



Наиболее интересные результаты изучения Галактики по ОВ-звездам

В.В. Бобылев^{1*}; А.Т. Байкова¹,

¹ ГАО РАН

Аннотация

Дан обзор основных результатов изучения структуры и кинематики Галактики, полученных различными научными коллективами с использованием ОВ-звезд. Основное внимание уделено результатам авторов настоящей работы. Рассмотрены такие вопросы, как: а) характер пространственного распределения ОВ-звезд в Галактике; б) использование ОВ-звезд для уточнения параметров спирального узора Галактики; в) уточнение по ОВ-звездам параметров вращения Галактики и скоростей возмущения, вызванных влиянием галактической спиральной волны плотности; г) пространственная и кинематическая связь ОВ-звезд с крупномасштабным искривлением галактического диска; д) анализ движения некоторых убегающих ОВ-звезд.

Введение

Звезды спектрального класса О и ранние В это очень молодые (несколько млн лет) массивные (более $10M_{\odot}$) звезды высокой светимости. Такие звезды являются популяцией галактического диска с наиболее быстрым вращением вокруг оси вращения Галактики, распределены по всему галактическому диску, отлично трассируют спиральный узор, так как еще не удалились далеко от места своего рождения, видны с больших расстояний, трассируют крупномасштабное искривление галактического диска. Благодаря этим свойствам они представляют большое значение для изучения структуры и кинематики Галактики на различных масштабах. Причем для этой цели служат различные выборки, а именно, собственно ОВ-звезды, зоны НII, где центральными возбуждающими являются звезды спектрального класса О, а также наиболее молодые рассеянные звездные скопления и ОВ-ассоциации.

Изучению Галактики с использованием ОВ-звезд посвящено огромное количество публикаций. Это, например, работы Creze и Mennessier, 1973; Melnik и Dambis, 2020; Pantaleoni Gonzalez и др., 2021; Bobylev и Bajkova, 2017, 2018, 2019, 2022a,b; Wright, 2022; Byl и Ovenden, 1978; Mel'Nik, Dambis и Rastorguev, 2001; Fernandez, Figueras и Torra, 2001; Zabolotskikh, Rastorguev и Dambis, 2002; Russeil, 2003; Bouy и Alves, 2015; Xu, L.-G. Hou и Wu, 2018; Xu, L. G. Hou и др., 2021.

Отметим исследование Russeil, 2003, в котором отражены важные аспекты изучения структуры галактического диска по массивным звездам высокой светимости. На рис. 1, взятом из работы там же, дано распределение комплексов активного звездообразования в проекции на галактическую плоскость XY. Расстояния до этих комплексов были определены а) кинематическим способом с использованием лучевых скоростей звезд или окружающих молекулярных облаков (по спектральным линиям CO) и б) при наличии спектральной классификации и необходимых фотометрических данных фотометрическим способом по ОВЗ-звездам, ответственным за возникновение вокруг них зон НII. Как можно видеть из рисунка, комплексы звездообразования распределены в широкой области галактического диска. Показан найденный по ним четырехрукавный спиральный узор. Отражен эффект крупномасштабного искривления галактического диска.

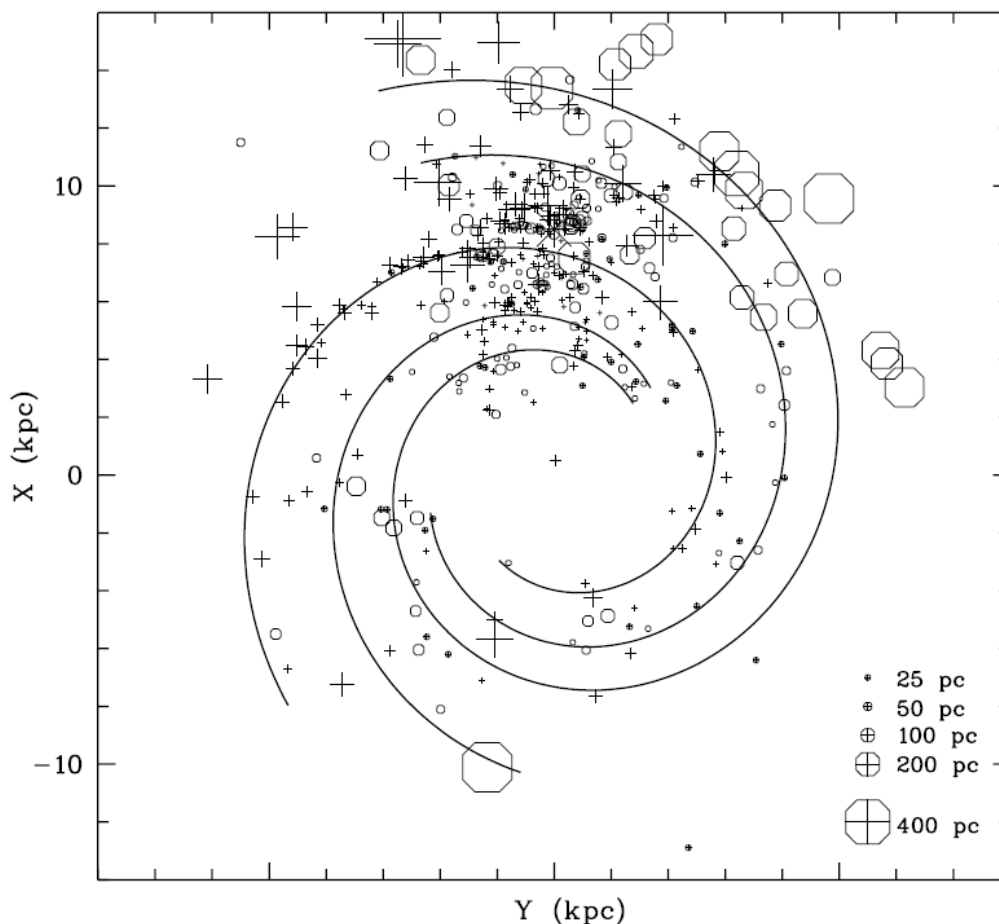


Рис. 1: Распределение комплексов звездообразования в проекции на галактическую плоскость XY . Показан четырехрукавный спиральный узор. Круглые символы и кресты обозначают соответственно комплексы выше и ниже галактической плоскости. Размер символа пропорционален расстоянию от плоскости. Центр Галактики расположен в начале координат. Положение Солнца отмечено косым крестом в точке $(X, Y) = (8.5, 0)$ кпк. Комплексы, расположенные ближе 1 кпк от Солнца, не были нанесены на график. Рисунок взят из работы Russeil, 2003.

Точность оценивания гелиоцентрических расстояний до ОВ-звезд имеет важное значение для изучения крупномасштабной структуры Галактики. В настоящее время источниками наиболее точных массовых измерительных данных являются каталоги с измеренными тригонометрическими параллаксами звезд. Это каталоги, полученные в результате космических наблюдений, такие как *Esa*, 1997 и *Gaia* (*Gaia* Collaboration и Prusti, 2016).

Каталог *Esa*, 1997 послужил для детального изучения ближайшей околосолнечной окрестности, радиусом около 400 пк, где расположены известные ОВ-ассоциации de Zeeuw и др., 1999, тесно связанные со структурой пояса Гулда (Torra, Fernandez и Figueras, 2000). По тригонометрическим параллаксам звезд каталога Hipparcos были откалиброваны различные шкалы расстояний. В частности, по ОВ-звездам была осуществлена калибровка кальциевой шкалы Megier, Strobel, Bondar и др., 2005. Согласно оценкам (Megier, Strobel, Galazutdinov и др., 2009), точность определения индивидуального расстояния до ОВ-звезд этим методом составляет $\approx 15\%$. В основе подхода лежит предположение об однородном распределении ионизованных межзвездных атомов (Ca II, Na I или K I) в плоскости Галактики.

Интерес представляют спектрально-двойные системы, содержащие в качестве компонентов ОВ-звезды. Такие системы обычно имеют длительную историю спектральных и фотометриче-

*e-mail: vbobylev@gaoran.ru

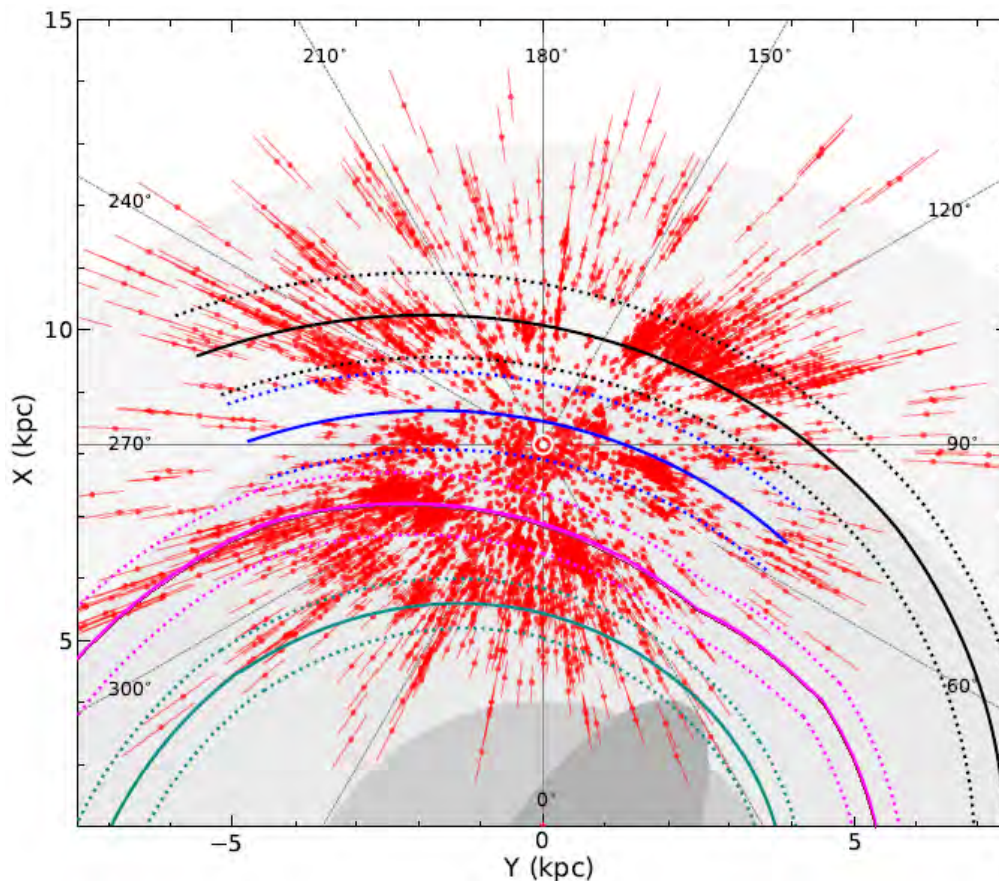


Рис. 2: Распределение звезд спектральных классов O и B0 из каталога Gaia EDR3 в проекции на галактическую плоскость XY . Положение Солнца отмечено символом \odot белого цвета. Показан спиральный узор согласно работе Reid и др., 2019, видна часть центрального галактического бара (наиболее темная серая заливка). Рисунок взят из работы Xu, L. G. Hou и др., 2021.

ских наблюдений. Для них обычно хорошо известны их системные лучевые скорости, спектральная классификация и фотометрия. В работе Bobylev и Vajkova, 2013 по литературным данным была создана база данных о таких системах, расположенных в радиусе ≤ 3 кпк от Солнца, включающая около 200 объектов. Расстояния до ряда (не более десятка) таких систем с полностью определенными орбитами вычислены методом динамического параллакса. Такой метод может давать результаты, по точности не уступающие оценкам, полученным на основе тригонометрических параллаксов.

С другой стороны, среди самых молодых OB-звезд доля двойных и кратных составляет 70 – 80%. Разрушение таких систем приводит к возникновению большого количества убегающих звезд — звезд с остаточными пространственными скоростями более 40 км/с. Самые известные среди них AE Aur, μ Col и ι Ori (Blaauw и Morgan, 1954, Hoogerwerf, de Bruijne и de Zeeuw, 2001, Tetzlaff, Neuhäuser и Hohle, 2011) летят со скоростями более 100 км/с. Однако такие скорости не предел — в Галактике известны так называемые гиперскоростные звезды, летящие со скоростями в сотни и тысячи км/с W. R. Brown и др., 2006. Одна из гипотез возникновения эффекта предполагает, что при критическом сближении двойной со сверхмассивной черной дырой в центре Галактики, один из компаньонов поглощается, а другой вылетает в сторону с огромной скоростью (эффект пращи). Обнаруженные гиперскоростные звезды покидают Млечный Путь, т.к. их скорости превышают скорость отрыва от гравитационного притяжения Галактики.

В версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Gaia Collaboration и A. G. A. Brown, 2021) тригонометрические параллаксы для примерно 500 млн звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги (мсд). Для звезд со звездными величинами $G < 15^m$ случайные ошибки изме-

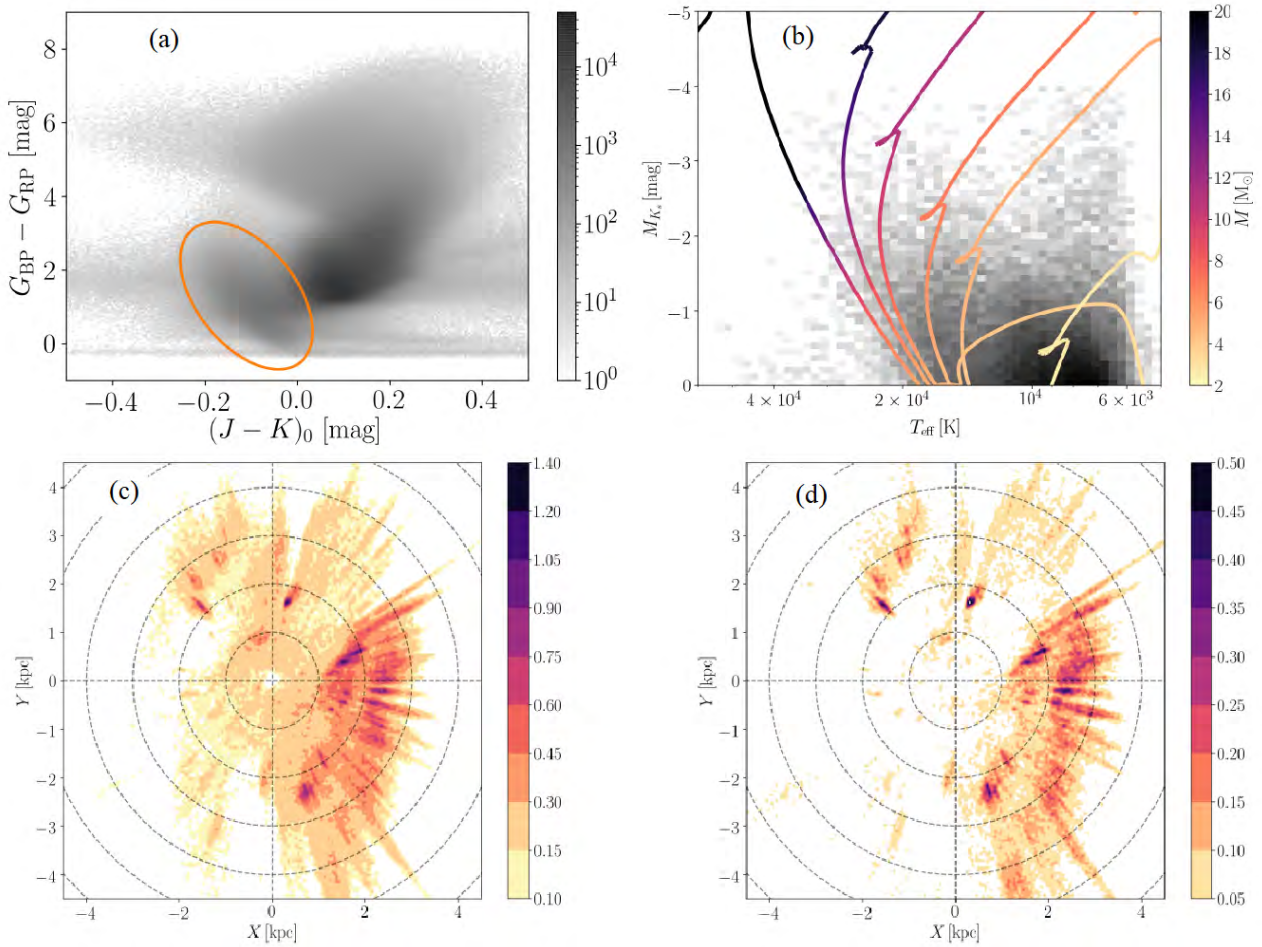


Рис. 3: (a) — Диаграмма $(J - K_s)_0 - (G_{BP} - G_{RP})$, звезды спектральных классов OBA0 попадают в выделенную оранжевым эллипсом область, (b) — диаграмма $\log T_{\text{eff}} - M_{K_s}$, изохроны имеют цветовую маркировку в соответствии с их массой, (c) — распределение плотности горячих звезд с абсолютными величинами $M_{K_s} < -1^m$ в проекции на галактическую плоскость XY , (d) — распределение плотности горячих звезд с абсолютными величинами $M_{K_s} < -2^m$ в проекции на галактическую плоскость XY . Рисунки взяты из работы Zari и др., 2021.

рения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги в год (мсд/год), и они сильно возрастают у более слабых звезд. В целом, собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%. В Gaia EDR3 значения лучевых скоростей были скопированы из предыдущей версии каталога, из Gaia DR2 (Gaia Collaboration и A. G. A. Brown, 2018). Недавно опубликована версия каталога Gaia DR3 (Gaia Collaboration и Vallenari, 2022). При этом в ней существенно улучшены лучевые скорости звезд, а значения параллаксов и собственных движения звезд просто скопированы из Gaia EDR3.

Использование высокоточных (с относительными ошибки параллаксов менее 10%) тригонометрических параллаксов Gaia позволяет охватить для анализа область вокруг Солнца радиусом 4–5 кпк. Для примера на рис. 2 дано распределение около 14 000 OB-звезд (красные точки) в проекции на галактическую плоскость XY из работы Xu, L. G. Hou и др., 2021. Для построения этого рисунка были взяты из каталога Gaia EDR3 звезды O–B0. В каталоге Gaia информации о спектрах звезд нет, однако там же отождествили с каталогом Gaia EDR3 спектрально подтвержденные в работе Skiff, 2014 звезды спектральных классов от O до B2. Расстояния до них вычислены в работе Xu, L. G. Hou и др., 2021 с использованием тригонометрических параллаксов, причем были взяты звезды, относительные ошибки параллаксов которых не превышают 10%. Показан спиральный узор согласно работе Reid и др., 2019. В частности, черной линией дан от-

резок спирального рукава Персея, синей линией — Местный рукав, сиреневой линией — отрезок рукава Киля-Стрельца, а зеленой — отрезок рукава Щита. Границы спиральных рукавов (кроме Местного) даны пунктирными линиями. Отметим, что в работе Reid и др., 2019 параметры спирального узора были вычислены по мазерам, для которых тригонометрические параллаксы были определены по радионаблюдениям методом РСДБ с высокой точностью (с ошибками в среднем менее 10%).

В каталоге Gaia нет спектральной информации. Однако известны достаточно успешные попытки выделения молодых звезд по фотометрическим данным. В работе Zari и др., 2021 осуществлен отбор горячих звезд высокой светимости ($M_{K_s} \leq 0^m$, $T_{\text{eff}} \geq 8000$ K) на основе комбинации астрометрии и фотометрии Gaia EDR3 и фотометрии 2MASS (Skrutskie и др., 2006). Результаты отражены на рис. 3. Как можно видеть из этого рисунка, выделенные горячие звезды распределены в области радиусом около 4 кпк вокруг Солнца, отчетливо прослеживается отрезок спирального рукава Киля-Стрельца. В целом распределение выделенных Zari и др., 2021 звезд имеет сходство с более детальной картиной (рис. 2), полученной в работе Ху, L. G. Нои и др., 2021 с использованием спектральной классификации ОБ-звезд. Тем не менее, выделенные в работе Zari и др., 2021 горячие звезды высокой светимости отчетливо демонстрируют эффект искривления галактического диска не только в координатах, но и в вертикальных скоростях (рисунки 12 и 13 в работе Zari et al.).

В настоящей работе дан обзор основных результатов изучения структуры и кинематики Галактики, полученных различными научными коллективами с использованием ОБ-звезд. Основное внимание уделено результатам авторов настоящей работы.

1 Системы координат

Из наблюдений имеем три следующие составляющие скорости звезды: лучевую скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно. Все три скорости выражены в км/с, 4.74 является коэффициентом размерности, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат x, y, z :

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды, скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V в направлении вращения Галактики и W на северный галактический полюс. Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра и ортогональную ей скорость V_{circ} (иногда применяем обозначение V_θ), направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{\text{circ}} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Расстояние от звезды до оси вращения Галактики R вычисляется на основе соотношения $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$.

В настоящей работе значение R_0 принимается равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору Bobylev и Vajkova, 2021a, где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Довольно часто используется также прямоугольная система координат X, Y, Z , в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики, а ось Z направлена в северный полюс Галактики (см. рис. 1 и 2).

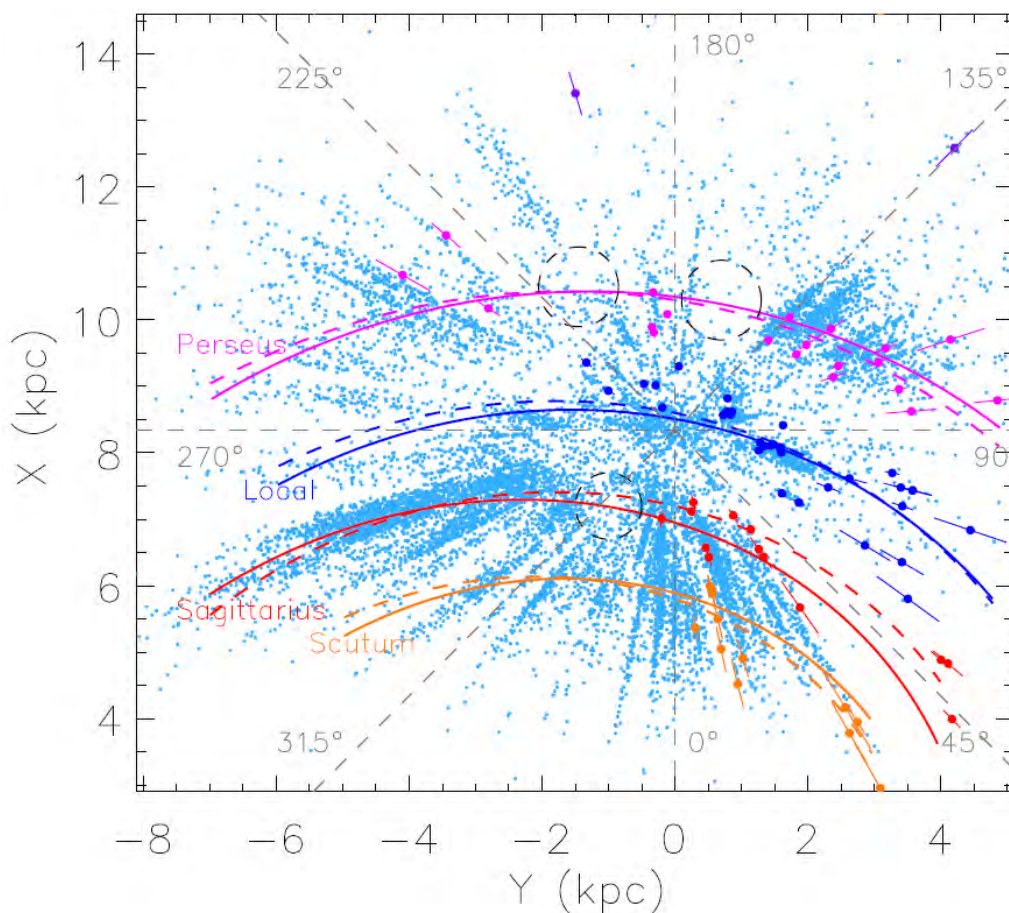


Рис. 4: Распределение OB-звезд из каталога Gaia EDR3 в проекции на галактическую плоскость XY. Сплошными линиями показан спиральный узор согласно работе Chen и др., 2019, пунктирными – согласно работе Xu, Bian и др., 2018, цветными кружками дано положение мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, пунктирными кругами отмечены пустоты. Рисунок взят из работы Chen и др., 2019.

2 Спиральный узор

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно описать следующим уравнением:

$$R = R_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan i}, \quad (3)$$

где θ — позиционный угол, θ_0 — некоторый произвольно выбранный начальный угол; i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали).

Хотя в работе Xu, L. G. Hou и др., 2021 продемонстрирована тесная связь OB-звезд со спиральной структурой (рис. 2), задача по уточнению параметров узора по OB-звездам не ставилась. Такая задача была поставлена и решена в работе Chen и др., 2019, в которой по OB-звездам получены новые оценки параметров спиральной структуры, а также средние значения и дисперсии распределения вертикальных скоростей отдельных спиральных рукавов.

там же отобрали 6 858 кандидатов в OB-звезды из объединенных данных VPHAS+ DR2 (VST Photometric H α Survey DR2, Drew и др., 2014) и Gaia DR2. Их выборка состояла из 14 880 O-звезд и ранних B-звезд с относительными ошибками тригонометрических параллакс Gaia <20%.

На рис. 4 дано распределение на галактической плоскости OB-звезд, отобранных в работе Chen и др., 2019. Показан найденный этими авторами спиральный узор в сравнении с полученным в работе Xu, Bian и др., 2018 по мазерам с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами.

Таблица 1: Значения углов закрутки i и параметра a_0 (положение центра рукава на оси X) для четырех отрезков спиральных рукавов

Параметр	II	III	IV	Local	Ref
i , град.	-9.3 ± 2.2	-14.8 ± 0.8	-11.5 ± 1.9	-10.2 ± 0.3	(1)
i , град.	-10.5 ± 0.4	-7.9 ± 1.2	-10.3 ± 1.2		(2)
i , град.	-9.0 ± 1.9	-9.5 ± 2.0	-6.2 ± 4.2	-11.4 ± 1.9	(3)
i , град.	-9.9 ± 1.3	-10.6 ± 0.5	-18.6 ± 6.9	-16.5 ± 0.5	(4)
i , град.	-13.5 ± 0.5	-9.0 ± 0.1		-11.5 ± 0.5	(5)
i , град.	-17.4 ± 0.2	-7.0 ± 0.3		-10.2 ± 0.2	(6)
i , град.	-13.1 ± 1.4	-6.2 ± 1.6	-5.2 ± 2.8	-9.9 ± 1.2	(7)
a_0 , кпк	6.8 ± 0.3	9.9 ± 0.4	13.5 ± 0.5	8.1 ± 0.3	(1)
a_0 , кпк	6.4 ± 0.1	8.7 ± 0.1	10.9 ± 0.1		(2)
a_0 , кпк	6.0 ± 0.1	8.9 ± 0.1	12.2 ± 0.4	8.3 ± 0.1	(3)
a_0 , кпк	7.2 ± 0.1	10.6 ± 0.1		8.3 ± 0.1	(5)
a_0 , кпк	6.95 ± 0.01	10.35 ± 0.01		8.51 ± 0.01	(6)
a_0 , кпк	6.78 ± 0.05	9.74 ± 0.09	12.02 ± 0.17	8.19 ± 0.05	(7)

(1) – Bobylev и Vajkova, 2014; (2) – Dambis и др., 2015; (3) – Reid и др., 2019; (4) – I. I. Nikiforov и Veselova, 2018; (5) – Xu, L.-G. Hou и Wu, 2018; (6) – Chen и др., 2019; (7) – Veselova и I. Nikiforov, 2020; II – рукав Киля-Стрельца, III – рукав Персея, IV – Внешний рукав, Local – Местный рукав.

В таблице 1 даны оценки параметров спирального узора, полученные из анализа различных индикаторов спиральной структуры. В работах Bobylev и Vajkova, 2014, I. I. Nikiforov и Veselova, 2018 и Reid и др., 2019 эти параметры определены по мазерам с измеренными тригонометрическими параллаксами. В работах Dambis и др., 2015 и Veselova и I. Nikiforov, 2020 для этой цели были использованы классические цефеиды. В работе Xu, L.-G. Hou и Wu, 2018 — по облакам нейтрального и молекулярного водорода, рассеянным звездным скоплениям, мазерным источникам и O-звездам с параллаксами из каталога Gaia DR2.

Обратим внимание — на рис. 4 наибольшее расхождение между моделями спирального узора наблюдается для отрезка рукава Киля-Стрельца в первом галактическом квадранте при $l \approx 45^\circ$. В работе Chen и др., 2019, как и в большинстве работ, в том числе указанных в таблице 1, предполагается, что у каждого отрезка спирального рукава угол закрутки постоянен. Однако некоторые авторы (Cordes и McLaughlin, 2003, Xu, L.-G. Hou и Wu, 2018, Reid и др., 2019) применяют подход, в котором конкретный спиральный рукав состоит из секторов с различными характеристиками, такими как θ_0 , i , и R_0 в выражении (3).

Для примера на рис. 5 дана известная модель Кордеса-Лазиио (Cordes и McLaughlin, 2003), где хорошо видна особенность спирального рукава Киля-Стрельца в первом галактическом квадранте. На этом рисунке сплошными линиями показана модель спиральной структуры Галактики согласно работе Taylor и Cordes, 1993, а пунктирными линиями дана четырехрукавная логарифмическая спираль, сочетающая локальные параметры (компоненты пекулярной скорости Солнца) из работы Wainscoat и др., 1992, модифицированная так, чтобы рукава соответствовали некоторым характеристикам модели Taylor и Cordes, 1993.

3 Методы кинематического анализа

3.1 Параметры вращения Галактики

Параметры вращения Галактики оцениваем через разложение угловой скорости вращения $\Omega(R)$ в ряд Тейлора по степеням $(R - R_0)$:

$$\Omega(R) = \Omega(R_0) + \Omega'(R_0)(R - R_0) + \Omega''(R_0)(R - R_0)^2/2! + \dots \quad (4)$$

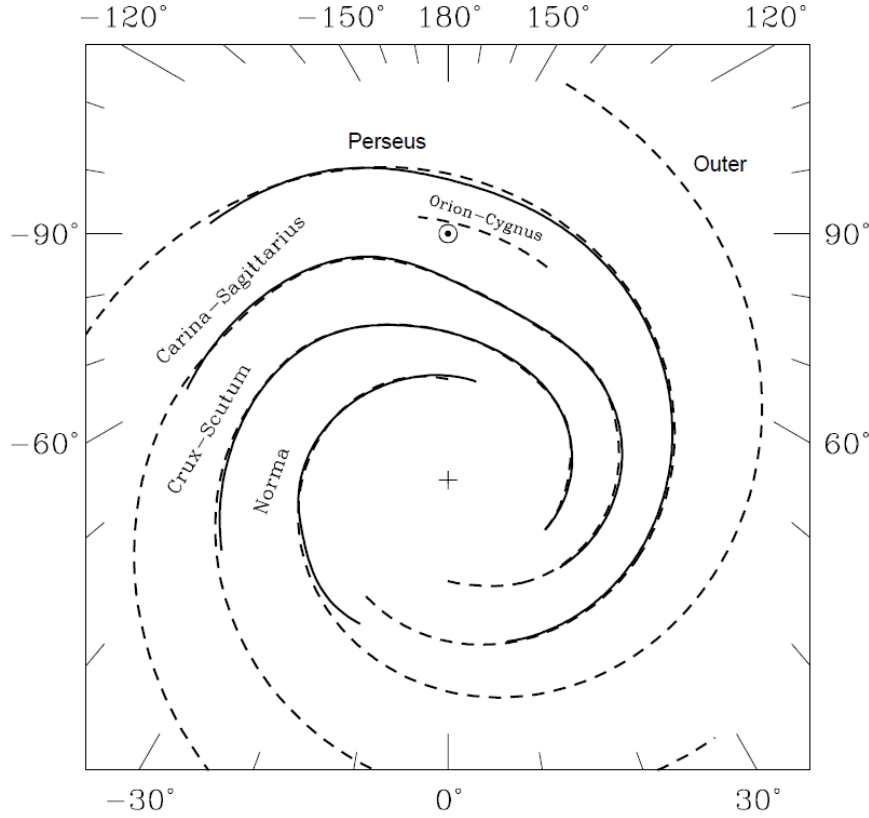


Рис. 5: Распределение межзвездного вещества согласно модели NE2001. Рисунок взят из работы Cordes и McLaughlin, 2003.

Ограничиваясь 2-й производной и учитывая, что в наблюдаемые лучевую и тангенциальную скорости входит пекулярное движение Солнца, можем получить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} V_r = & -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l - W_{\odot} \sin b \\ & + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_l = & U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r \Omega_0 \cos b \\ & + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + (R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0 / 2, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_b = & U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b - W_{\odot} \cos b \\ & - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0 / 2, \end{aligned} \quad (7)$$

где Ω'_0 и Ω''_0 соответствующие производные угловой скорости на солнечном круге, U_{\odot} , V_{\odot} и W_{\odot} — компоненты групповой скорости (взятые с обратным знаком) анализируемой выборки звезд относительно Местного стандарта покоя.

Иногда скорости U_{\odot} , V_{\odot} , W_{\odot} называют компонентами пекулярной скорости Солнца. Хотя известно, что компонента скорости V_{\odot} подвержена влиянию эффекту отставания центроидов, что выявляется при изучении движений звезд различного возраста. OB-звезды этому эффекту не подвержены. Однако они подвержены влиянию спиральной волны плотности.

Искомые параметры U_{\odot} , V_{\odot} , W_{\odot} и Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 находим в результате решения системы условных уравнений вида (5)–(7) методом наименьших квадратов. Обычно такое решение ищется с применением весов.

Некоторые авторы параметры кривой вращения Галактики находят через разложение в ряд линейной скорости вращения Галактики. На рис. 6 даны круговые скорости вращения V_{circ} мазеров с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами из работы Reid и др., 2019. Кривая вращения построена согласно методу, предложенному в работе Persic, Salucci и Stel,

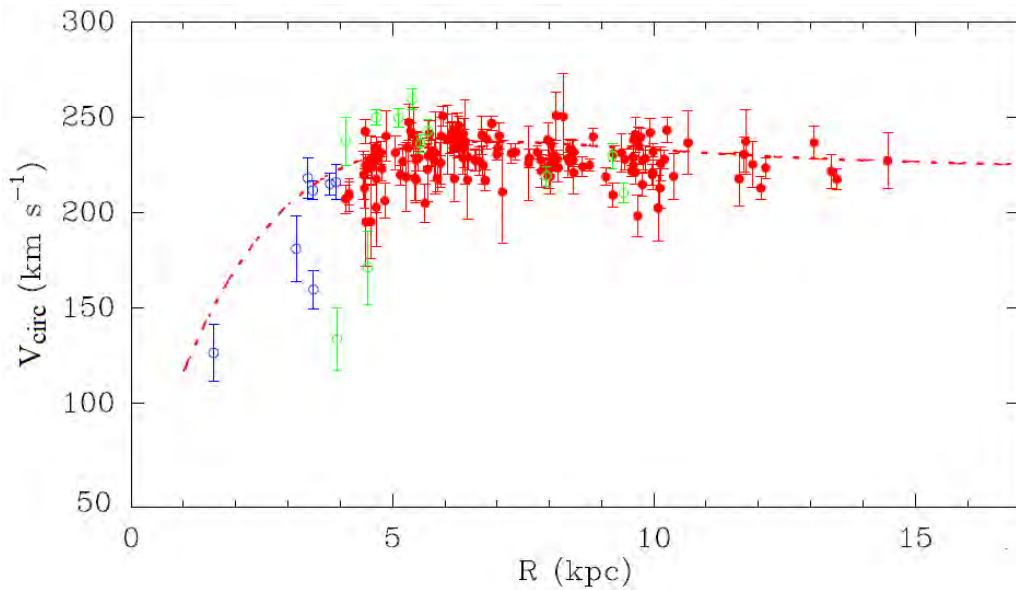


Рис. 6: Круговые скорости вращения V_{circ} мазеров в областях активного звездообразования в зависимости от расстояния R . Рисунок взят из работы Reid и др., 2019.

1996. Для ее построения было использовано около 200 мазеров. Линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 была найдена равной

$$V_0 = 236 \pm 7 \text{ км/с.} \quad (8)$$

Отметим, что мазеры с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами в настоящее время являются наиболее надежными источниками данных для изучения структуры и кинематики Галактики. В обзоре Bobylev, Vajkova и Mishurov, 2022 собраны полезные сведения о применении таких мазеров для изучения Галактики.

3.2 Эллипсоид остаточных скоростей

Шесть моментов скоростей второго порядка a, b, c, f, e, d являются коэффициентами уравнения поверхности (Ogorodnikov, 1965):

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2ezx + 2dxy = 1, \quad (9)$$

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для определения a, b, c, f, e, d используем три следующих уравнения:

$$V_l^2 = a \sin^2 l + b \cos^2 l \sin^2 b - 2d \sin l \cos l, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_b^2 &= a \sin^2 b \cos^2 l + b \sin^2 b \sin^2 l + c \cos^2 b \\ &- 2f \cos b \sin b \sin l - 2e \cos b \sin b \cos l + 2d \sin l \cos l \sin^2 b, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_l V_b &= a \sin l \cos l \sin b + b \sin l \cos l \sin b \\ &+ f \cos l \cos b - e \sin l \cos b + d(\sin^2 l \sin b - \cos^2 l \sin b), \end{aligned} \quad (13)$$

которые решаются методом наименьших квадратов относительно шести неизвестных a, b, c, f, e, d . Затем находятся собственные значения тензора (10) $\lambda_{1,2,3}$ из решения векового уравнения

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

Собственные значения данного уравнения равны обратным значениям квадратов полуосей эллипсоида моментов скоростей и, в то же время, квадратам полуосей эллипсоида остаточных скоростей:

$$\lambda_1 = \sigma_1^2, \lambda_2 = \sigma_2^2, \lambda_3 = \sigma_3^2, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3. \quad (15)$$

Направления главных осей тензора (14) $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ находятся из соотношений

$$\operatorname{tg} L_{1,2,3} = \frac{ef - (c - \lambda)d}{(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2}, \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} B_{1,2,3} = \frac{(b - \lambda)e - df}{f^2 - (b - \lambda)(c - \lambda)} \cos L_{1,2,3}. \quad (17)$$

3.3 Скорости возмущения f_R и f_θ

Влияние спиральной волны плотности в радиальных V_R и остаточных тангенциальных скоростях ΔV_{circ} является периодическим с амплитудой около 10–15 км/с. Согласно линейной теории волн плотности (Lin и Shu, 1964) скорости возмущений удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} V_R &= -f_R \cos \chi, \\ \Delta V_{circ} &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\chi = m[\cot(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot \quad (19)$$

фаза спиральной волны (m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали), χ_\odot — радиальная фаза Солнца в спиральной волне); f_R и f_θ — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей, которые считаются положительными. Длина волны λ (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$2\pi R_0/\lambda = m \cot(|i|). \quad (20)$$

Для оценки скоростей возмущения f_R и f_θ используем подход, основанный на применении модифицированного спектрального анализа Vajkova и Vobylev, 2012. Здесь остаточные скорости ΔV_{circ} получены из скоростей V_{circ} путем вычитания кривой вращения, с предварительно найденными параметрами.

Отметим, что в используемой модели угол закрутки i предполагается одинаковым для всех рукавов, постоянным во всей пространственной области, а вся картина спирального узора симметрична.

Пусть имеется ряд измеренных скоростей V_{R_n} (это могут быть как радиальные V_R , так и тангенциальные ΔV_{circ} скорости, $n = 1, \dots, N$, где N — число объектов. Задачей спектрального анализа является выделение периодичности из ряда данных в соответствии с принятой моделью, описывающей спиральную волну плотности с параметрами f , λ (или i) и χ_\odot .

В результате учета логарифмического характера спиральной волны, а также позиционных углов объектов θ_n , наш спектральный (периодограммный) анализ рядов возмущений скоростей сводится к вычислению квадрата амплитуды (спектра мощности) стандартного преобразования Фурье:

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (21)$$

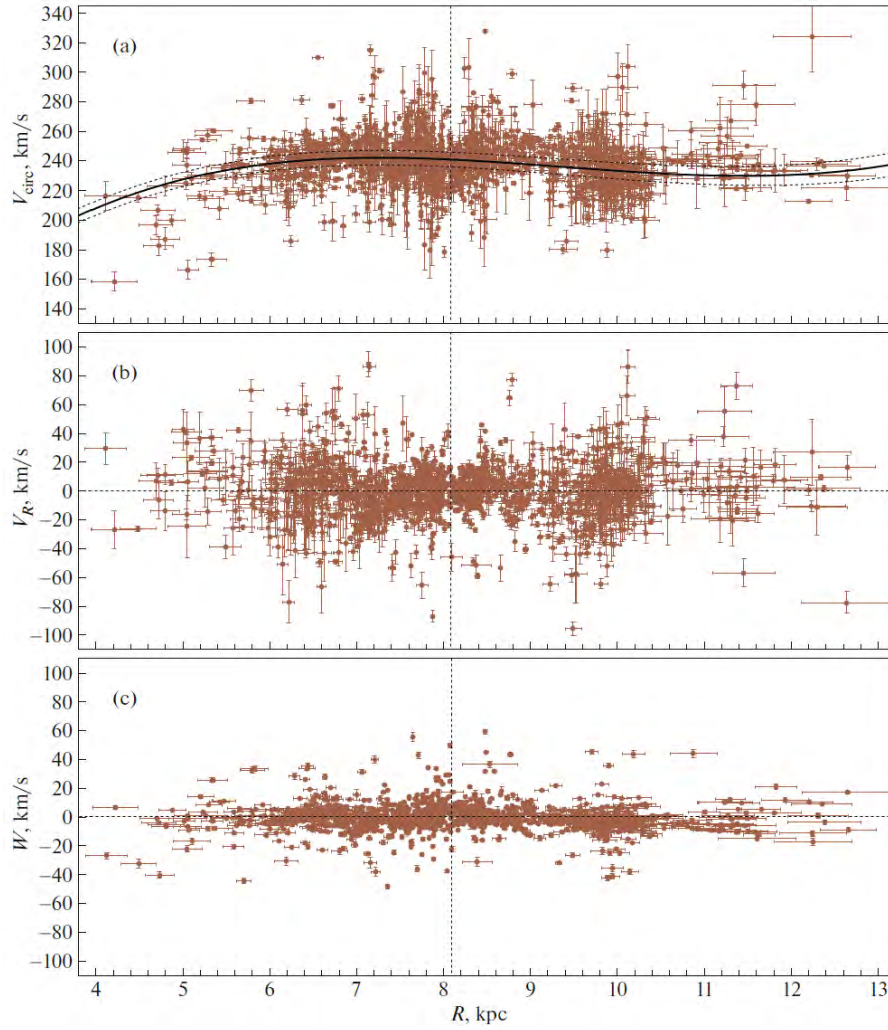


Рис. 7: (а) круговые скорости вращения V_{circ} , (б) радиальные V_R и (с) вертикальные W скорости ОВ2-звезд в зависимости от расстояния R , вертикальной линией отмечено положение Солнца, дана кривая вращения Галактики с границами доверительной области, соответствующими уровню 1σ . Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022a.

где \bar{V}_{λ_k} — k -я гармоника преобразования Фурье с длиной волны $\lambda_k = D/k$, D — период анализируемого ряда,

$$\begin{aligned} R'_n &= R_0 \ln(R_n/R_0), \\ V'_n(R'_n) &= V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n). \end{aligned} \quad (22)$$

Пиковому значению спектра мощности S_{peak} соответствует искомая длина волны λ . Амплитуду и фазу возмущений находим в результате подгонки гармоники с найденной длиной волны к измеренным данным. Для оценки амплитуд возмущений может быть полезным соотношение $f_R(f\theta) = 2 \times \sqrt{S_{peak}}$.

4 Кинематические свойства ОВ-звезд

4.1 Вращение Галактики

В работах Bobylev и Vajkova, 2022a и Bobylev и Vajkova, 2022b изучены кинематические свойства более 9 500 ОВ-звезд из каталога Xu, L. G. Hou и др., 2021 с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia EDR3. Распределение на галактической плоскости наиболее молодых

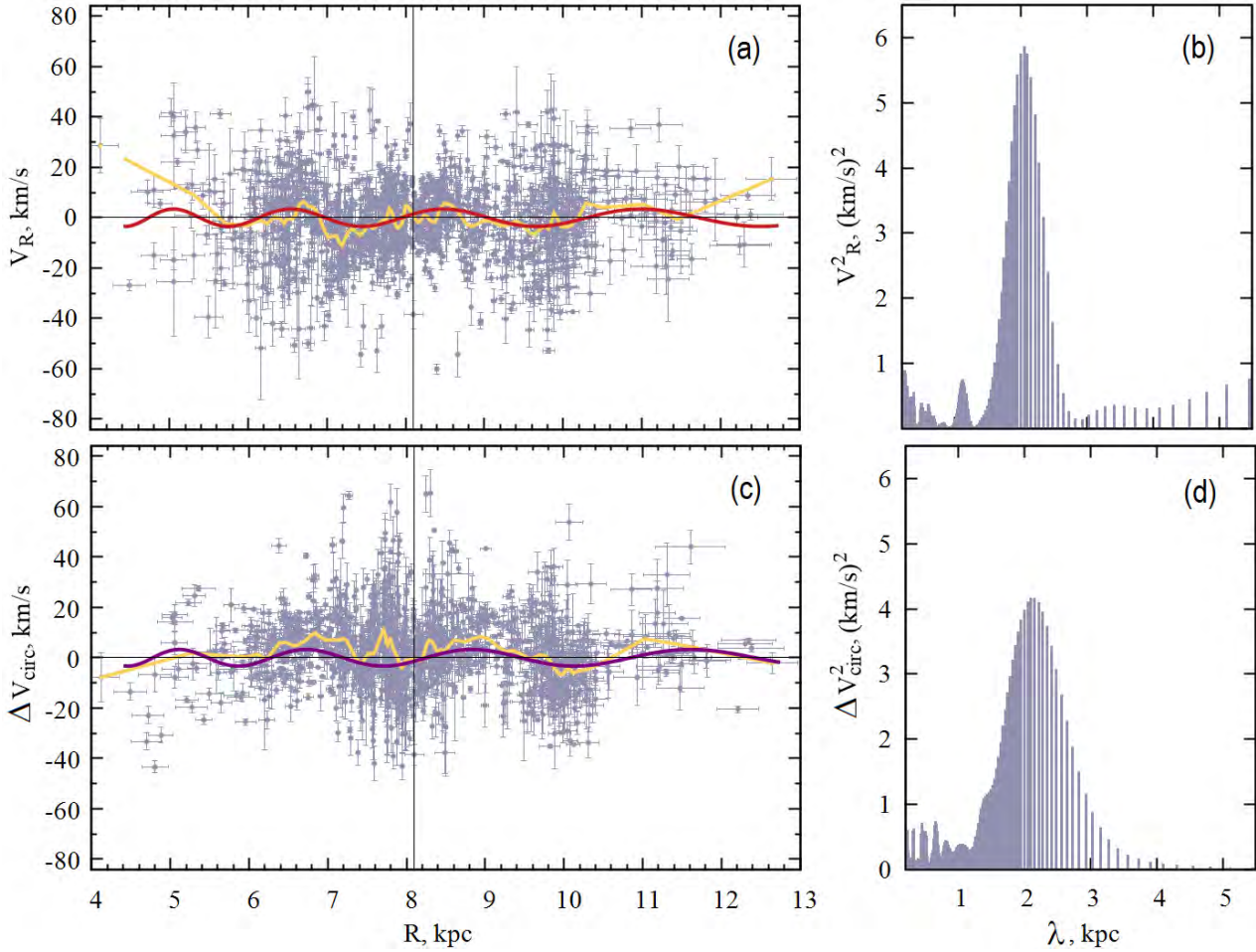


Рис. 8: (а) радиальные скорости V_R OB2-звезд в зависимости от R и (b) их спектр мощности, (с) остаточные скорости вращения ΔV_{circ} OB2-звезд в зависимости от R и (d) их спектр мощности. Желтыми линиями на панелях (а) и (с) даны усредненные скорости (рисует GNU PLOT), темными линиями даны результаты спектрального анализа.

звезд этой выборки дано на рис. 2. На рис. 7 даны круговые скорости вращения V_{circ} , радиальные V_R и вертикальные W скорости OB2-звезд. Для построения рис. 7 были использованы 1 726 звезд с измеренными лучевыми скоростями.

По собственным движениям 9 750 OB2-звезд в результате решения системы из двух условных уравнений вида (6)–(7) найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_{\odot} = (7.21, 7.46, 8.52) \pm (0.13, 0.20, 0.10)$ км/с и

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 29.461 \pm 0.062 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.969 \pm 0.018 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.665 \pm 0.011 \text{ км/с/кпк}^3.\end{aligned}\quad (23)$$

В этом решении линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 составляет

$$V_0 = 238.6 \pm 3.0 \text{ км/с}, \quad (24)$$

а значения постоянных Оорта следующие, $A = 16.07 \pm 0.21$ км/с/кпк и $B = -13.39 \pm 0.22$ км/кпк. По 1 726 OB-звездам с лучевыми скоростями и собственными движениями вычислены скорости V_{circ} и V_R , построен график кривой вращения с параметрами, найденными только по собственным движениям (рис. 7 а).

По собственным движениям 9 720 OB2-звезд в результате решения системы условных уравнений вида (11)–(13) найдены дисперсии остаточных скоростей вполне характерные для молодой

подсистемы галактического диска

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (11.79, 9.66, 7.21) \pm (0.06, 0.05, 0.04) \text{ км/с}, \quad (25)$$

и показано, что первая ось эллипсоида остаточных скоростей слегка отклонена от направления на центр Галактики, $L_1 = 12.4 \pm 0.1^\circ$, а третья ось направлена практически точно на северный полюс Галактики, $B_3 = 87.7 \pm 0.1^\circ$. Отклонение первой оси эллипсоида остаточных скоростей от направления на центр Галактики говорит, скорее всего, о влиянии спиральной структуры.

В работе Melnik и Dambis, 2020 проведен кинематический анализ 47 ОВ-ассоциаций. В частности, изучен вопрос о том, как выбор шкалы расстояний влияет на параметры кривой вращения Галактики. В итоге эти авторы заключили, что параметры вращения Галактики, рассчитанные с использованием фотометрических и тригонометрических расстояний (из каталога Gaia DR2), согласуются в пределах погрешностей. В частности, ими найдены следующие значения угловой скорости Ω_0 с использованием фотометрических и тригонометрических расстояний 30.0 ± 0.7 и 29.6 ± 0.6 км с/кпк, соответственно. Эти значения находятся также в согласии с найденными нами в решении (23).

Одна из лучших современных кривых вращения Галактики построена в работе Ablimit и др., 2020. Для этого были использованы данные о 1078 цефеидах с измеренными лучевыми скоростями из работ Skowron и др., 2019 и Mroz и др., 2019. В итоге были уточнены параметры гравитационного потенциала Галактики и получена новая вириальная оценка массы Галактики. Значение линейной скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 и ее производная оказались равными

$$\begin{aligned} V_0 &= 232.5 \pm 0.83 \text{ км/с}, \\ \partial V / \partial R &= -1.33 \pm 0.10 \text{ км/с/кпк} \end{aligned} \quad (26)$$

для принятого значения $R_0 = 8.122 \pm 0.031$ кпк.

Сопоставление результатов (8), (24) и (26) показывает, что полученные по ОВ-звездам параметры вращения Галактики находятся в хорошем согласии с оценками, найденными из анализа других современных данных.

4.2 Возмущения от спиральной волны плотности

В работе Bobylev и Vajkova, 2022b по выборке ОВ2-звезд с измеренными лучевыми скоростями был выполнен спектральный анализ остаточных скоростей. Причем такой анализ был проведен независимо для радиальных и для остаточных тангенциальных скоростей. Получены следующие оценки:

$$f_R = 4.8 \pm 0.7 \text{ км/с}, \quad f_\theta = 4.1 \pm 0.9 \text{ км/с}, \quad (27)$$

$\lambda_R = 2.1 \pm 0.2$ кпк ($i_R = -9.4 \pm 0.9^\circ$ для $m = 4$) и $\lambda_\theta = 2.2 \pm 0.4$ кпк ($i_\theta = -9.8 \pm 1.8^\circ$ для $m = 4$), $(\chi_\odot)_R = -116 \pm 12^\circ$ и $(\chi_\odot)_\theta = -156 \pm 14^\circ$. Был сделан вывод о том, что более надежно эти параметры определяются по радиальным скоростям звезд. Результаты отражены на рис. 8, который построен специально для настоящей работы с отбрасыванием убегающих ОВ2-звезд, т.е. при ограничении $\sqrt{U^2 + V^2 + W^2} < 60$ км/с на их остаточные скорости. Как можно видеть из рис. 7, периодичность в скоростях W звезд этой выборки выражена слабо, поэтому не удалось по ним надежно определить параметры спиральной волны.

Уравнение вида (6) было решено с включением в качестве дополнительных неизвестных скоростей возмущений f_R и f_θ (метод Creze и Mennessier, 1973). В итоге мы заключили, что наиболее вероятное значение фазы Солнца χ_\odot для рассматриваемой выборки ОВ2-звезд лежит в интервале $[-120^\circ, -130^\circ]$. Значение амплитуды радиальных возмущений f_R лежит в интервале $[4.4, 5.9]$ км/с, она определяется этим методом с ошибками ± 0.6 км/с.

4.3 Связь ОВ-звезд с искривлением диска

В последнее время эффект искривления галактического диска (варпа) активно изучается с использованием данных из массовых астрометрических и фотометрических каталогов. Например,

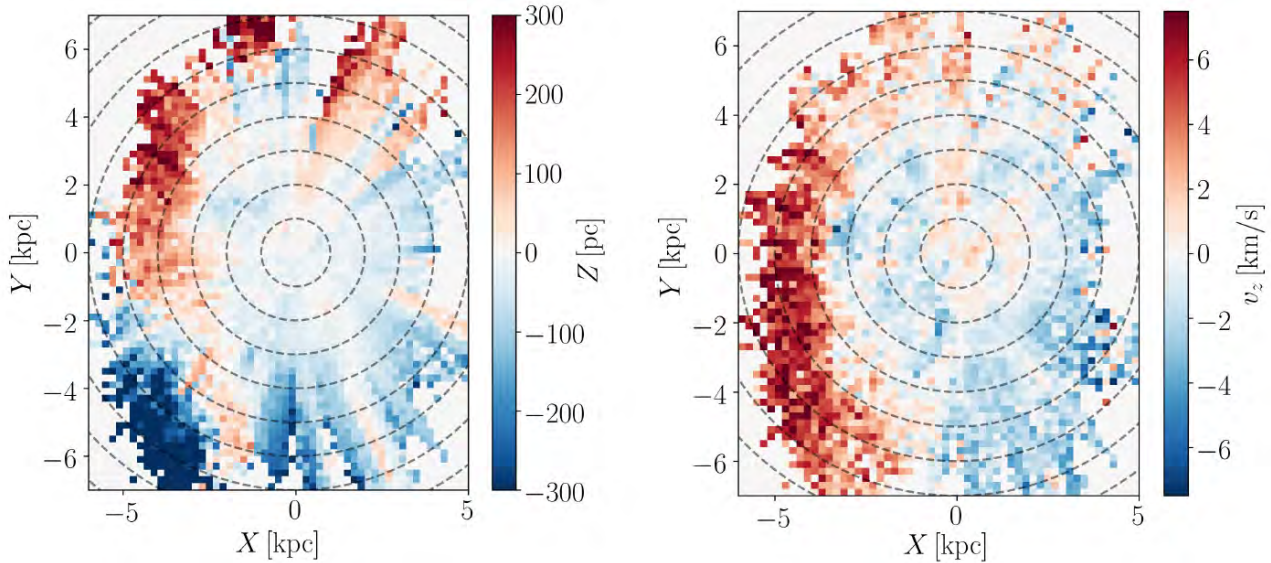


Рис. 9: Слева — средняя высота горячих звезд высокой светимости над галактической плоскостью XU , где плоскость XU разделена на ячейки шириной 200 пк и показаны только те, которые содержат более десяти звезд, пунктирные круги имеют радиусы от 1 до 9 кпк с шагом в 1 кпк. Справа — распределение средней вертикальной скорости v_z в проекции на галактическую плоскость XU , ячейки и круги те же. Искривление диска в координатах и скоростях видно при $X < -4$ кпк (в направлении галактического антицентра). Рисунки взяты из работы Zari и др., 2021.

в работах Poggio, Drimmel, Lattanzi и др., 2018; Poggio, Drimmel, Andrae и др., 2020 на основе анализа большой выборки звезд с данными из каталогов Gaia DR2 и 2MASS было сделано заключение о динамической эволюции варпа.

В этих работах для анализа было отобрано огромное количество звезд — 599 494 звезд из верхней части главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела и 12 616 068 гигантов. Эти авторы говорят о прецессии варпа, т.е. о вращении варпа вокруг оси, расположенной под значительным наклоном к галактической оси Z . В итоге, в работе Poggio, Drimmel, Andrae и др., 2020 была получена оценка прецессии варпа, т.е. оценка угловой скорости вращения варпа с найденным значением 10.86 ± 0.03 (стат.) ± 3.20 (сист.) км/с/кпк.

Т.о. приблизительно в направлении галактического антицентра, начиная с расстояний около 4 кпк от Солнца, виден значительный градиент вертикальных скоростей W (иногда в цитируемой литературе встречается обозначение v_z).

Как было отмечено во введении, горячие звезды высокой светимости демонстрируют эффект варпа (Zari et al. 2021). На рис. 9 для этих звезд дано распределение средней высоты над галактической плоскостью и распределение средних вертикальных скоростей. На рисунке хорошо видно влияние варпа как в координатах, так и в вертикальных скоростях звезд. По данным правого рис. 9 можем грубо оценить градиент $|\partial W/\partial X|$: 6 – 8 км/с/кпк. Это значение сопоставимо с величиной прецессии варпа, найденной в работе там же.

Отметим, что мы не ставим задачу воспроизведения эффекта прецессии варпа. Мы лишь независимо определяем значение градиента $\partial W/\partial X$, и говорим о косвенном проявлении динамики варпа в кинематике ОВ-звезд.

5 Убегающие звезды в Орионе

В рассеянном звездном скоплении Col 69 центральной звездой является двойная система λ Ori (Sp: O8III+ B0.5V). Согласно ряду авторов (Hoogerwerf, de Bruijne и de Zeeuw, 2001, Bobylev

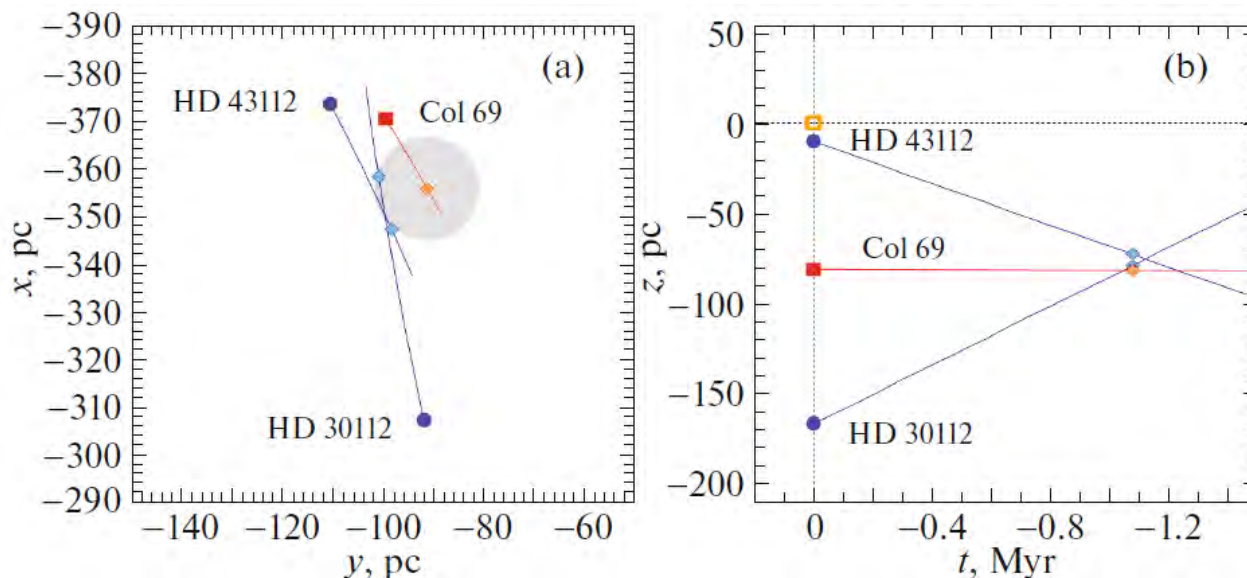


Рис. 10: Траектории звезд HD 30112, HD 43112 и скопления Col 69 в проекции на галактическую плоскость xy , построенные назад в прошлое (а), координаты z в зависимости от времени интегрирования t (б), современные положения звезд обозначены синими кружками, красным цветом дано положение и траектория центра скопления Col 69, ромбики отмечают положение объектов на момент наиболее их тесного сближения, серым кругом обозначена окрестность радиусом 10 пк с центром в скоплении Col 69 на момент минимального сближения со звездами, желтым кольцом отмечено положение Солнца. Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2021b.

и Vajkova, 2009, Bhat, Irrgang и Heber, 2022), две убегающие звезды спектрального класса В: HD 30112 (Sp: B3V) и HD 43112 (Sp: B1V) могли в прошлом быть членами кратной системы в этом скоплении, но покинули его в результате взрыва сверхновой и распада кратной системы. В работе Bobylev и Vajkova, 2021b было промоделировано движение в прошлом ряда известных убегающих звезд в области туманности Ориона с использованием кинематических данных из каталога Gaia EDR3. В частности, были прослежены траектории движения центра скопления Col 69, а также звезд HD 30112 и HD 43112.

На рис. 10 даны траектории убегающих звезд HD 30112, HD 43112 и центра скопления Col 69, построенные назад в прошлое. Можем видеть, что в момент времени $t = -1.06$ млн лет взаимное расстояние между звездами HD 30112 и HD 43112 не превышало 10 пк, и обе они находились в окрестности центра скопления Col 69 радиусом 10 пк. Проведенное нами статистическое моделирование сближений с учетом ошибок в измерительных данных показало, что сближения между рассматриваемыми объектами могли быть и более тесными.

Рассмотрев тесные тройные сближения, мы заключили, что гипотеза о том, что около 1.1 млн лет назад звезды HD 30112 и HD 43112 вылетели из родительского скопления Col 69 подтверждается. Ошибки собственных движений и параллаксов исследуемых звезд из каталога Gaia EDR3 оказались на порядок меньшими по сравнению с ошибками этих звезд, которые использовались прежде. А найденные вероятности рассмотренных гипотез оказалась в два раза большими прежних оценок.

На рис. 11 даны результаты статистического моделирования пролета HIP 29678 (HD 43112) относительно скопления Col 69 в прошлом из работы Bhat, Irrgang и Heber, 2022. Эти результаты моделирования находятся в хорошем согласии с полученными в работе Bobylev и Vajkova, 2021b.

Заключение

Перечислим наиболее важные результаты, полученные по различным выборкам OB-звезд.

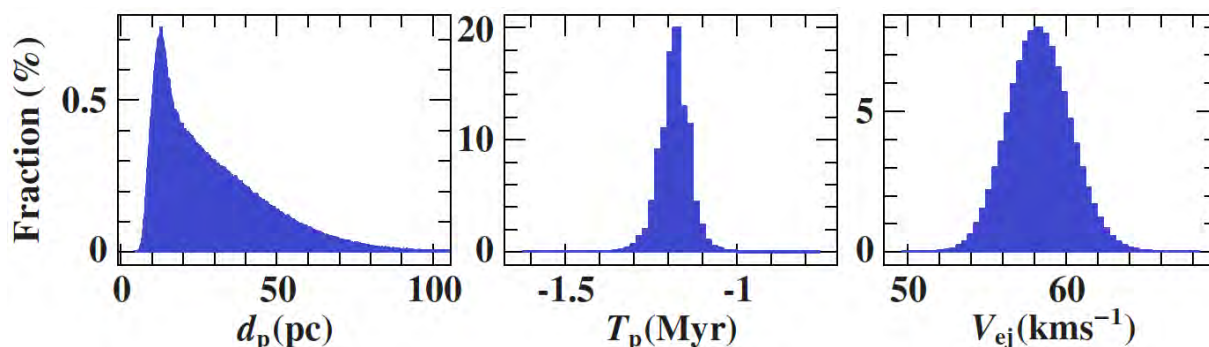


Рис. 11: Гистограммы моделирования методом Монте-Карло траекторий движения в прошлом звезды HD 43112 и скопления Col 69. Крайняя левая панель показывает долю расстояний от ближайших сближений между звездой и скоплением. Средняя панель представляет собой гистограмму времен ближайших сближений звезд, а крайняя правая панель отображает относительную скорость выброса звезды HD 43112 из скопления Col 69. Рисунок взят из работы Bhat, Irrgang и Heber, 2022.

1). Пространственное распределение ОВ-звезд в Галактике показывает тесную связь со спиральной структурой, а также с крупномасштабным искривлением галактического диска. Наблюдается также тесная кинематическая связь ОВ-звезд с двумя этими эффектами.

2). Показано, что ОВ-звезды с современными данными могут служить для уточнения геометрических характеристик Местного рукава, а также двух ближайших к Солнцу отрезков спиральных рукавов, принадлежащих структуре гранд-дизайн — Персея и Киля-Стрельца. С выходом же версии каталога Gaia, близкой к финальной (Gaia DR4), запланированной на 2025 год ¹, область для анализа будет существенно расширена.

3). Показано, что полученные по ОВ-звездам параметры вращения Галактики и амплитуды скоростей возмущения, вызванных влиянием галактической спиральной волны плотности, находятся в хорошем согласии с оценками, найденными из анализа других современных данных, например, по мазерам или по классическим цефеидам.

4). Рассказано о подтверждении гипотезы распада кратной системы с участием В-звезд HD 30112 и HD 43112, которые вылетели около 1 млн лет назад из родительского скопления Col 69.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению рукописи. Авторы выражают благодарность Антону Смирнову за помощь в подготовке рукописи статьи.

¹<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/release>

Список литературы

- Creze, M. и M. O. Mennessier (1973). *An Attempt to Interpret the Mean Properties of the Velocity Field of Young Stars in Terms of Lin's Theory of Spiral Waves*. *A&A* 27, с. 281.
- Melnik, A. M. и A. K. Dambis (2020). *Distance scale for high-luminosity stars in OB associations and in field with Gaia DR2. Spurious systematic motions*. *Ap&SS* 365.7, с. 112.
- Pantaleoni Gonzalez, M., J. Maíz Apellaniz, R. H. Barba и B. C. Reed (2021). *The Alma catalogue of OB stars - II. A cross-match with Gaia DR2 and an updated map of the solar neighbourhood*. *MNRAS* 504.2, с. 2968–2982.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2017). *Kinematics of the galaxy from OB stars with proper motions from the Gaia DR1 catalogue*. *Astronomy Letters* 43.3, с. 159–166.
- (2018). *Kinematics of the Galaxy from OB Stars with Data from the Gaia DR2 Catalogue*. *Astronomy Letters* 44.11, с. 676–687.
- (2019). *Galactic Rotation Based on OB Stars from the Gaia DR2 Catalogue*. *Astronomy Letters* 45.6, с. 331–340.
- (2022a). *Galaxy Rotation Parameters from OB2 Stars with Proper Motions and Parallaxes from the Gaia EDR3 Catalog*. *Astronomy Reports* 66.4, с. 269–277.
- (2022b). *Estimation of Galactic Spiral Density Wave Parameters Based on the Velocities of OB2 Stars from the Gaia EDR3 Catalogue*. *Astronomy Letters* 48.3, с. 169–177.
- Wright, G. (2022). *Pulsar emission patterns seen as evidence for magnetospheric interactions*. *MNRAS* 514.3, с. 4046–4060.
- Byl, J. и M. W. Ovdenden (1978). *On the kinematics of O and B stars*. *ApJ* 225, с. 496–513.
- Mel'Nik, A. M., A. K. Dambis и A. S. Rastorguev (2001). *Periodic Pattern in the Residual-Velocity Field of OB Associations*. *Astronomy Letters* 27.8, с. 521–533.
- Fernandez, D., F. Figueras и J. Torra (2001). *Kinematics of young stars. II. Galactic spiral structure*. *A&A* 372, с. 833–850.
- Zabolotskikh, M. V., A. S. Rastorguev и A. K. Dambis (2002). *Kinematic Parameters of Young Subsystems and the Galactic Rotation Curve*. *Astronomy Letters* 28.7, с. 454–464.
- Russeil, D. (2003). *Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy*. *A&A* 397, с. 133–146.
- Bouy, H. и J. Alves (2015). *Cosmography of OB stars in the solar neighbourhood*. *A&A* 584, A26.
- Xu, Y., L.-G. Hou и Y.-W. Wu (2018). *The spiral structure of the Milky Way*. *Research in Astronomy and Astrophysics* 18.12, с. 146.
- Xu, Y., L. G. Hou, S. B. Bian, C. J. Hao, D. J. Liu, J. J. Li и Y. J. Li (2021). *Local spiral structure based on the Gaia EDR3 parallaxes*. *A&A* 645, с. L8.
- Reid, M. J., K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, Y. Wu, K. Immer, B. Zhang, A. Sanna, L. Moscadelli, K. L. J. Rygl, A. Bartkiewicz, B. Hu, L. H. Quiroga-Nuñez и H. J. van Langevelde (2019). *Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way*. *ApJ* 885.2, с. 131.
- Zari, E., H. -. Rix, N. Frankel, M. Xiang, E. Poggio, R. Drimmel и A. Tkachenko (2021). *Mapping luminous hot stars in the Galaxy*. *A&A* 650, A112.
- Esa, I. (1997). *VizieR Online Data Catalog: The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997)*. *VizieR Online Data Catalog*, с. I/239.
- Gaia Collaboration и T. Prusti (2016). *The Gaia mission*. *A&A* 595, A1.
- de Zeeuw, P. T., R. Hoogerwerf, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown и A. Blaauw (1999). *A HIPPARCOS Census of the Nearby OB Associations*. *AJ* 117.1, с. 354–399.
- Torra, J., D. Fernandez и F. Figueras (2000). *Kinematics of young stars. I. Local irregularities*. *A&A* 359, с. 82–102.
- Megier, A., A. Strobel, A. Bondar, F. A. Musaev, I. Han, J. Krełowski и G. A. Galazutdinov (2005). *Interstellar Ca II Line Intensities and the Distances of the OB stars*. *ApJ* 634.1, с. 451–458.
- Megier, A., A. Strobel, G. A. Galazutdinov и J. Krełowski (2009). *The interstellar Ca II distance scale*. *A&A* 507.2, с. 833–840.

- Bobylev, V. V. и А. Т. Bajkova (2013). *Galactic kinematics from a sample of young massive stars*. *Astronomy Letters* 39.8, с. 532–549.
- Blaauw, A. и W. W. Morgan (1954). *The Space Motions of AE Aurigae and μ Columbae with Respect to the Orion Nebula*. *ApJ* 119, с. 625.
- Hoogerwerf, R., J. H. J. de Bruijne и P. T. de Zeeuw (2001). *On the origin of the O and B-type stars with high velocities. II. Runaway stars and pulsars ejected from the nearby young stellar groups*. *A&A* 365, с. 49–77.
- Tetzlaff, N., R. Neuhauser и M. M. Hohle (2011). *A catalogue of young runaway Hipparcos stars within 3 kpc from the Sun*. *MNRAS* 410.1, с. 190–200.
- Brown, W. R., M. J. Geller, S. J. Kenyon и M. J. Kurtz (2006). *A Successful Targeted Search for Hypervelocity Stars*. *ApJ* 640.1, с. L35–L38.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2021). *Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties*. *A&A* 649, A1.
- (2018). *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*. *A&A* 616, A1.
- Gaia Collaboration и A. Vallenari (2022). *Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties*. arXiv e-prints, arXiv:2208.00211.
- Skiff, B. A. (2014). *VizieR Online Data Catalog: Catalogue of Stellar Spectral Classifications (Skiff, 2009-2014)*. *VizieR Online Data Catalog*, B/mk.
- Skrutskie, M. F., R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk и S. Wheelock (2006). *The Two Micron All Sky Survey (2MASS)*. *AJ* 131.2, с. 1163–1183.
- Bobylev, V. V. и А. Т. Bajkova (2021a). *A New Estimate of the Best Value for the Solar Galactocentric Distance*. *Astronomy Reports* 65.6, с. 498–506.
- Chen, B. .-, Y. Huang, L. .- Hou, H. Tian, G. .- Li, H. .- Yuan, H. .- Wang, C. Wang, Z. .- Tian и X. .- Liu (2019). *The Galactic spiral structure as revealed by O- and early B-type stars*. *MNRAS* 487.1, с. 1400–1409.
- Xu, Y., S. B. Bian, M. J. Reid, J. J. Li, B. Zhang, Q. Z. Yan, T. M. Dame, K. M. Menten, Z. H. He, S. L. Liao и Z. H. Tang (2018). *A comparison of the local spiral structure from Gaia DR2 and VLBI maser parallaxes*. *A&A* 616, с. L15.
- Bobylev, V. V. и А. Т. Bajkova (2014). *The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters*. *MNRAS* 437.2, с. 1549–1553.
- Dambis, A. K., L. N. Berdnikov, Y. N. Efremov, A. Y. Kniazev, A. S. Rastorguev, E. V. Glushkova, V. V. Kravtsov, D. G. Turner, D. J. Majaess и R. Sefako (2015). *Classical Cepheids and the spiral structure of the milky way*. *Astronomy Letters* 41.9, с. 489–500.
- Nikiforov, I. I. и А. V. Veselova (2018). *Geometric Aspects and Testing of the Galactic Center Distance Determination from Spiral Arm Segments*. *Astronomy Letters* 44.2, с. 81–102.
- Veselova, A. V. и I. Nikiforov (2020). *Segments of spiral arms of the Galaxy traced by classical Cepheids: effects of age heterogeneity*. *Research in Astronomy and Astrophysics* 20.12, с. 209.
- Drew, J. E., E. Gonzalez-Solares, R. Greimel, M. J. Irwin, A. Küpcü Yoldas, J. Lewis, G. Barentsen, J. Eislöffel, H. J. Farnhill, W. E. Martin, J. R. Walsh, N. A. Walton, M. Mohr-Smith, R. Raddi, S. E. Sale, N. J. Wright, P. Groot, M. J. Barlow, R. L. M. Corradi, J. J. Drake, J. Fabregat, D. J. Frew, B. T. Gänsicke, C. Knigge, A. Mampaso, R. A. H. Morris, T. Naylor, Q. A. Parker, S. Phillipps, C. Ruhland, D. Steeghs, Y. C. Unruh, J. S. Vink, R. Wesson и A. A. Zijlstra (2014). *The VST Photometric H α Survey of the Southern Galactic Plane and Bulge (VPHAS+)*. *MNRAS* 440.3, с. 2036–2058.
- Cordes, J. M. и M. A. McLaughlin (2003). *Searches for Fast Radio Transients*. *ApJ* 596.2, с. 1142–1154.
- Taylor, J. H. и J. M. Cordes (1993). *Pulsar Distances and the Galactic Distribution of Free Electrons*. *ApJ* 411, с. 674.

- Wainscoat, R. J., M. Cohen, K. Volk, H. J. Walker и D. E. Schwartz (1992). [A Model of the 8–25 Micron Point Source Infrared Sky](#). *ApJS* 83, с. 111.
- Persic, M., P. Salucci и F. Stel (1996). [The universal rotation curve of spiral galaxies — I. The dark matter connection](#). *MNRAS* 281.1, с. 27–47.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova и Y. N. Mishurov (2022). [Parameters of the Radcliffe Wave from Masers, Radio Stars, and T Tauri Stars](#). *Astronomy Letters* 48.8, с. 434–441.
- Ogorodnikov, K. F. (1965). [On the Problem of the Kinematics of the Metagalaxy](#). *Problems of Cosmogony* 1, с. 147.
- Lin, C. C. и F. H. Shu (1964). [On the Spiral Structure of Disk Galaxies](#). *ApJ* 140, с. 646.
- Bajkova, A. T. и V. V. Bobylev (2012). [Redetermination of galactic spiral density wave parameters based on spectral analysis of masers radial velocities](#). *Astronomy Letters* 38.9, с. 549–561.
- Ablimit, I., G. Zhao, C. Flynn и S. A. Bird (2020). [The Rotation Curve, Mass Distribution, and Dark Matter Content of the Milky Way from Classical Cepheids](#). *ApJ* 895.1, с. L12.
- Skowron, D. M., J. Skowron, P. Mroz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszynski, M. K. Szymanski, R. Poleski, S. Kozłowski, K. Ulaczyk, K. Rybicki и P. Iwanek (2019). [A three-dimensional map of the Milky Way using classical Cepheid variable stars](#). *Science* 365.6452, с. 478–482.
- Mroz, P., A. Udalski, D. M. Skowron, J. Skowron, I. Soszynski, P. Pietrukowicz, M. K. Szymanski, R. Poleski, S. Kozłowski и K. Ulaczyk (2019). [Rotation Curve of the Milky Way from Classical Cepheids](#). *ApJ* 870.1, с. L10.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2021b). [Analysis of Selected Runaway Stars in the Orion Nebula Based on Data from the Gaia EDR3 Catalogue](#). *Astronomy Letters* 47.4, с. 224–234.
- Bhat, A., A. Irrgang и U. Heber (2022). [The origin of early-type runaway stars from open clusters](#). *A&A* 663, A39.
- Poggio, E., R. Drimmel, M. G. Lattanzi, R. L. Smart, A. Spagna, R. Andrae, C. A. L. Bailer-Jones, M. Fouesneau, T. Antoja, C. Babusiaux, D. W. Evans, F. Figueras, D. Katz, C. Reyle, A. C. Robin, M. Romero-Gomez и G. M. Seabroke (2018). [The Galactic warp revealed by Gaia DR2 kinematics](#). *MNRAS* 481.1, с. L21–L25.
- Poggio, E., R. Drimmel, R. Andrae, C. A. L. Bailer-Jones, M. Fouesneau, M. G. Lattanzi, R. L. Smart и A. Spagna (2020). [Evidence of a dynamically evolving Galactic warp](#). *Nature Astronomy* 4, с. 590–596.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2009). [Open cluster ASCC21 as a probable birthplace of the neutron star Geminga](#). *Astronomy Letters* 35.6, с. 396–405.

The most interesting results of the study of the Galaxy by OB stars

V.V. Bobylev, A.T. Bajkova

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

A review of the main results of studying the structure and kinematics of the Galaxy obtained by various research teams using OB stars is given. The main attention is paid to the results of the authors of this work. The following questions are considered: a) the nature of the spatial distribution of OB stars in the Galaxy; b) the use of OB stars to refine the parameters of the spiral pattern of the Galaxy; c) refinement of the Galactic rotation parameters and perturbation velocities caused by the influence of the Galactic spiral density wave using OB stars; d) spatial and kinematic relationship of OB stars with galactic warp; e) analysis of the motion of some runaway OB stars.