



Изучение структуры и кинематики Галактики по рассеянным звездным скоплениям и ассоциациям в эпоху Gaia

В.В. Бобылев^{1*}, А.Т. Байкова¹,

¹ ГАО РАН

Аннотация

Данная статья является обзорной, написана на основе ранее опубликованных результатов. В ней рассмотрены основные кинематические и пространственные свойства рассеянных звездных скоплений (РЗС) Галактики. Описаны результаты определения параметров галактического вращения, которые получены с использованием самых современных кинематических данных о звездах. Найденных, в частности, по данным каталогов Gaia DR2 и Gaia EDR3. Отражены результаты анализа остаточных, освобожденных от влияния пекулярного движения Солнца и вращения Галактики, скоростей РЗС. Рассказано о проявлении галактической спиральной волны плотности в остаточных скоростях РЗС. Описаны результаты различных авторов, которые выяснили а) как дисперсии остаточных скоростей РЗС зависят от их возраста, б) каковы дисперсии скоростей ОВ-ассоциаций и их структурных составляющих, в) каковы дисперсии остаточных скоростей звезд внутри самих РЗС.

Введение

Для изучения структуры и кинематики Галактики на различных масштабах большой интерес представляют всевозможные группировки звезд. Речь идет о рассеянных звездных скоплениях (РЗС) и звездных ассоциациях. Известны как Т-ассоциации, состоящие из маломассивных звезд, так и ОВ-ассоциации, членами которых являются массивные звезды. В прочем, термин Т-ассоциация в настоящее время употребляется редко.

При кинематическом анализе важно иметь высокоточные оценки расстояний до объектов и их скоростей. РЗС содержат около 10^3 звезд, что позволяет получать средние значения различных характеристик скопления с более высокой точностью по сравнению с одиночными звездами. ОВ-ассоциации распределены в широкой области Галактики, поэтому важны для изучения крупномасштабной ее структуры. Т-ассоциации многочисленны в Поясе Гулда, тесно связаны с молекулярными облаками из которых они образовались, поэтому представляют несомненный интерес для изучения эволюции близких к Солнцу структур.

Звездным группировкам посвящено огромное количество научных публикаций. Например, РЗС и ОВ-ассоциации, наряду с водородными облаками, ОВ-звездами поля, мазерами, цефеидами, используются для оценки параметров кривой вращения Галактики (Glushkova и др., 1998; Zabolotskikh, A. S. Rastorguev и Dambis, 2002; Loktin и Beshenov, 2003; Piskunov и др., 2006; Bobylev, Bajkova и Lebedeva, 2007; Bobylev и Bajkova, 2016; Loktin и Popova, 2019; Бобылев и Байкова, 2022), для уточнения характеристик галактической спиральной волны плотности (Amaral и Lepine, 1997; Popova и Loktin, 2005; Loktin и Popova, 2007; Bobylev, Bajkova и Stepanishchev, 2008; Lepine, Dias и Mishurov, 2008; Junqueira и др., 2015; Camargo, Bonatto и Vica, 2015; Bobylev и Bajkova, 2019; Cantat-Gaudin, Anders и др., 2020), для решения других звездно-астрономических задач (Tarricq и др., 2021; Monteiro и др., 2021).

*e-mail:vbobylev@gaoran.ru

Постоянно возрастает количество открытых и изученных РЗС (Cantat-Gaudin, Anders и др., 2020; Dias, Lepine и Alessi, 2001; Hao, Xu, Hou и др., 2021; Dias, Assafin и др., 2006; Dias, Monteiro и др., 2021; Kharchenko, Piskunov, Röser и др., 2005; Kharchenko, Scholz и др., 2007; Kharchenko, Piskunov, Schilbach и др., 2013; Scholz и др., 2015; Cantat-Gaudin, Jordi, Vallenari и др., 2018). Из анализа данных Gaia DR2 обнаружено в Галактике более 2400 РЗС (Liu и Pang, 2019). Известны около сотни ОВ-ассоциаций в радиусе 3–5 кпк вокруг Солнца с вычисленными расстояниями до них, собственными движениями и лучевыми скоростями (Blaha и Humphreys, 1989; Mel'nik и Dambis, 2017). Наконец, по данным Gaia EDR3 определены средние значения параллаксов и собственных движений для 170 галактических шаровых скоплений (Vasiliev и Baumgardt, 2021). Правда, в настоящей работе шаровые скопления (ШС) нас интересуют мало.

Ожидаемое количество РЗС в Галактике составляет $\sim 93\,000$ согласно оценкам Piskunov и др., 2006. Ожидаемое количество ОВ-ассоциаций составляет ~ 5000 (Bobylev, Bajkova и Shirokova, 2016). Так как Т-ассоциации практически являются более мелкими группировками внутри ОВ-ассоциаций, то и ожидаемое их количество в Галактике можно считать приблизительно равным 15000–20000. Количество обнаруженных ШС в Галактике почти равно их ожидаемому значению ~ 200 .

Улучшается точность определения средних значений расстояний до РЗС, их собственных движений и лучевых скоростей. В настоящее время основным источником массовых кинематических данных о звездах, таких как тригонометрические параллаксы, собственные движения и лучевые скорости, являются каталоги, созданные в результате выполнения космического проекта Gaia (Gaia Collaboration и Brown, 2016). В версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Gaia Collaboration и 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 измерения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги в год (мсд/год), и они сильно возрастают у более слабых звезд. 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 Brown, 2018). Недавно опубликована версия каталога Gaia DR3 (Gaia Collaboration и Vallenari, 2022), где существенно улучшены лучевые скорости звезд, а значения параллаксов и собственных движения звезд просто скопированы из Gaia EDR3.

В настоящей работе дан обзор наиболее интересных с нашей точки зрения результатов изучения кинематики Галактики, полученных различными научными коллективами с использованием рассеянных звездных скоплений и ассоциаций. Отмечен ряд кинематических свойств самих РЗС. Акцент сделан на молодых объектах.

1 Каталоги РЗС

Предполагается, что РЗС состоят из звезд, одновременно образовавшихся в родительском газово-пылевом облаке. Поэтому звезды конкретного РЗС имеют ряд общих характеристик. В частности, они находятся на одинаковом расстоянии от Солнца, обладают общим пространственным движением, возрастом, химсоставом, значением межзвездного поглощения, и др. Долгое время (до 2–3 млрд лет) все члены РЗС могут оставаться гравитационно связанными между собой. На этих свойствах основаны методы выделения РЗС из общего звездного фона.

В настоящее время каталоги РЗС, содержащие их кинематические характеристики, быстро обновляются. Например, хорошо известны каталоги Dias, Lepine и Alessi, 2001; Dias, Assafin и др., 2006; Dias, Monteiro и др., 2021. В последнем каталоге из этой серии представлены 1743 РЗС, фундаментальные параметры которых определены на основе данных Gaia DR2. Сюда входят оценки среднего расстояния, возраста, компонент собственного движения. Средние значения лучевой скорости вычислены для 831 скопления.

В каталоге Cantat-Gaudin, Anders и др., 2020, в последнем из серии этих авторов, содержатся 2017 РЗС. Охваченными оказались 234 128 звезд–членов этих скоплений. Значения средних

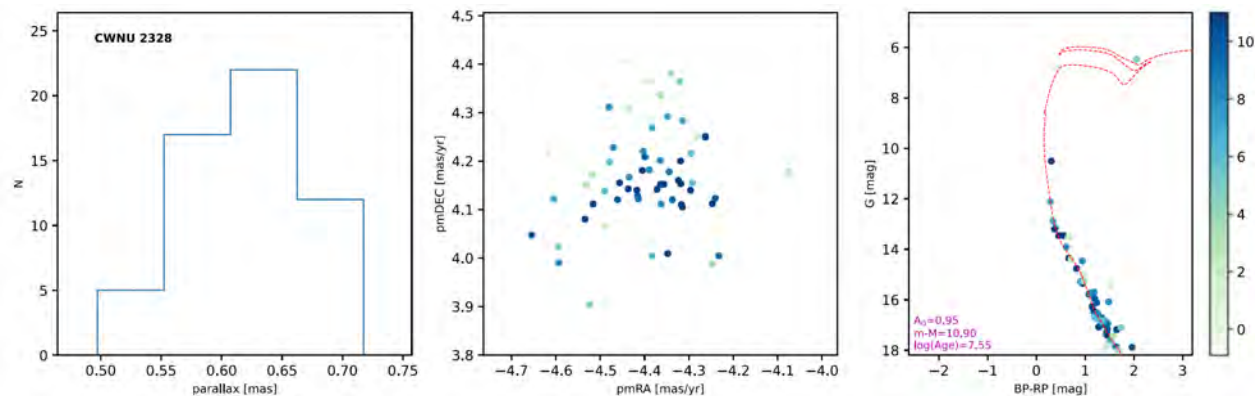


Рис. 1: Пример выделения РЗС по данным каталога Gaia EDR3, кодировка цвета кружка соответствует частоте, с которой звезда выделяется программой отбора членов (чем темнее кружок, тем надежнее результат выделения). Это часть рисунка, взятая из работы He и др., 2023.

параметров РЗС были определены по данным Gaia DR2. Для оценки поглощения, модуля расстояния и возраста скопления была использована искусственная нейронная сеть. По мнению этих авторов, надежные результаты получены для 1867 РЗС.

В каталоге Tarricq и др., 2021 даны средние значения лучевой скорости для 1382 РЗС из списка Cantat-Gaudin, Anders и др., 2020. В настоящее время это один из самых больших каталогов лучевых скоростей РЗС. Лучевые скорости звезд были взяты из таких каталогов как Gaia DR2, APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, Eisenstein и др., 2011), RAVE (RAial Velocity Experiment, Steinmetz и др., 2006), GALAH (GALactic Archaeology with HERMES spectroscopic survey, Buder и др., 2021) и ряд более мелких. Средневзвешенные значения лучевых скоростей 38% РЗС эти авторы считают высоконадежными, так как они вычислены с использованием более чем трех звезд, ошибки таких средних составляют менее 3 км/с.

В каталоге Hao, Xu, Hou и др., 2021 даны средние собственные движения и средние параллаксы РЗС, вычисленные по данным каталога Gaia EDR3. Оценки возраста собраны этими авторами из различных источников. В каталоге содержатся данные о 3794 РЗС. В работе Hao, Xu, Z. Y. Wu и др., 2022 описаны еще 704 ранее не известных РЗС, найденных по данным каталога Gaia EDR3. Т.о., каталоги этих авторов образуют одну из наиболее обширных кинематических баз о рассеянных звездных скоплениях Галактики.

На рис. 1 из работы He и др., 2023 показан пример выделения РЗС с обозначением CWNU 2328 по данным каталога Gaia EDR3. Как можно видеть из рисунка, выделенные звезды имеют узкий диапазон значений тригонометрических параллаксов, компактное облако значений собственных движений $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$ и хорошо ложатся на изохрону, соответствующую возрасту скопления $\log t = 7.55$.

В работе Joshi и Malhotra, 2022 по различным источникам была сформирована выборка из 6133 РЗС. Причем большинство из этих РЗС 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 рождения.

Отметим, наконец, работу Hunt и Reffert, 2023, где представлены 7200 скоплений, 2420 из которых являются новыми кандидатами в РЗС, 4780 РЗС соответствуют объектам в литературе, включая 134 шаровые скопления. Все скопления выделены по данным каталога Gaia EDR3. Более строгий раздел каталога содержит 4114 высоконадежных РЗС, 749 из которых являются новыми. Для всех РЗС каталога определены основные астрометрические параметры, такие как возраст, время жизни и расстояния. Большой процент РЗС в каталоге имеет оценку среднего значения лучевой скорости, вычисленную по данным каталога Gaia EDR3.

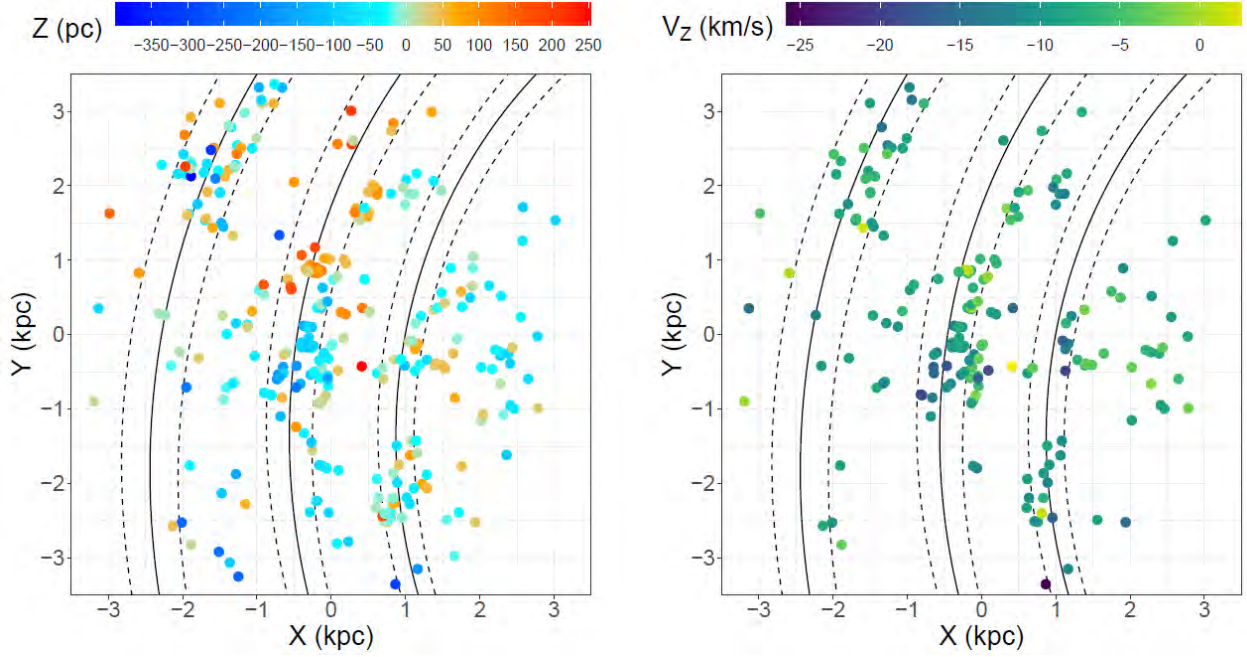


Рис. 2: Слева — распределение выборки 309 молодых ($\log < 7.5$) РЗС в проекции на галактическую плоскость xy , справа — распределение выборки из 189 молодых РЗС с оценками лучевых скоростей. Оси x и y принимают положительные значения в направлении центра Галактики и направления вращения Галактики соответственно. Солнце находится в начале системы координат. Даны три следующих отрезка спиральных рукавов: слева направо, Персея, Местного рукава и Киля-Стрельца. Рисунок взят из работы Alfaro и др., 2022.

2 Системы координат

Непосредственно из наблюдений имеем лучевую скорость V_r и компоненты собственного движения звезды $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ , с использованием которых получают 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 V_r , V_l и V_b 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:

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

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 $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$.

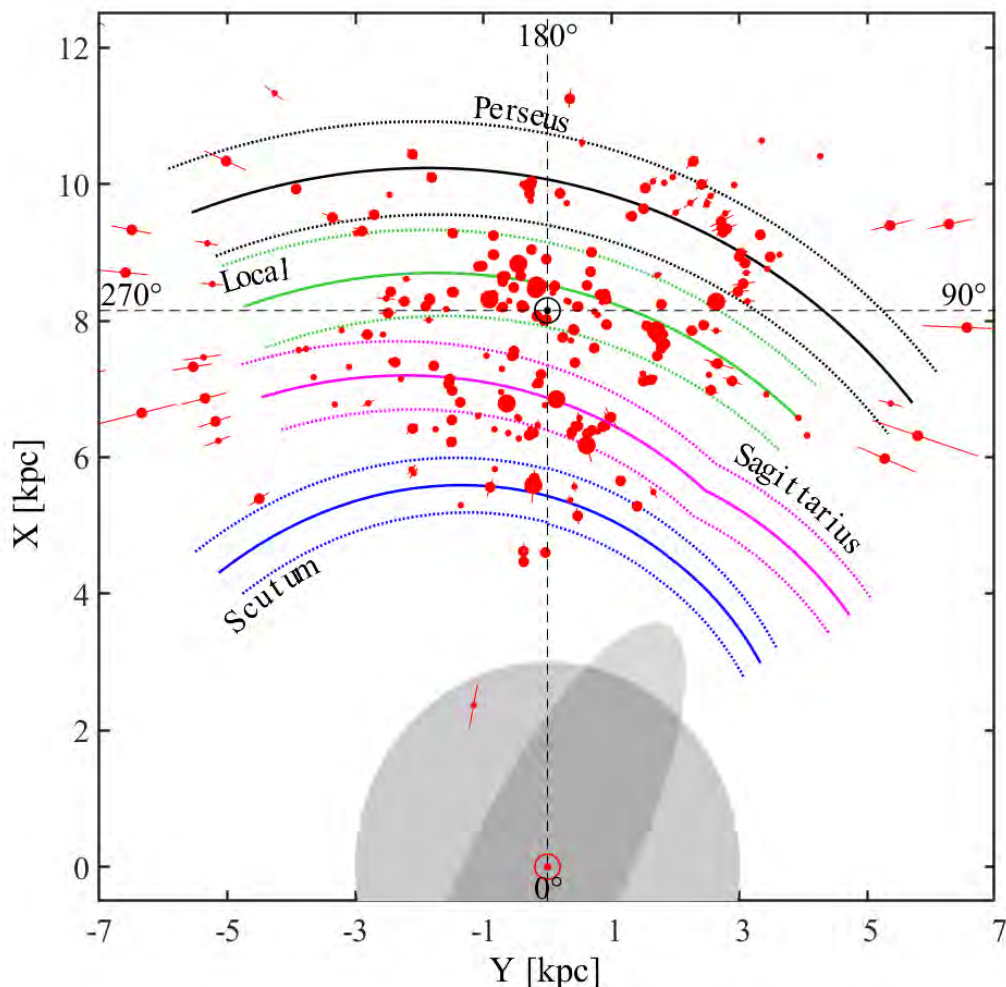


Рис. 3: Распределение выборки РЗС моложе 20 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY . Параметры спиральных рукавов были взяты из работы Reid, Menten, Brunthaler, Zheng, Dame, Xu, Li и др., 2019. Здесь в начале системы координат находится центр Галактики. Положение Солнца отмечено кружком. Рисунок взят из работы НАО, Ху, Z. Y. Wu и др., 2022.

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.

Пример распределения выборки 309 молодых ($\log < 7.5$) РЗС в проекции на галактическую плоскость xy дан на рис. 2. Эта выборка была сформирована по данным из каталогов Cantat-Gaudin, Anders и др., 2020 и Tarricq и др., 2021 при ограничении $|r| < 3.5$ кпк. Расстояния до звезд были вычислены с использованием тригонометрических параллаксов каталога Gaia DR2. Параметры спиральных рукавов взяты из работы Castro-Ginard и др., 2021, а значения ширины рукавов даны согласно их оценке, сделанной в работе Reid, Menten, Brunthaler, Zheng, Dame, Xu, Y. Wu и др., 2014 по мазерам с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами. В настоящее время ошибки определения тригонометрических параллаксов мазеров и радиозвезд РСДБ-методом составляют около 10 мсд, т.е., пока такие измерения в 2–3 раза точнее опубликованных тригонометрических параллаксов Gaia. На левой панели рисунка авторы попытались проследить пространственную, а на правой — кинематическую связь молодых РЗС с изгибом галактического диска.

На рис. 3 из работы НАО, Ху, Z. Y. Wu и др., 2022 дано распределение РЗС моложе 20 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY . Расстояния до звезд были вычислены с использованием тригонометрических параллаксов каталога Gaia EDR3. Параметры спиральных

рукавов взяты из работы Reid, Menten, Brunthaler, Zheng, Dame, Xu, Li и др., 2019.

3 Методы анализа кинематики

3.1 Параметры вращения Галактики

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

$$\Omega(R) = \Omega(R_0) + \Omega'(R_0)(R - R_0) + \Omega''(R_0)(R - R_0)^2/2! + \dots \quad (3)$$

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

$$V_r = -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \quad (4)$$

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r \Omega_0 \cos b + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + (R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0/2, \quad (5)$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0/2, \quad (6)$$

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

Искомые параметры U_\odot , V_\odot , W_\odot и Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 находим в результате решения системы условных уравнений вида (4)–(6) методом наименьших квадратов. Обычно такое решение ищется с применением весов.

3.2 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:

$$V_R = -f_R \cos \chi, \quad \Delta V_{circ} = f_\theta \sin \chi, \quad (7)$$

где

$$\chi = m[\cot(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot \quad (8)$$

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

$$2\pi R_0/\lambda = m \cot(|i|). \quad (9)$$

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

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

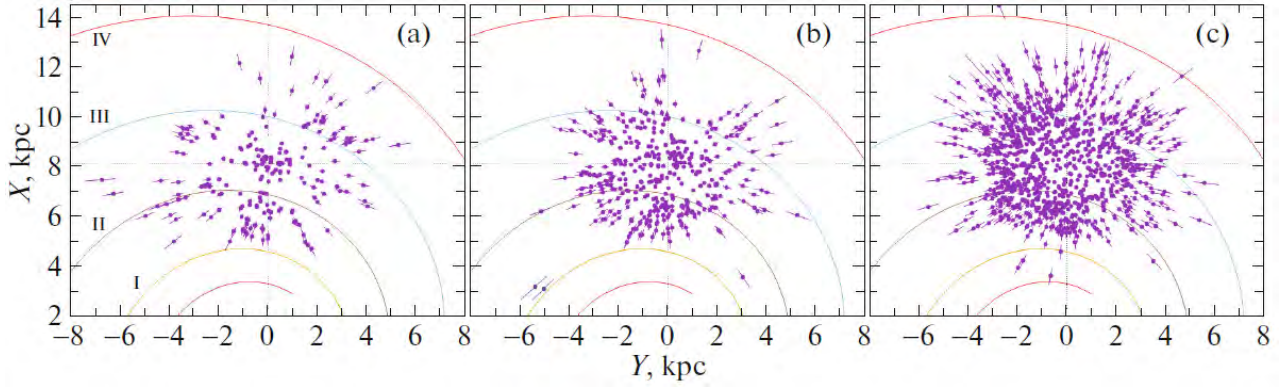


Рис. 4: Распределение на галактической плоскости XY РЗС моложе 60 млн лет (а), с возрастными интервалами 60–300 млн лет (б) и старше 300 млн лет (в). Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022.

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:

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (10)$$

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

$$R'_n = R_0 \ln(R_n/R_0), \quad V'_n(R'_n) = V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n). \quad (11)$$

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 РЗС

4.1 Вращение Галактики и скорости возмущения

В работе Bobylev и Vajkova, 2022 изучены кинематические свойства РЗС с использованием каталога НАО, Ху, Z. Y. Wu и др., 2022. Детально проанализирована кинематика 967 наиболее молодых РЗС со средним возрастом 18 млн лет. Эти РЗС были использованы для переопределения параметров вращения Галактики.

С использованием только их собственных движений и параллакс были найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.01 \pm 0.15$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.674 \pm 0.040$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.565 \pm 0.023$ км/с/кпк³. Здесь круговая линейная скорость вращения окосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 226.9 \pm 3.1$ км/с для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. Такое значение R_0 было принято согласно обзору Bobylev и Vajkova, 2021, где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

На рис. 4 дано распределение РЗС для трех выборок разного возраста в проекции на галактическую плоскость XY (см. также рис. 3). Расстояния до звезд были вычислены НАО, Ху,

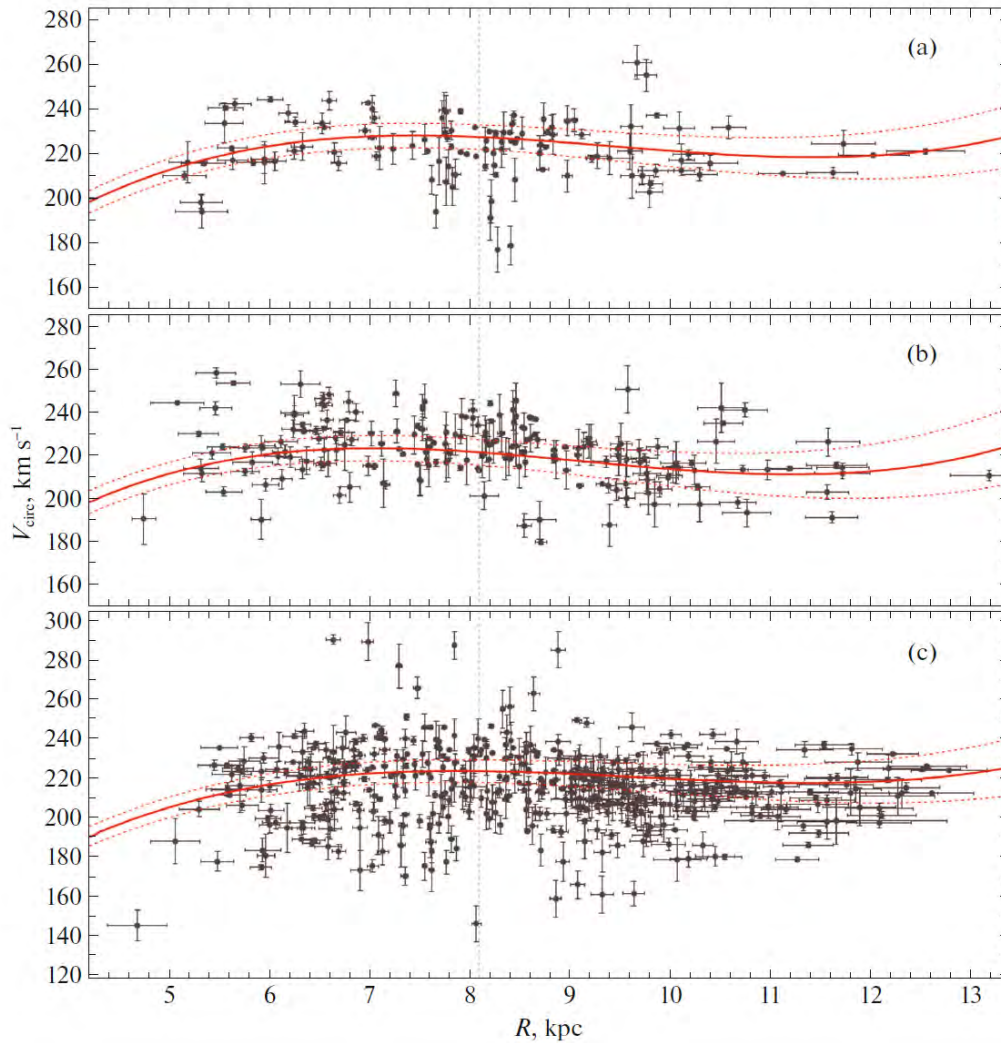


Рис. 5: Круговые скорости вращения V_{circ} РЗС моложе 60 млн лет в зависимости от расстояния R а), с возрастaми в интервале 60–300 млн лет (b) и старше 300 млн лет (c), для каждой выборки показана найденная по ним кривая вращения Галактики с указанием границ доверительных областей, соответствующих уровню 1σ . Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022.

Z. Y. Wu и др., 2022 с использованием тригонометрических параллаксов каталога Gaia EDR3. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ согласно работе Bobylev и Vajkova, 2014.

Круговые скорости вращения V_{circ} этих трех выборок даны на рис. 5, где для каждой выборки показана найденная по ним кривая вращения Галактики. Анализ этих результатов позволяет заключить, что в галактическом вращении принимают участие все РЗС. Видно также, что дисперсия остаточных круговых скоростей увеличивается с возрастом РЗС.

Результаты спектрального анализа остаточных скоростей 233 РЗС моложе 60 млн лет отражены на рис. 6. Были найдены следующие значения длины волны $\lambda_R = 3.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.6$ кпк. Для модели четырехрукавной спиральной структуры ($m = 4$ и принятому $R_0 = 8.1$ кпк) этим значениям согласно соотношению (9) соответствуют значения угла закрутки $i_R = -14.5 \pm 2.1^\circ$ и $i_\theta = -11.4 \pm 2.6^\circ$. Фаза Солнца в спиральной волне близка к $\chi_\odot = -100^\circ \pm 11^\circ$, ее отсчитываем от предполагаемого центра рукава Киля-Стрельца — от $R \sim 7$ кпк в сторону увеличения R . Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с и $f_\theta = 4.6 \pm 1.2$ км/с соответственно.

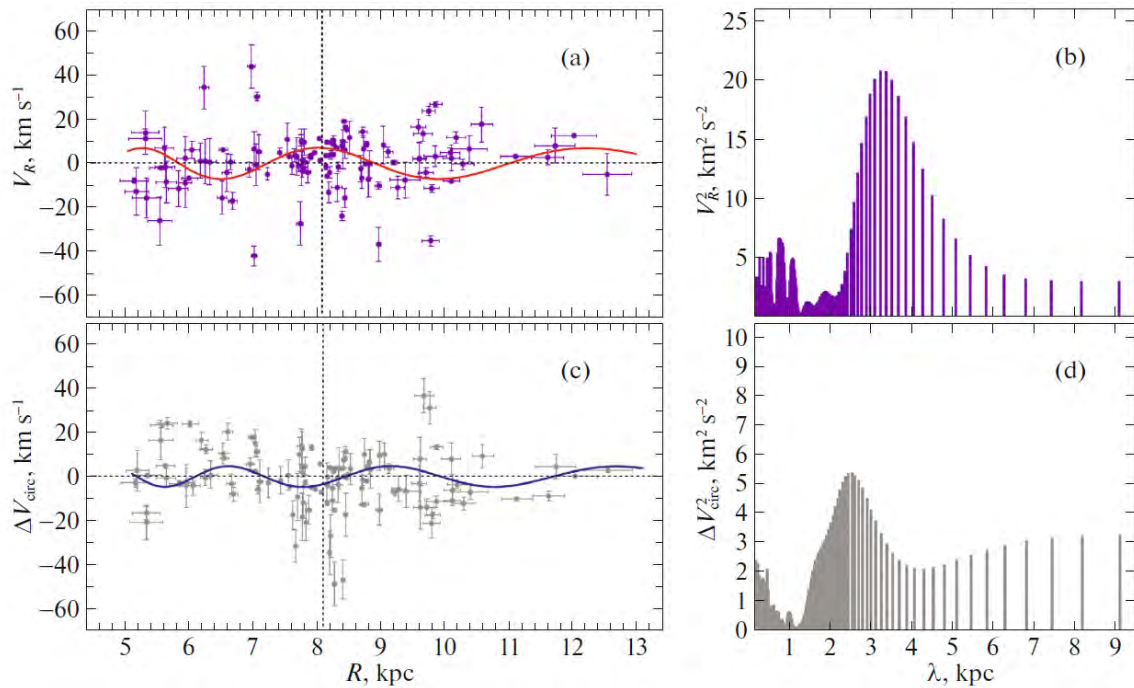


Рис. 6: Радиальные скорости V_R РЗС моложе 60 млн лет в зависимости от расстояния R а), спектр мощности этой выборки (b), остаточные скорости вращения ΔV_{circ} РЗС моложе 60 млн лет (c) и их спектр мощности (d). Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022.

Было показано, что в пространственных скоростях РЗС с возрастaми из интервала 60–300 млн лет (средний возраст 163 млн лет) также проявляется влияние спиральной волны плотности. С наименьшими ошибками определяются параметры спиральной волны плотности по радиальным скоростям этих РЗС.

Отметим, что в работе Loktin и Porova, 2019 был проведен анализ кинематики РЗС на базе “Однородного каталога параметров рассеянных звездных скоплений” с обновленными по каталогу Gaia DR2 кинематическими характеристиками РЗС. Эти авторы нашли значения амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений $f_R = 4.6 \pm 0.7$ км/с и $f_\theta = 1.1 \pm 0.4$ км/с.

В итоге можем заключить, что по крайней мере в остаточных радиальных скоростях РЗС имеются периодичность, амплитуда которой значимо отличается от нуля.

Известно, что дисперсии скоростей звезд в Галактике, и РЗС, в частности, растут со временем. При этом галактическая спиральная волна плотности является только одной, даже не главной, причиной такого роста. Основными причинами роста дисперсий скоростей звезд и РЗС являются такие факторы, как сближение с гигантскими молекулярными облаками и другими массивными объектами (сгустками темной материи, шаровыми скоплениями), а также галактический прилив.

4.2 Дисперсии остаточных скоростей РЗС

В этом разделе нас интересуют дисперсии пространственных скоростей РЗС, которые их характеризуют как членов определенной подсистемы Галактики.

На рис. 7 из работы Tarricq и др., 2021 показано поведение скоростей V_R , V_θ и V_z в зависимости от среднего возраста выборок РЗС с верхним пределом в 2.5 млрд лет. Причем из скоростей V_θ было вычтено вращение Галактики. Т.о., речь здесь идет об остаточных скоростях и дисперсиях остаточных скоростей.

Эти авторы констатировали, что кинематика РЗС характеризуется четкой анизотропией трех компонентов скоростей в любом возрасте. Дисперсии радиальных скоростей σ_{V_R} всегда значительно больше чем σ_{V_θ} и значительно больше, чем σ_{V_z} . Значения дисперсий остаются глобально

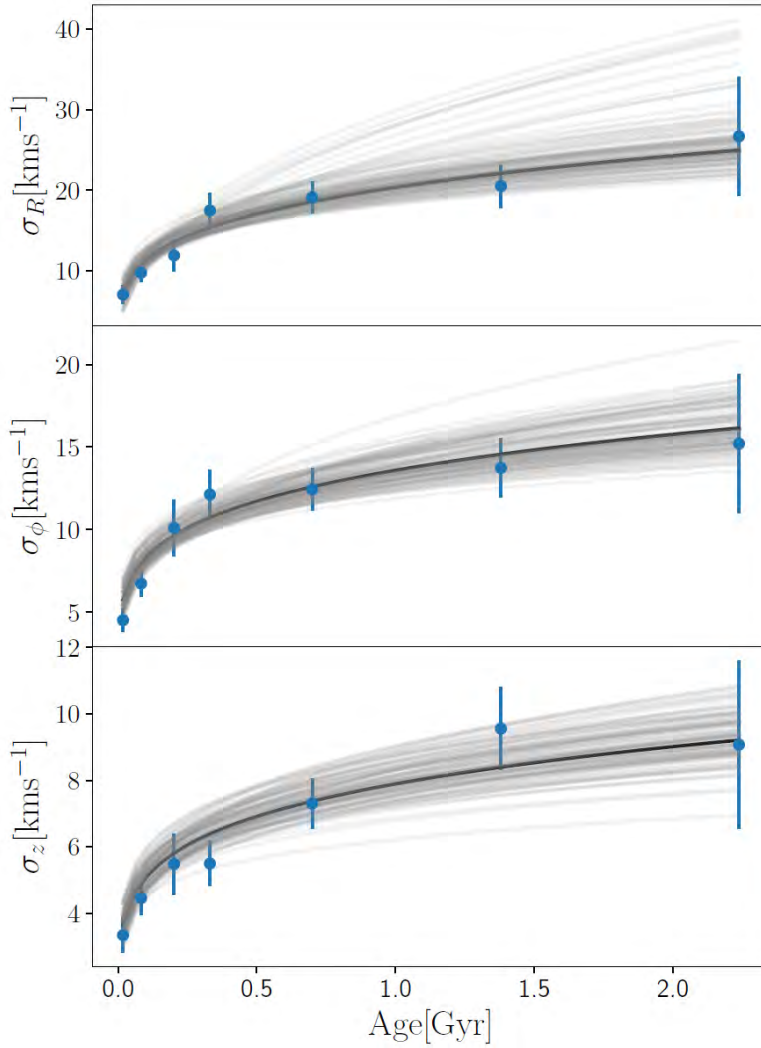


Рис. 7: Дисперсия скоростей V_R , V_θ (на рисунке V_ϕ) и V_z (галактоцентрическая цилиндрическая система координат) в зависимости от возраста РЗС. Синие кружки это медианное значение соответствующей возрастной ячейки. Черными линиями показано наиболее подходящий степенной закон, серые линии представляют неопределенность подгонок. Рисунок взят из работы Tagicq и др., 2021.

стабильными в разных возрастных группах с некоторыми колебаниями в пределах погрешностей. Это означает, что эллипсоид скоростей сохраняет одну и ту же форму в любом возрасте.

Зависимость дисперсий скоростей σ от возраста t была представлена в виде степенного закона $\sigma = t^\beta$. В результате подгонки к данным были найдены следующие значения: $\beta_R = 0.25^{+0.05}_{-0.03}$, $\beta_\theta = 0.23^{+0.03}_{-0.03}$ и $\beta_z = 0.19^{+0.03}_{-0.03}$.

4.3 Дисперсии скоростей звезд в скоплениях

В этом разделе нас интересуют дисперсии скоростей индивидуальных звезд-членов РЗС и ОВ-ассоциаций. Значения таких величин характеризуют внутреннюю динамику скоплений, либо их устойчивость против внешних приливных сил, либо склонность к распаду и разрушению.

ОВ-ассоциации по сравнению с РЗС имеют значительно меньшую плотность и значительно большие размеры. Поэтому давно уже была высказана гипотеза (Ambartsumian, 1949) об их гравитационной неустойчивости и рассеивании.

Одной из наиболее изученных является ближайшая к Солнцу ОВ-ассоциация Скорпиона-

Центавра. Одним из первых эффект расширения этой ассоциации оценил Vlaauw, 1964, который нашел коэффициент расширения $K = 50$ км/с/кпк. Т.о., время расширения ассоциации Скорпиона-Центавра составляет около 20 млн лет. Если грубо оценивать радиус ассоциации $R_{\text{Sco-Cen}}$ в 0.1 кпк, то линейная скорость расширения на ее внешней границе составит $K \times R_{\text{Sco-Cen}} \approx 5$ км/с.

Отметим, что в работе Bobylev и Baykova, 2020 значение коэффициента расширения ассоциации Скорпиона-Центавра было уточнено $K = 39 \pm 2$ км/с/кпк с учетом влияния галактической спиральной волны плотности. Было вычислено не просто среднее значение дисперсии скоростей звезд, но определены главные полуоси эллипсоида остаточных скоростей звезд, равные $\sigma_{1,2,3} = (7.72, 1.87, 1.74) \pm (0.56, 0.37, 0.22)$ км/с и показано, что главная ось этого эллипсоида ориентирована под углом $12 \pm 2^\circ$ к галактической плоскости. Вычислив среднее из трех, получим значение $\bar{\sigma} = 3.78 \pm 0.38$ км/с, которое удобно сравнивать с оценками других авторов.

Известны попытки определения параметров расширения других ОВ-ассоциаций помимо Скорпиона-Центавра. Например, Cantat-Gaudin, Jordi, Wright и др., 2019 сделали вывод о необходимости более точных кинематических данных для решения этого вопроса относительно звездных группировок в направлении ассоциации Vela OB2.

Melnik и Dambis, 2020 изучили движения звезд внутри 28 ОВ-ассоциаций с использованием собственных движений звезд каталога Gaia DR2. Оказалось, что средняя дисперсия скоростей составляет 4.5 км/с. Было подтверждено ранее установленное расширение таких ОВ-ассоциаций, как Per OB1, Car OB1 и Sgr OB1. Впервые эти авторы обнаружили расширение ОВ-ассоциаций Gem OB1, Ori OB1 и Sco OB1. Анализ распределения ОВ-звезд в ассоциации Per OB1 показал наличие раковиннообразной структуры радиусом 40 пк. Это позволило заключить, что расширение ассоциации Per OB1 началось со скоростью, превышающей современную скорость расширения, равную 5.0 ± 1.7 км/с.

ОВ-ассоциация имеет иерархическую структуру, обычно состоит из нескольких более мелких образований. В нее входят РЗС, распадающиеся группировки звезд, движущиеся скопления, молекулярные облака, газ и др. Как показал анализ ОВ-ассоциации в Орионе, выполненный в работе Kounkel и др., 2018, средняя дисперсия скоростей внутри мелких группировок составляет 1–3 км/с.

Дисперсия скоростей внутри гравитационно-связанного, устойчивого к гравитационному воздействию внешней среды (гигантских молекулярных облаков и галактического прилива) РЗС составляет менее 1 км/с. Это отлично известно из анализа скопления Гиады, который выполнен, например, в работе Röser и др., 2011.

Гиады являются ближайшим к Солнцу РЗС, поэтому изучено наиболее детально. На рис. 8 из работы там же дано пространственное распределение звезд в скоплении Гиады. Несмотря на то, что скопление Гиады является гравитационно-устойчивым, постепенно происходит испарение звезд из скопления. Развиваются звездные шлейфы, расположенные вдоль галактической орбиты скопления, один впереди по движению и ближе к центру Галактики, другой позади скопления, чуть дальше от галактического центра. Численное моделирование, проведенное этими авторами, хорошо демонстрирует этот эффект на примере Гиад (рис. 8 с). Моделирование, проведенное другими авторами, подтверждает развитие приливных хвостов у Гиад (Y. O. Chumak, A. S. Rastorguev и Aarseth, 2005; Y. Chumak и A. Rastorguev, 2008).

Röser и др., 2011 установили, что в ядре скопления Гиады (радиусом ≤ 3.1 пк) средняя дисперсия скоростей звезд различных масс не превышает 0.81 км/с, а в короне скопления (радиусом ≤ 9 пк) не превышают 0.88 км/с.

Известно, что РЗС имеют возрасты не более 3–4 млрд лет. Каждое из них существуют до тех пор, пока все звезды скопления в виде приливных хвостов не распределятся вдоль галактической орбиты скопления, а затем смешаются со звездным фоном.

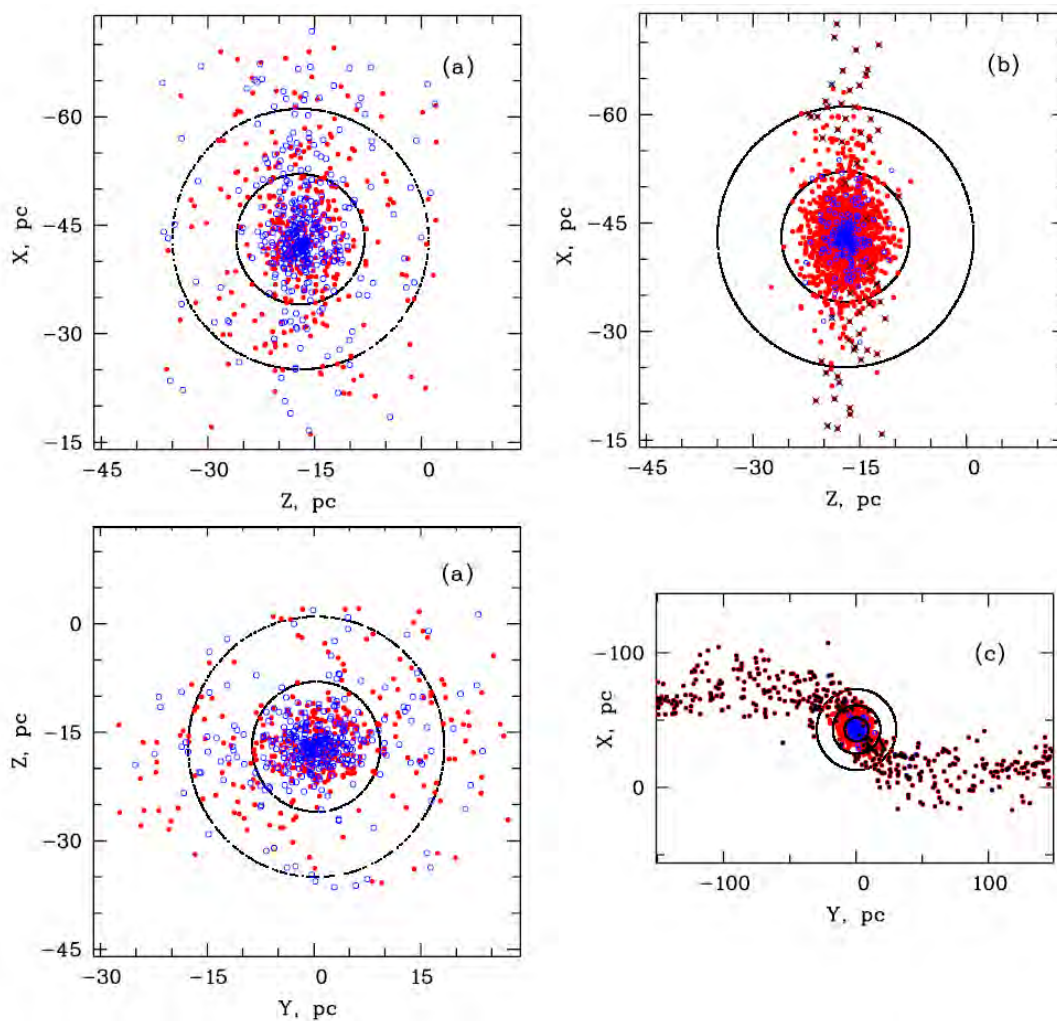


Рис. 8: Наблюдаемое а) и смоделированное б), в) пространственное распределение звезд в скоплении Гиады. Синие точки обозначают звезды с массами $M > 0.5M_{\odot}$, красные точки — $M \leq 0.5M_{\odot}$. В смоделированном распределении динамически несвязанные частицы отмечены черными крестиками б) или черными точками в). Два больших черных круга в а) и б) указывают расстояния от центра скопления 9 пк и 18 пк, тогда как в в) круги соответствуют 9 пк, 18 пк и 30 пк. Рисунок взят из работы Röser и др., 2011.

Кинематика РЗС из ближайшей околосолнечной окрестности

Если брать ошибки тригонометрических параллаксов Gaia DR3 в 10%, то пригодными для первоклассного анализа оказываются звезды в околосолнечной окрестности радиусом около 1 кпк.

Интересно отметить работу Kerr и др., 2021, в которой была разработана система определения принадлежности молодых звезд к различным звездным группировкам. На ее основе по данным каталога Gaia DR2 было выделено $\approx 3 \times 10^4$ молодых звезд-кандидатов в околосолнечной окрестности радиусом 333 пк. Были идентифицированы 27 звездных группировок, почти половина из которых практически не была описана в литературе ранее. Новыми являются следующие группировки: Eridanus North в Орионе, подгруппы в Скорпионе-Центавре SC-7, 10, и 16, а также Centaurus South. Десять из этих групп имеют видимую подструктуру, включая такие известные молодые ассоциации, как Orion, Perseus, Taurus и Sco-Cen.

Проведенный этими авторами кластерный анализ оказался полезным для изучения процессов звездообразования. В частности, в ассоциации Скорпиона-Центавра были найдены четкие свидетельства последовательного звездообразования, проходящего от выделенной этими авторами

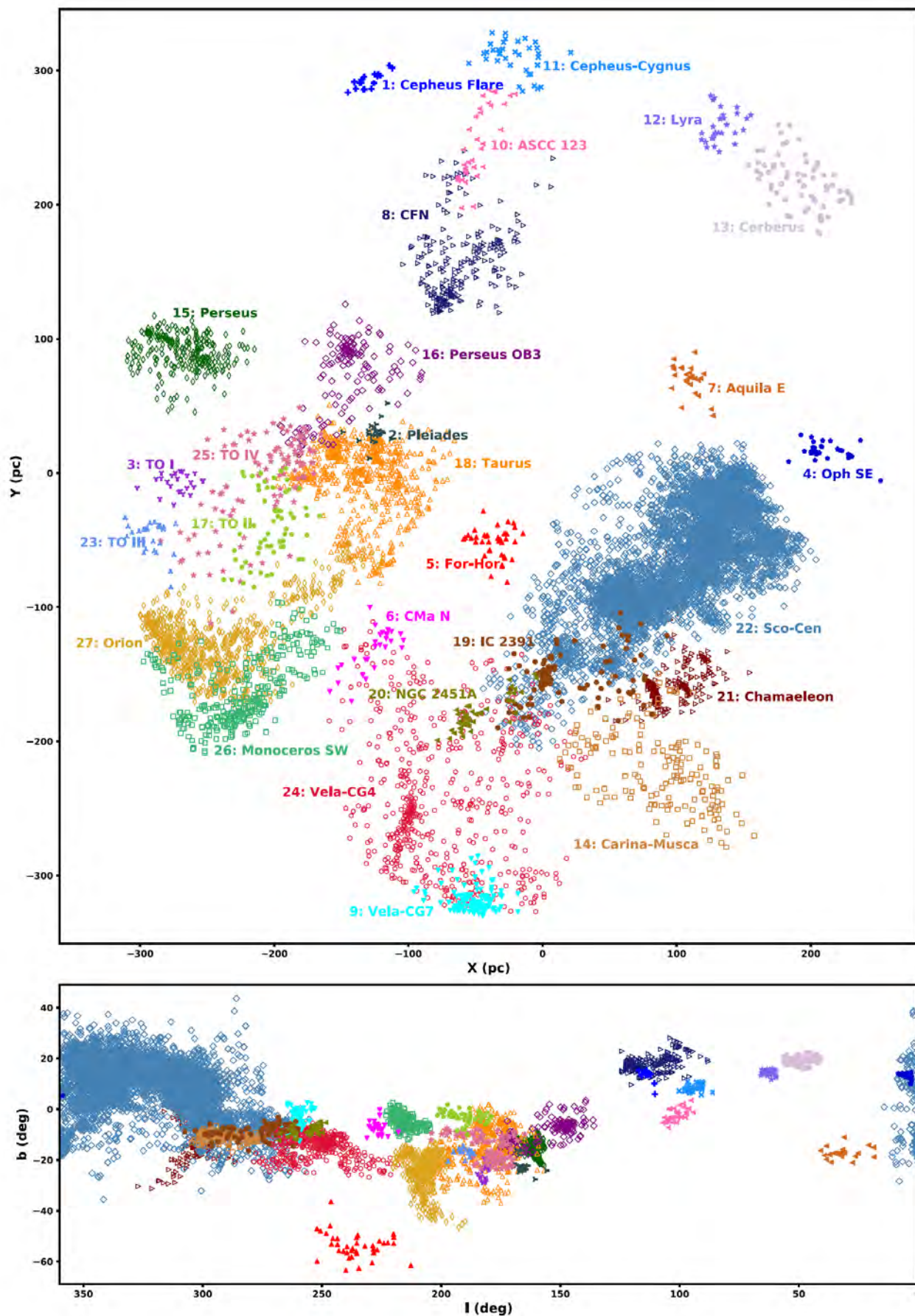


Рис. 9: Результаты кластерного анализа в прямоугольных X/Y (верхняя панель) и сферических l/b (нижняя панель) координатах. Каждый цвет соответствует отдельной группе верхнего уровня. Группы с подструктурой показаны с использованием открытых символов. Рисунок взят из работы Kerr и др., 2021. 108

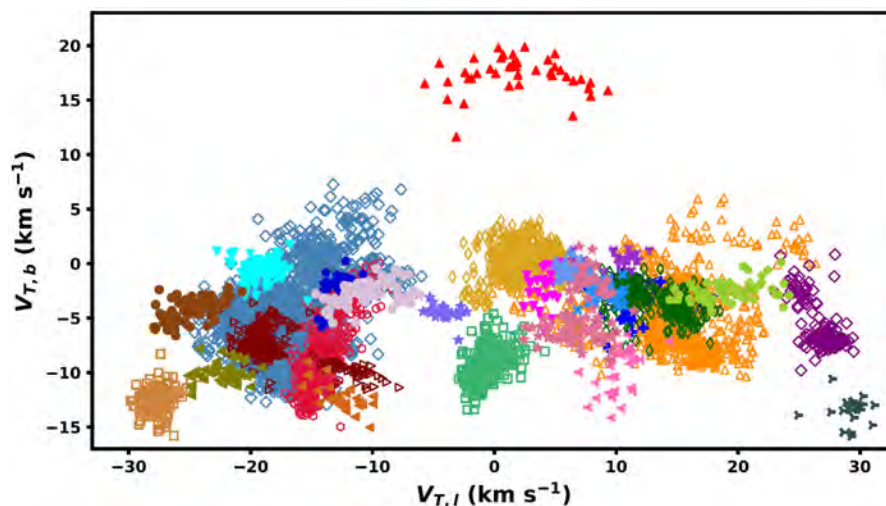


Рис. 10: То же, что и на рис. 9, но для тангенциальных скоростей $V_l \times V_b$. Рисунок взят из работы Кегг и др., 2021.

дуги со скоростью распространения ≈ 4 км/с (≈ 4 пк млн/лет). Были идентифицированы более ранние вспышки звездообразования в Персее и Тельце, предшествовавшие текущим, кинематически идентичным активным событиям звездообразования.

На рис. 9 отражены результаты выделения звездных группировок в прямоугольных и сферических координатах. Особенно интересен рис. 10, где дана карта распределения тангенциальных скоростей $V_l \times V_b$ выделенных звездных группировок. Из этого рисунка хорошо видно, что некоторые группировки, имея маленькую внутреннюю дисперсию скоростей, полностью или частично пересекаясь в пространстве, хорошо отделяются от других по скоростям. При этом можно отметить, что ассоциация Скорпиона-Центавра (22: Sco-Cen, серо-синий цвет) слишком велика для того, чтобы быть обособленной по скоростям.

Из каталога Gaia DR2 отбирались звезды с относительными ошибками менее 10%. Т.о., в работе Кегг и др., 2021 был в полной мере реализован астрометрический потенциал каталога Gaia DR2. Хотя мы видим, что анализировались главным образом тангенциальные скорости звезд (рис. 10). Это связано с отсутствием звезд с измеренными лучевыми скоростями в достаточном для анализа количестве.

В этой связи можно выделить работу Lucchini и др., 2023, где проведено масштабное исследование пространственных скоростей РЗС по данным из каталога Gaia EDR3. В этом каталоге содержатся более точные значения параллаксов и собственных движений звезд по сравнению с предыдущей версией. В работе там же рассмотрено существенно больше звезд с лучевыми скоростями, так как анализировались самые разные звезды, в спектрах которых имеются многочисленные линии металлов, т.е., звезды с хорошо измеренными лучевыми скоростями.

На основе метода типа вэвлет-сглаживания эти авторы выделили 45 групп звезд с когерентными скоростями. Было воспроизведено большинство из ранее известных движущихся групп и обнаружено четыре новые. Изучались сгущения на плоскости пространственных скоростей $V_r \times V_\phi$ (в обозначениях настоящей работы это скорости $V_R \times V_\theta$), что показано на рис. 11. Скорости $V_R \times V_\theta$ остаточные, освобожденные от пекулярного движения Солнца и галактического вращения. Вновь найденные группировки были более детально отслежены за пределами солнечной окрестности, в интервале $R : 6.5 - 10$ кпк. В итоге было заключено, что это потоки, возникшие из-за неосесимметричных особенностей Млечного Пути.

Для объяснения природы наблюдаемой неоднородности поля скоростей звезд долгое время использовалась теория звездных потоков. Поэтому названия пикам даны по ассоциации с РЗС такими как, Плеяды, скопление Сириуса-Большой Медведицы или Гиады. Согласно теории звездных потоков звезды конкретного потока образовались одновременно. Наложением звезд, принадле-

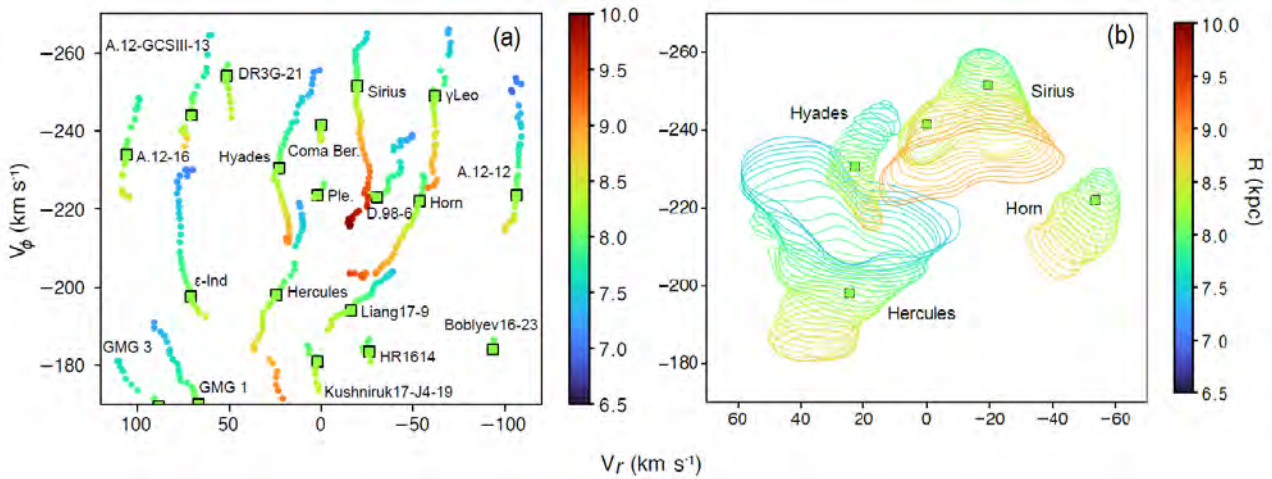


Рис. 11: (a) — плоскость пространственных скоростей $V_r \times V_\phi$ (фактически это плоскость $V_R \times V_\theta$) с отмеченными положениями выявленных сгущений в зависимости от радиуса выборки в интервале $R : 6.5 - 10$ кпк. Зелеными квадратами отмечены пики со звездами из интервала $R : 8.05 - 8.25$ кпк, (b) — то же самое, за исключением того, что каждая движущаяся группа обозначена контурами с постоянным вейвлет-коэффициентом. Здесь пределы осей отличаются от (a), что позволяет увидеть изменение формы групп в зависимости от радиуса выборки. Рисунки взяты из работы Lucchini и др., 2023.

жащих различным потокам, объясняется клочковатая структура наблюдаемого поля скоростей.

Как мы уже упоминали, в процессе эволюции РЗС развиваются звездные шлейфы, вытянутые вдоль галактической орбиты скопления. Однако, за время ≈ 2 млрд. лет остатки РЗС, существующие в виде шлейфов, должны полностью рассеяться и смешаться со звездным фоном (Куррег, MacLeod и Heggie, 2008). Поэтому теория звездных потоков сталкивается с трудностями для объяснения существования сгущений в пространстве скоростей, содержащих старые (старше 2–4 млрд. лет) звезды. В последнее время для объяснения особенностей в распределении скоростей звезд околосолнечной окрестности привлекаются неосесимметричные модели Галактики, такие как спиральная структура, центральный галактический бар или трехосное гало темной материи.

Заключение

Рассмотрены основные кинематические и пространственные свойства выявленных в Галактике рассеянных звездных скоплений. Описаны результаты определения параметров вращения Галактики, которые получены с использованием самых современных кинематических данных о звездах. Отражены результаты анализа остаточных, т.е., освобожденных от влияния пекулярного движения Солнца и вращения Галактики, скоростей РЗС.

Показано, что в остаточных скоростях молодых РЗС присутствует влияние галактической спиральной волны плотности. Описаны результаты различных авторов, которые выяснили а) как дисперсии остаточных скоростей РЗС зависят от их возраста, б) каковы дисперсии скоростей ОВ-ассоциаций и их структурных составляющих, в) каковы дисперсии остаточных скоростей звезд внутри самих РЗС.

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

Список литературы

- Glushkova, E. V., A. K. Dambis, A. M. Mel'Nik и A. S. Rastorguev (1998). *Investigation of the kinematics of young disk populations*. *A&A* 329, с. 514—521.
- 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.
- Loktin, A. V. и G. V. Beshenov (2003). *Proper Motions of Open Star Clusters and the Rotation Rate of the Galaxy*. *Astronomy Reports* 47.1, с. 6—10.
- Piskunov, A. E., N. V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach и R. .-. Scholz (2006). *Revisiting the population of Galactic open clusters*. *A&A* 445.2, с. 545—565.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova и S. V. Lebedeva (2007). *Galactic rotation parameters from data on open star clusters*. *Astronomy Letters* 33.11, с. 720—728.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2016). *Analysis of the Z distribution of young objects in the Galactic thin disk*. *Astronomy Letters* 42.1, с. 1—9.
- Loktin, A. V. и M. E. Popova (2019). *Kinematics of Open Star Clusters Based on the Data of the New Version of the “Homogeneous Catalog of Open Cluster Parameters”*. *Astrophysical Bulletin* 74.3, с. 270—276.
- Бобылев, В. и А. Байкова (2022). *Изучение структуры и кинематики Галактики по данным РСДБ-астрометрии мазеров и радиозвезд*. *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове* 227, с. 36—57.
- Amaral, L. H. и J. R. D. Lepine (1997). *A self-consistent model of the spiral structure of the Galaxy*. *MNRAS* 286.4, с. 885—894.
- Popova, M. E. и A. V. Loktin (2005). *Parameters of the Spiral Structure of the Galaxy from Data on Open Star Clusters*. *Astronomy Letters* 31.3, с. 171—178.
- Loktin, A. V. и M. E. Popova (2007). *The wavelet-smoothed distribution of young stellar objects in the Galactic plane*. *Astronomy Reports* 51.5, с. 364—371.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova и A. S. Stepanishchev (2008). *Galactic rotation curve and the effect of density waves from data on young objects*. *Astronomy Letters* 34.8, с. 515—528.
- Lepine, J. R. D., W. S. Dias и Y. Mishurov (2008). *Measurement of the epicycle frequency in the Galactic disc and initial velocities of open clusters*. *MNRAS* 386.4, с. 2081—2090.
- Junqueira, T. C., C. Chiappini, J. R. D. Lepine, I. Minchev и B. X. Santiago (2015). *A new method for estimating the pattern speed of spiral structure in the Milky Way*. *MNRAS* 449.3, с. 2336—2344.
- Camargo, D., C. Bonatto и E. Bica (2015). *Tracing the Galactic spiral structure with embedded clusters*. *MNRAS* 450.4, с. 4150—4160.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2019). *Kinematics of the Galaxy from a Sample of Young Open Star Clusters with Data from the Gaia DR2 Catalogue*. *Astronomy Letters* 45.3, с. 109—119.
- Cantat-Gaudin, T., F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, M. Romero-Gomez, C. Soubiran, L. Casamiquela, Y. Tarricq, A. Moitinho, A. Vallenari, A. Bragaglia, A. Krone-Martins и M. Kounkel (2020). *Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters*. *A&A* 640, A1.
- Tarricq, Y., C. Soubiran, L. Casamiquela, T. Cantat-Gaudin, L. Chemin, F. Anders, T. Antoja, M. Romero-Gomez, F. Figueras, C. Jordi, A. Bragaglia, L. Balaguer-Nunez, R. Carrera, A. Castro-Ginard, A. Moitinho, P. Ramos и D. Bossini (2021). *3D kinematics and age distribution of the open cluster population*. *A&A* 647, A19.
- Monteiro, H., D. A. Barros, W. S. Dias и J. R. D. Lepine (2021). *The distribution of open clusters in the Galaxy*. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 8, с. 62.
- Dias, W. S., J. R. D. Lepine и B. S. Alessi (2001). *Proper motions of open clusters within 1 kpc based on the TYCHO2 Catalogue*. *A&A* 376, с. 441—447.
- Hao, C. J., Y. Xu, L. G. Hou, S. B. Bian, J. J. Li, Z. Y. Wu, Z. H. He, Y. J. Li и D. J. Liu (2021). *Evolution of the local spiral structure of the Milky Way revealed by open clusters*. *A&A* 652, A102.
- Dias, W. S., M. Assafin, V. Florio, B. S. Alessi и V. Libero (2006). *Proper motion determination of open clusters based on the UCAC2 catalogue*. *A&A* 446.3, с. 949—953.

- Dias, W. S., H. Monteiro, A. Moitinho, J. R. D. Lepine, G. Carraro, E. Paunzen, B. Alessi и L. Vilella (2021). [Updated parameters of 1743 open clusters based on Gaia DR2](#). MNRAS 504.1, с. 356—371.
- Kharchenko, N. V., A. E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach и R. -. Scholz (2005). [Astrophysical parameters of Galactic open clusters](#). A&A 438.3, с. 1163—1173.
- Kharchenko, N. V., R. -. Scholz, A. E. Piskunov, S. Röser и E. Schilbach (2007). [Astrophysical supplements to the ASCC-2.5: Ia. Radial velocities of ~55000 stars and mean radial velocities of 516 Galactic open clusters and associations](#). Astronomische Nachrichten 328.9, с. 889.
- Kharchenko, N. V., A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser и R. -. Scholz (2013). [Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters](#). A&A 558, A53.
- Scholz, R. -. , N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Röser и E. Schilbach (2015). [Global survey of star clusters in the Milky Way. IV. 63 new open clusters detected by proper motions](#). A&A 581, A39.
- Cantat-Gaudin, T., C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Nunez, C. Soubiran, D. Bossini, A. Moitinho, A. Castro-Ginard, A. Krone-Martins, L. Casamiquela, R. Sordo и R. Carrera (2018). [A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way](#). A&A 618, A93.
- Liu, L. и X. Pang (2019). [A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2](#). ApJS 245.2, с. 32.
- Blaha, C. и R. M. Humphreys (1989). [A Comparison of the Luminosity Functions in U, B, and V and Their Relationship to the Initial Mass Function for the Galaxy and the Magellanic Clouds](#). AJ 98, с. 1598.
- Mel'nik, A. M. и A. K. Dambis (2017). [Kinematics of OB-associations in Gaia epoch](#). MNRAS 472.4, с. 3887—3904.
- Vasiliev, E. и H. Baumgardt (2021). [Gaia EDR3 view on galactic globular clusters](#). MNRAS 505.4, с. 5978—6002.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova и K. S. Shirokova (2016). [Galactic kinematics from data on open star clusters from the MWSC catalogue](#). Astronomy Letters 42.11, с. 721—733.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2016). [Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties](#). A&A 595, A2.
- (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.
- Eisenstein, D. J. и др. (2011). [SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems](#). AJ 142.3, с. 72.
- Steinmetz, M., T. Zwitter, A. Siebert, F. G. Watson, K. C. Freeman, U. Munari, R. Campbell, M. Williams, G. M. Seabroke, R. F. G. Wyse, Q. A. Parker, O. Bienayme, S. Roeser, B. K. Gibson, G. Gilmore, E. K. Grebel, A. Helmi, J. F. Navarro, D. Burton, C. J. P. Cass, J. A. Dawe, K. Fiegert, M. Hartley, K. S. Russell, W. Saunders, H. Enke, J. Bailin, J. Binney, J. Bland-Hawthorn, C. Boeche, W. Dehnen, D. J. Eisenstein, N. W. Evans, M. Fiorucci, J. P. Fulbright, O. Gerhard, U. Jauregi, A. Kelz, L. Mijovic, I. Minchev, G. Parmentier, J. Penarrubia, A. C. Quillen, M. A. Read, G. Ruchti, R. -. Scholz, A. Siviero, M. C. Smith, R. Sordo, L. Veltz, S. Vidrih, R. von Berlepsch, B. J. Boyle и E. Schilbach (2006). [The Radial Velocity Experiment \(RAVE\): First Data Release](#). AJ 132.4, с. 1645—1668.
- Buder, S., S. Sharma, J. Kos, A. M. Amarsi, T. Nordlander, K. Lind, S. L. Martell, M. Asplund, J. Bland-Hawthorn, A. R. Casey, G. M. de Silva, V. D'Orazi, K. C. Freeman, M. R. Hayden, G. F. Lewis, J. Lin, K. J. Schlesinger, J. D. Simpson, D. Stello, D. B. Zucker, T. Zwitter, K. L. Beeson, T. Buck, L. Casagrande, J. T. Clark, K. Cotar, G. S. da Costa, R. de Grijs, D. Feuillet, J. Horner, P. R. Kafle, S. Khanna, C. Kobayashi, F. Liu, B. T. Montet, G. Nandakumar, D. M. Nataf, M. K. Ness, L. Spina, T. Tepper-Garcia, Y.-S. Ting, G. Traven, R. Vogrincic, R. A. Wittenmyer, R. F. G. Wyse, M. Zerkal и Galah Collaboration (2021). [The GALAH+ survey: Third data release](#). MNRAS 506.1, с. 150—201.
- Hao, C. J., Y. Xu, Z. Y. Wu, Z. H. Lin, D. J. Liu и Y. J. Li (2022). [Newly detected open clusters in the Galactic disk using Gaia EDR3](#). A&A 660, A4.

- He, Z., X. Liu, Y. Luo, K. Wang и Q. Jiang (2023). [Unveiling Hidden Stellar Aggregates in the Milky Way: 1656 New Star Clusters Found in Gaia EDR3](#). *ApJS* 264.1, с. 8.
- Alfaro, E. J., M. Jimenez, M. C. Sanchez-Gil, N. Sanchez, M. Gonzalez и J. Maiz Apellaniz (2022). [Topography of the Young Galactic Disk: Spatial and Kinematic Patterns of Clustered Star Formation in the Solar Neighborhood](#). *ApJ* 937.2, с. 114.
- 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-Nunez 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.
- Joshi, Y. C. и S. Malhotra (2022). [Understanding Galactic disk morphology through open star clusters and surrounding interstellar material](#). arXiv e-prints, arXiv:2212.09384.
- Hunt, E. L. и S. Reffert (2023). [Improving the open cluster census. II. An all-sky cluster catalogue with Gaia DR3](#). arXiv e-prints, arXiv:2303.13424.
- Castro-Ginard, A., P. J. McMillan, X. Luri, C. Jordi, M. Romero-Gómez, T. Cantat-Gaudin, L. Casamiquela, Y. Tarricq, C. Soubiran и F. Anders (2021). [Milky Way spiral arms from open clusters in Gaia EDR3](#). *A&A* 652, A162.
- Reid, M. J., K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, Y. Wu, B. Zhang, A. Sanna, M. Sato, K. Hachisuka, Y. K. Choi, K. Immer, L. Moscadelli, K. L. J. Rygl и A. Bartkiewicz (2014). [Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way](#). *ApJ* 783.2, с. 130.
- 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.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2012). [Estimation of the galactic spiral pattern speed from Cepheids](#). *Astronomy Letters* 38.10, с. 638–648.
- (2022). [Kinematics of the Galaxy from Young Open Star Clusters with Data from the Gaia EDR3 Catalogue](#). *Astronomy Letters* 48.1, с. 9–19.
- (2021). [A New Estimate of the Best Value for the Solar Galactocentric Distance](#). *Astronomy Reports* 65.6, с. 498–506.
- (2014). [The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters](#). *MNRAS* 437.2, с. 1549–1553.
- Ambartsumian, V. A. (1949). [Stellar Associations](#). *AZh* 26, с. 3.
- Blaauw, A. (1964). [The O Associations in the Solar Neighborhood](#). *ARA&A* 2, с. 213.
- Bobylev, V. V. и A. T. Baykova (2020). [New Expansion Rate Estimate of the Scorpius-Centaurus Association Based on T Tauri Stars from the Gaia DR2 Catalog](#). *Astronomy Reports* 64.4, с. 326–335.
- Cantat-Gaudin, T., C. Jordi, N. J. Wright, J. J. Armstrong, A. Vallenari, L. Balaguer-Nunez, P. Ramos, D. Bossini, P. Padoan, V. M. Pelkonen, M. Mapelli и R. D. Jeffries (2019). [Expanding associations in the Vela-Puppis region. 3D structure and kinematics of the young population](#). *A&A* 626, A17.
- Melnik, A. M. и A. K. Dambis (2020). [Internal motions in OB associations with Gaia DR2](#). *MNRAS* 493.2, с. 2339–2351.
- Röser, S., E. Schilbach, A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko и R. -. Scholz (2011). [A deep all-sky census of the Hyades](#). *A&A* 531, A92.
- Kounkel, M., K. Covey, G. Suarez, C. Roman-Zuniga, J. Hernandez, K. Stassun, K. O. Jaehnig, E. D. Feigelson, K. Pena Ramirez, A. Roman-Lopes, N. Da Rio, G. S. Stringfellow, J. S. Kim, J. Borissova, J. G. Fernandez-Trincado, A. Burgasser, D. A. Garcia-Hernandez, O. Zamora, K. Pan и C. Nitschelm (2018). [The APOGEE-2 Survey of the Orion Star-forming Complex. II. Six-dimensional Structure](#). *AJ* 156.3, с. 84.
- Kerr, R. M. P., A. C. Rizzuto, A. L. Kraus и S. S. R. Offner (2021). [Stars with Photometrically Young Gaia Luminosities Around the Solar System \(SPYGLASS\). I. Mapping Young Stellar Structures and Their Star Formation Histories](#). *ApJ* 917.1, с. 23.

- Lucchini, S., E. Pellett, E. D'Onghia и J. A. L. Aguerri (2023). [Moving groups across Galactocentric radius with Gaia DR3](#). MNRAS 519.1, с. 432—444.
- Chumak, Y. O., A. S. Rastorguev и S. J. Aarseth (2005). [Numerical Simulations of the Hyades Dynamics and the Nature of the Moving Hyades Cluster](#). Astronomy Letters 31.5, с. 308—314.
- Chumak, Y. и A. Rastorguev (2008). [Tidal Tails of the Nearest Open Clusters](#). В: Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems. Под ред. E. Vesperini, M. Giersz и A. Sills. Т. 246, с. 107—108.
- Kupper, A. H. W., A. MacLeod и D. C. Heggie (2008). [On the structure of tidal tails](#). MNRAS 387.3, с. 1248—1252.

Study of the structure and kinematics of the Galaxy by open star clusters and associations in the Gaia era

V.V. Bobylev, A.T. Bajkova

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

This article is a review, written on the basis of previously published results. It examines the main kinematic and spatial properties of the open star clusters (OCs) of the Galaxy. The results of determining the parameters of galactic rotation are described, which are obtained using the most up-to-date kinematic data on stars. Obtained, in particular, according to the Gaia DR2 and Gaia EDR3 catalogs. The results of the analysis of the residual, freed from the influence of the peculiar motion of the Sun and the rotation of the Galaxy, the velocities of the OCs are reflected. It is described about the manifestation of the galactic spiral density wave in the residual velocities of the OCs. The results of various authors are described, who have found out i) how the variance of the residual velocities of the OCs depends on their age, ii) what are the dispersions of the velocities of OB associations and their structural components, iii) what are the dispersions of the residual velocities of stars inside the OCs themselves.