с для этих звезд можно оценить, исходя из ошибки единицы веса, полученной при решении кинематических уравнений в работе Бобылева, Байковой (2022 г.). Непосредственное вычисление по 363 цефеидам с измеренными лучевыми скоростями дало близкое значение $\sigma_R = 14.9$ км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 даны оценки Ω_p , полученные различными методами. Эти результаты были получены в основном по таким молодым объектам, как ОВ-звезды, РЗС и цефеиды.

Как известно, первые оценки Ω_p , найденные Линем и др. (1969) и Юанем (1969), породили дискуссию (Марочник и др., 1972) о выборе наиболее вероятного значения 13 или 23 км/с/кпк. Однако и сегодня вопрос выбора верного значения Ω_p стоит не менее остро. Обсуждение этой проблемы можно найти, например, в работах Палуша и др. (1977), Палуша (1980), Марочника, Сучкова (1981), Пичардо и др. (2003) или Мартоса и др. (2004).

Удивительно, но и сегодня имеются оценки с малым значением $\Omega_p = 12$ км/с/кпк, полученные в работах Эйлерс и др. (2020) и Валле (2021) по современным данным. Правда, эти оценки мы не включили в таблицу, посчитав их экзотическими.

В таблицу мы не включили результаты модельных расчетов (например, Квиллен, Минчев, 2005; Чакрабартти, 2007; Мищенко и др., 2018), полученных с заранее заданными значениями Ω_p , посчитав такие оценки косвенными. Не включены были также работы, где авторы либо не определились со средним значением Ω_p (Грив и др., 2017), либо находят Ω_p отдельно по какому-либо отрезку спирального рукава (Наоц, Шавив, 2007). Но и без того можно видеть, что современные результаты лежат в очень широком интервале Ω_p : 18–32 км/с/кпк.

Прямой метод

Из выражения (3) вытекает простое соотношение:

$$\Omega_p = \frac{\theta - \theta_{\text{birth}}}{t}, \quad (13)$$

где θ — текущее положение звезды, θ_{birth} — позиционный угол, соответствующий месту рождения звезды, а t — возраст звезды. В табл. 2 этот метод обозначен как “ $\theta - \theta_{\text{birth}}$ ”.

Такой метод оценивания Ω_p , следуя Диасу, Лепине (2005), называем прямым. Его применяют в тех случаях, когда известны пространственные скорости звезд, их индивидуальные возрасты и принадлежность к конкретному спиральному рукаву. Разумеется, речь идет о молодых звездах, подверженных влиянию спиральной волны плотности. Для определения места рождения звезд θ_{birth} обычно строятся их галактические орбиты в прошлом с использованием подходящей модели гравитационного потенциала Галактики.

Используя прямой метод анализа в приложении к выборке молодых РЗС, Наоц, Шавив (2007) нашли для рукава Персея $\Omega_p = 20.0^{+1.7}_{-1.2}$ км/с/кпк и для Местного рукава $\Omega_p = 28.9^{+1.3}_{-1.2}$ км/с/кпк. Для двух участков рукава Киля—Стрельца эти авторы нашли два значения: $\Omega_{p1} = 16.5^{+1.2}_{-1.4}$ км/с/кпк и $\Omega_{p2} = 29.8^{+0.6}_{-1.3}$ км/с/кпк.

Диас и др. (2019) проанализировали кинематику около 440 РЗС моложе 50 млн лет, принадлежащих отрезкам спиральных рукавов Персея, Местного и Киля—Стрельца. Для вычисления средних расстояний и собственных движений скоплений были использованы данные из каталога Gaia DR2. На основе прямого метода — с определением места рождения РЗС — были получены оценка $\Omega_p = 28.2 \pm 2.1$ км/с/кпк и значение радиуса коротации $R_{\text{cor}} = 8.51 \pm 0.64$ кпк. Для принятых $R_0 = 8.3$ кпк и $V_0 = 240$ км/с значение радиуса коротации здесь составляет $R_{\text{cor}} = (1.02 \pm 0.07)R_0$.

Таблица 2. Оценки Ω_p , полученные различными авторами по молодым объектам

Ω_p , км/с/кпк	Объекты	Метод	Ссылка
11–13.5	ОВ-звезды	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(1)
~ 20	ОВ-звезды	ν	(2)
17.8 ± 3.1	ОВ-звезды	ν	(3)
19.1 ± 3.6	A,F,G-сверхгиганты и цефеиды	ν	(4)
21.3	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(5)
28.1 ± 2.0	цефеиды	ν	(6)
20 ± 2	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(7)
~ 30	ОВ-звезды	ν	(8)
24 ± 1	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(9)
$18.6^{+0.3}_{-0.2}$	$\sim 200\,000$ звезд каталога RAVE	ν	(10)
20.3 ± 0.5	ОВ-звезды	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(11)
23.0 ± 0.5	РЗС и гиганты	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(12)
25.2 ± 0.5	цефеиды	$\Delta\chi$	(13)
28.2 ± 2.1	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(14)
32.0 ± 0.9	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(15)
27 ± 1	цефеиды	$\Delta\chi$	(16)
26.5 ± 1.5	РЗС	$\theta - \theta_{\text{birth}}$	(17)

Примечание. (1) — Лин и др. (1969); (2) — Крезе, Меннесье (1973); (3) — Бил, Овенден (1978); (4) — Мишуров и др. (1979); (5) — Локтин, Маткин (1992); (6) — Мишуров и др. (1997); (7) — Амарал, Лепине (1997); (8) — Фернандес и др. (2001); (9) — Диас, Лепине (2005); (10) — Зиберт и др. (2012); (11) — Сильва, Напивотски (2013); (12) — Юнкейра и др. (2015); (13) — Дамбис и др. (2015); (14) — Диас и др. (2019); (15) — Кастро-Гинард и др. (2021); (16) — Бобылев, Байкова (2022д); (17) — Йоши, Малхотра (2022).

Йоши, Малхотра (2022) по различным литературным источникам сформировали выборку из 6133 РЗС, большинство из которых были обнаружены уже по данным Gaia. Проанализировав пространственное распределение скоплений, эти авторы показали, что большинство РЗС покидают спиральные рукава примерно через 10–20 млн лет после своего возникновения. Сравнив текущие положения около 440 молодых РЗС с их положениями на момент рождения, Йоши, Малхотра

(2023) на основе соотношения (13) нашли $\Omega_p = 26.5 \pm 1.5$ км/с/кпк. Значение радиуса коротации $R_{\text{cor}} = 8.83^{+0.48}_{-0.46}$ кпк ($R_{\text{cor}}/R_0 = 1.08^{+0.06}_{-0.05}$) эти авторы оценили, привязавшись к кривой вращения Галактики, задаваемой потенциалом из работы Бови (2015), где $\Omega_0 = 27.5$ км/с/кпк ($V_0 = 220$ км/с и $R_0 = 8.0$ кпк). Отметим, что эти авторы рассматривали более сложный вариант уравнения (1), описывающий каждый отрезок спирального рукава

в виде секторной структуры:

$$R = R_{\text{kink}} e^{(\theta - \theta_{\text{kink}}) \text{tg } i}, \quad (14)$$

где R_{kink} и θ_{kink} — характеристики секторной структуры спирального рукава.

Относительные методы

Далее опишем результаты, полученные несколькими методами. Их мы называем относительными, так как они прямо зависят от принятого значения угловой скорости галактического вращения Ω_0 . В табл. 2 метод, основанный на применении соотношений (6)–(9), обозначен как “ ν ”.

При рассмотрении относительных смещений в положениях звезд, вызванных спиральной волной плотности за промежуток времени Δt , уравнение (3) запишется так:

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \text{tg } i \times \left[\theta - \theta_0 + \frac{\chi - \chi_0}{m} + (\Omega - \Omega_p) \Delta t \right]. \quad (15)$$

При $R = R_0$ и $\theta = \theta_0 = 0$ будем иметь следующее соотношение:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta\chi \times 10^3}{m\Delta t}, \quad (16)$$

где разность фаз $\Delta\chi$ выражена в радианах, разность возраста Δt в млн лет, а $\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega_p$ в км/с/кпк. В табл. 2 этот метод обозначен как “ $\Delta\chi$ ”.

Анализ положений звезд

Из анализа пространственного положения РЗС различного возраста Локтин, Маткин (1992) получили оценку $\Omega_p = 21.3$ км/с/кпк. По пространственному распределению классических цефеид Дамбис и др. (2015) нашли значение $\Omega_p = 25.2 \pm 0.5$ км/с/кпк, усредненное по трем отрезкам спиральных рукавов.

Изучая распределение цефеид разного возраста в рукавах Киля–Стрельца и Внешем, Бобылев, Байкова (2022 г.) получили оценку $\Omega_p = 27 \pm 1$ км/с/кпк и значение радиуса коротации $R_{\text{cor}} = 9.0 \pm 0.3$ кпк ($R_{\text{cor}}/R_0 = 1.1 \pm 0.04$).

Анализ кинематики звезд

Вначале отметим результаты применения соотношений (6)–(9). Так, Крезе, Меннесье (1973) нашли $\Omega_p = 20.0 \pm 4.1$ км/с/кпк по выборке ОВЗ-звезд с принятым значением $R_0 = 8$ кпк. В работе Мишурова и др. (1979) по кинематике 183

AFG-сверхгигантов и выборки из 192 классических цефеид была получена оценка $\Omega_p = 19.1 \pm 3.6$ км/с/кпк. Позже, по кинематике классических цефеид, Мишуров и др. (1997) нашли $\Omega_p = 28.1 \pm 2.0$ км/с/кпк. Фернандес и др. (2001) использовали такой подход при изучении кинематики ОВ-звезд каталога HIPPARCOS (1997) и получили значение Ω_p , близкое к 30 км/с/кпк.

Лепине и др. (2001) применили такой подход для обоснования модели, состоящей из суперпозиции двух- и четырехрукавного спирального узора. В частности, по выборке классических цефеид с собственными движениями и лучевыми скоростями было найдено $\Omega_p - \Omega_0 = 0.15$ км/с/кпк для двухрукавного и $\Omega_p - \Omega_0 = 0.18$ км/с/кпк для четырехрукавного узора. Таким образом, в этой модели Солнце находится практически на радиусе коротации. Причем здесь круг коротации расположен немного ближе к центру Галактики, чем Солнце. Это следует из того, что разность $\Omega_p - \Omega_0$ найдена положительной.

Положительная разность $\Omega_p - \Omega_0 \approx 0.5$ км/с/кпк была получена, например, и в работе Мишурова, Зениной (1999). Эти авторы анализировали выборку классических цефеид с собственными движениями HIPPARCOS (1997), а также лучевыми скоростями, и нашли $\Omega_0 = 27.3 \pm 1.7$ км/с/кпк при $R_0 = 7.5 \pm 0.1$ кпк. В итоге ими был сделан вывод о близости Солнца к кругу коротации, так как разность $R_{\text{cor}} - R_0$ составила ≈ 0.1 кпк.

Во многих случаях, указанных в табл. 2, когда оценки Ω_p были получены с применением метода “ ν ”, разность $\Omega_p - \Omega_0$ является отрицательной, поэтому $R_{\text{cor}} > R_0$.

В работе Зиберт и др. (2012) по 213 713 звездам каталога RAVE (Стейнмец и др., 2006) с использованием соотношений (6)–(9) была получена оценка $\Omega_p = 18.6_{-0.2}^{+0.3}$ км/с/кпк для $m = 2$. Отметим, что эти авторы анализировали также и четырехрукавную модель спиральной структуры ($m = 4$), в рамках которой нашли $\Omega_p = 25.8_{-0.1}^{+0.1}$ км/с/кпк.

Применяется также подход, основанный на соотношении (16). Например, в работе Бобылева, Байковой (2012) отслеживалось изменение радиальной фазы $\Delta\chi$, полученное в результате спектрального анализа остаточных скоростей цефеид. В итоге по трем выборкам классических цефеид различного возраста было найдено $\Omega_0 - \Omega_p = 10 \pm 3$ км/с/кпк для принятого значения $m = 2$ (тогда $\Omega_0 - \Omega_p = 5 \pm 2$ км/с/кпк для $m = 4$). Таким образом, принимая для цефеид $\Omega_0 = 29$ км/с/кпк, получим оценку $\Omega_p = 24 \pm 2$ км/с/кпк для случая $m = 4$, которая находится в хорошем согласии с результатами табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе использованы полученные нами ранее по различным звездным выборкам оценки амплитуд скоростей возмущения f_R и f_θ , вызванные влиянием спиральной волны плотности. Это: а) галактические мазерные источники с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, б) OB2-звезды, в) цефеиды. Собственные движения OB2-звезд и цефеид были взяты из каталога Gaia EDR3.

Расстояния до использованных мазеров были измерены с ошибками менее 10%. Такой же уровень имеют ошибки расстояний до OB2-звезд, которые вычислялись на основе тригонометрических параллакс-каталога Gaia EDR3. Расстояния до цефеид были вычислены в работе Сковрон и др. (2019) на основе соотношения период—светимость с ошибками менее 5%. Для всех трех выборок скорости возмущения f_R и f_θ были найдены с использованием спектрального анализа.

По этим данным получены новые оценки угловой скорости вращения спирального узора Ω_p : 24.61 ± 2.06 , 24.71 ± 1.29 и 25.98 ± 1.37 км/с/кпк по выборке мазеров, OB2-звезд и цефеид соответственно. Значения радиуса коротации R_{cor}/R_0 для этих трех выборок составили 1.16 ± 0.09 , 1.15 ± 0.06 и 1.09 ± 0.06 , что говорит о близости коротации к Солнцу. Причем коротационный круг расположен между Солнцем и отрезком рукава Персея.

Результаты, полученные нами по трем выборкам, находятся между собой в очень хорошем согласии. Однако оценки Ω_p , полученные другими авторами в последнее время, лежат в достаточно широком интервале Ω_p : 18–32 км/с/кпк.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амарал, Лепине (L.H. Amaral and J.R.D. Lépine), *MNRAS* **286**, 885 (1997).
2. Андерсон и др. (R.I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, C. Georgy, and G. Meynet), *Astron. Astrophys.* **591**, A8 (2016).
3. Ачарова и др. (I.A. Acharova, J.R.D. Lépine, Yu.N. Mishurov, B.M. Shustov, A.V. Tutukov, and D.S. Wiebe), *MNRAS* **402**, 1149 (2010).
4. Бенджамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler, L. Brian, T.M. Bania, Dan P. Clemens, M. Cohen, J.M. Dickey, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 953 (2003).
5. Бил, Овенден (J. Byl and M.W. Ovenden), *Astrophys. J.* **225**, 496 (1978).
6. Бови (J. Bovy), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **216**, 29 (2015).
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **38**, 715 (2012) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **38**, 638 (2012)].
8. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **99**, 267 (2022a) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **66**, 269 (2022a)].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 492 (2022b) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 376 (2022b)].
12. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 184 (2022в) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 169 (2022c)].
13. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **99**, 558 (2022г) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **66**, 545 (2022d)].
14. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 686 (2022д) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 568 (2022e)].
15. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1 (2021).
16. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **454**, 119 (1995).
17. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **566**, 261 (2002).
18. Валле (J.P. Vallée), *Astron. J.* **135**, 1301 (2008).
19. Валле (J.P. Vallée), *New Astron. Review* **79**, 49 (2017a).
20. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. Space Sci.* **362**, 79 (2017b).
21. Валле (J.P. Vallée), *MNRAS* **506**, 523 (2021).
22. Ванг и др. (S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng), *Astrophys. J.* **852**, 78 (2018).
23. Герхард (O. Gerhard), *Mem. Soc. Astron. It. Suppl.* **18**, 185 (2011).
24. Грив и др. (E. Griv, L.-G. Hou, I.-G. Jiang, and C.-C. Ngeow), *MNRAS* **464**, 4495 (2017).
25. Дамбис А.К., Бердников Л.Н., Ефремов Ю.Н. и др., Письма в Астрон. журн. **41**, 533 (2015) [A.K. Dambis, et al., *Astron. Lett.* **41**, 489 (2015)].
26. Диас, Лепине (W.S. Dias and J.R.D. Lépine), *Astrophys. J.* **629**, 825 (2005).
27. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, J.R.D. Lépine, and D.A. Barros), *MNRAS* **486**, 5726 (2019).
28. Зиберт и др. (A. Siebert, B. Famaey, J. Binney, B. Burnett, C. Faure, I. Minchev, M.E.K. Williams, O. Bienayme, et al.), *MNRAS* **425**, 2335 (2012).
29. Йоши, Малхотра (Y.C. Joshi and S. Malhotra), *arXiv*: 2212.09384 (2022).
30. Кастро-Гинард и др. (A. Castro-Ginard, P.J. McMillan, X. Luri, C. Jordi, M. Romero-Gomez, T. Cantat-Gaudin, L. Casamiquela, Y. Tarricq, C. Soubiran, and F. Anders), *Astron. Astrophys.* **652**, 162 (2021).

31. Квиллен, Минчев (A.C. Quillen and I. Minchev), *Astron. J.* **130**, 576 (2005).
32. Крезе, Меннесье (M. Crézé and M.O. Mennessier), *Astron. Astrophys.* **27**, 281 (1973).
33. Лепине и др. (J.R.D. Lépine, Yu.N. Mishurov, and S.Yu. Dedikov), *Astrophys. J.* **546**, 234 (2001).
34. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
35. Линь и др. (C.C. Lin, C. Yuan, and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
36. Локтин, Маткин (A.V. Loktin and N.V. Matkin), *Astron. Astrophys. Tr.* **3**, 169 (1992).
37. Марочник и др. (L.S. Marochnik, Yu.N. Mishurov, and A.A. Suchkov), *Astrophys. Space Sci.* **19**, 285 (1972).
38. Марочник, Сучков (L.S. Marochnik and A.A. Suchkov), *Astrophys. Space Sci.* **79**, 337 (1981)].
39. Мартос и др. (M. Martos, X. Hernandez, M. Yáñez, E. Moreno, and B. Pichardo), *MNRAS* **350**, L47 (2004).
40. Мишуров Ю.Н., Павловская Е.Д., Сучков А.А., *Астрон. журн.* **23**, 147 (1979) [Yu.N. Mishurov, E.D. Pavlovskaya, and A.A. Suchkov, *Astron. Rep.* **56**, 268 (1979)].
41. Мишуров и др. (Yu.N. Mishurov, I.A. Zenina, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, and A.S. Rastorguev), *Astron. Astrophys.* **323**, 775 (1997).
42. Мишурова, Зениной (Yu.N. Mishurov and I.A. Zenina), *Astron. Astrophys.* **341**, 781 (1999).
43. Мишуров, Ачарова (Yu.N. Mishurov and I.A. Acharova), *MNRAS* **412**, 1771 (2011).
44. Мищенко и др. (T.A. Michtchenko, J.R.D. Lépine, A. Pérez-Villegas, R.S.S. Vieira, and D.A. Barros), *Astrophys. J. Lett.* **863**, L37 (2018).
45. Наоц, Шавив (S. Naoz and N.J. Shaviv), *New Astron.* **12**, 410 (2007).
46. Палуш и др. (J. Palouš, J. Ruprecht, O.B. Dluhnevskaya, and T. Piskunov), *Astron. Astrophys.* **61**, 27 (1977).
47. Палуш и др. (J. Palouš), *Astron. Astrophys.* **87**, 361 (1980).
48. Пичардо и др. (B. Pichardo, M. Martos, E. Moreno, and J. Espresate), *Astrophys. J.* **582**, 230 (2003).
49. Расторгуев и др. (A.S. Rastorguev, E.V. Glushkova, M.V. Zabolotskikh, and H. Baumgardt), *Astron. Astrophys. Tr.* **20**, 103 (2001).
50. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, Y. Wu, B. Zhang, et al.), *Astrophys. J.* **783**, 130 (2014).
51. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
52. Рольфс К., *Лекции по теории волн плотности* (М.: Мир, 1980) [K. Rohlfs, *Lectures on density wave theory*, Springer-Verlag, Berlin, 1977; Mir, Moscow, 1980].
53. Сильва, Напивотски (M.D.V. Silva and R. Napiwotzki), *MNRAS* **431**, 502 (2013).
54. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszynski, M.K. Szymanski, R. Poleski, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
55. Стейнмец и др. (M. Steinmetz, T. Zwitter, A. Siebert, F.G. Watson, K.C. Freeman, U. Munari, R. Campbell, M. Williams, et al.), *Astron. J.* **132**, 1645 (2006).
56. Сюй и др. (Y. Xu, L.G. Hou, S. Bian, et al.), *Astron. Astrophys.* **645**, L8 (2021).
57. Удальский и др. (A. Udalski, M.K. Szymański, and G. Szymański), *Acta Astron.* **65**, 1 (2015).
58. Фернандес и др. (D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra), *Astron. Astrophys.* **372**, 833 (2001).
59. Хирота и др. (VERA collaboration, T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, Y. Adachi, R.A. Burns, J.O. Chibueze, Y.K. Choi, K. Hachisuka, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **70**, 51 (2020).
60. Чакрабартти (D. Chakrabarty), *Astron. Astrophys.* **467**, 145 (2007).
61. Чен и др. (X. Chen, S. Wang, L. Deng, R. de Grijs, and M. Yang), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **237**, 28 (2018).
62. Эйлерс и др. (A.-C. Eilers, D.W. Hogg, H.-W. Rix, et al.), *Astrophys. J.* **900**, 186 (2020).
63. Юань (C. Yuan), *Astrophys. J.* **158**, 889 (1969).
64. Юнкейра и др. (T.C. Junqueira, C. Chiappini, J.R.D. Lépine, et al.), *MNRAS* **449**, 2336 (2015).
65. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).