

ИМЕЕТСЯ ЛИ АНАЛОГ ВОЛНЫ РЭДКЛИФФА МЕЖДУ РУКАВАМИ КИЛЯ–СТРЕЛЬЦА И ЩИТА?

© 2024 г. В. В. Бобылев^{1*}

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

Поступила в редакцию 08.02.2025 г.

После доработки 08.02.2025 г.; принята к публикации 04.03.2025 г.

По литературным данным составлена наиболее полная на сегодняшний день выборка галактических мазерных источников и радиозвезд с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами, их собственными движениями и лучевыми скоростями. Эти источники ассоциируются с молодыми звездами, расположенными в областях активного звездообразования. По 156 мазерам с относительными ошибками параллаксов менее 10%, расположенными от галактического центра далее 3 кпк, определены параметры вращения Галактики. При этом линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 равна $V_0 = 243.9 \pm 3.9$ км/с. Изучена очень узкая цепочка мазеров длиной 3–4 кпк, вытянутая в направлении $l \sim 40^\circ$, проходящая от отрезка спирального рукава Киля–Стрельца до рукава Щита. Рядом авторов высказывалась гипотеза о том, что это возможный аналог волны Рэдклиффа. В настоящей работе не найдено заметных периодических возмущений вертикальных координат и скоростей в этой структуре. С другой стороны, на диаграмме “ $\ln(R/R_0) - \theta$ ” эта цепочка мазеров имеет вид отрезка логарифмической спирали с углом закрутки -48° . Возможно эта цепочка мазеров принадлежит струе, отходящей от конца бара, вращающейся твердотельно с угловой скоростью вращения бара.

Ключевые слова: Галактика (Млечный путь), кинематика, мазеры, волна Рэдклиффа, спиральный рукав Киля–Стрельца, спиральный рукав Щита.

DOI: 10.31857/S0320010824120065, **EDN:** LFFMEX

ВВЕДЕНИЕ

Измерения тригонометрических параллаксов звезд очень важны для анализа структуры и кинематики Галактики. В проекте Gaia (Прусти и др., 2016) определены тригонометрические параллаксы, собственные движения и лучевые скорости миллионов звезд (Gaia DR3, Валенари и др., 2022). Однако в настоящее время точность определения параллаксов этого каталога ограничивает область исследования радиусом околосолнечной области около 3 кпк.

Источники мазерного излучения и радиозвезды с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами и собственными движениями в настоящее время играют важную роль в изучении Галактики. Для определения параметров галактического вращения и спиральной структуры особенно интересны молодые звезды, недалеко удалившись от места своего рождения. В настоящее время выполнены РСДБ-измерения около 270 таких объектов с разной степенью точности. Среди них имеются около 160 мазеров с ошибками измерения их параллаксов в среднем около 10 микросекунд дуги и относительными ошибками таких определений менее 10%, что позволяет “дотянуться” до центра Галактики.

Отметим ряд работ, которые радиоастрономы посвятили РСДБ-измерениям мазеров и изучению

структур и кинематики Галактики на полученном материале. Это, например, большие обзоры Рида и др. (2019), Хироты и др. (2020), а также Иммер, Ригл (2022).

Вблизи от Солнца недавно обнаружена волна Рэдклиффа (Алвес и др., 2020), которая представляет собой узкую цепочку молекулярных облаков, вытянутую в линию длиной ~2.7 кпк в галактической плоскости XY. Главной ее особенностью является хорошо заметный волнообразный характер распределения облаков в вертикальном направлении. При этом максимальное значение координаты Z составляет ~160 пк, наблюдаемое в непосредственной близости от Солнца.

Изучению волны Рэдклиффа посвящено уже достаточно большое количество публикаций. Волнообразный характер поведения вертикальных координат подтвержден в распределении межзвездной пыли (Лаллемент и др., 2022; Эденхофер и др., 2024), молекулярных облаков (Цукер и др., 2023), мазеров и радиозвезд (Бобылев и др., 2022), звезд типа Т Тельца (Ли, Чен, 2022), массивных ОВ-звезд (Донада, Фигуэрас, 2021; Туласидхаран и др., 2022), а также молодых рассеянных звездных скоплений (Донада, Фигуэрас, 2021). В волне Рэдклиффа обнаружена периодичность и в вертикальных скоростях с амплитудой 5–10 км/с (Бобылев и др., 2022; Конецка и др., 2024). Таким образом, волна Рэдклиффа является отражени-

*Электронный адрес: bob-v-vzz@rambler.ru

ем реального физического процесса, который привел к возмущению вертикальных координат и вертикальных скоростей звездно-газовой структуры с массой около $3 \times 10^6 M_{\odot}$.

В работе Мэя и др. (2023), посвященной РСДБ-измерениям тригонометрических параллаксов мазеров, была высказана интересная гипотеза о возможности существования аналога волны Рэдклиффа в другом месте диска Галактики. А именно, на распределении мазеров в проекции на галактической плоскости XY заметна необычно длинная, очень узкая цепочка источников, вытянутая в направлении $l \sim 40^\circ$, проходящая от отрезка спирального рукава Киля–Стрельца до рукава Щита.

Целью настоящей работы является составление по литературным источникам наиболее полного списка данных о мазерах с РСДБ-измерениями их тригонометрических параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей. Определение по этим данным ряда кинематических параметров вращения Галактики. Целью также является проверка идеи Мэя и др. (2023). Для этого необходимо выяснить наличие периодических возмущений вертикальных координат и скоростей в указанном ими образовании из мазеров.

ДАННЫЕ

Мазерное излучение возникает в непосредственной близости от молодых формирующихся звезд, а также уже проеволюционировавших звезд, накачиваемых либо сильным инфракрасным излучением, либо сильными столкновениями газа в дисках, потоками в джетах или ветрами. Особенность мазеров заключается в том, что практически вся их энергия излучается в нескольких молекулярных линиях. Это, например, гидроксильные (OH) мазеры с частотой 1.6 ГГц, мазеры на метаноле (CH_3OH) с частотой 6.7 и 12.2 ГГц, мазеры на парах воды (H_2O) с частотой 22 ГГц или мазеры на монооксиде кремния (SiO) с частотой 43 ГГц.

Применение РСДБ-метода для измерения тригонометрических параллаксов галактических мазеров с относительными ошибками в среднем менее 10% сделали их первоклассными объектами для изучения структуры и кинематики Галактики. Ценность радионаблюдений заключается в том, что им не препятствует поглощение излучения межзвездной пылью. Наибольший интерес представляют мазерные источники, связанные с молодыми звездами и протозвездами, которые находятся в областях активного звездообразования. Выборка из 199 таких источников представлена в работе Рида и др. (2019). РСДБ-наблюдения проводились в рамках проекта BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey¹). Важнейшим вкладчиком здесь является американская решетка VLBA, состоящая из десяти 25-метровых антенн с максимальной базовой линией более 8000 км. Наблюдения охва-

тывают частоты 6.7 и 12.2 ГГц с мазерными переходами на метаноле, а также мазерными переходами на парах воды с частотой 22.2 ГГц.

Другим вкладчиком в программу BeSSeL является европейская РСДБ-сеть EVN (European VLBI Network). Здесь самые длинные базовые линии составляют около 9000 км, а самой большой решеткой является 100-метровая антенна в Эффельсберге. Наблюдения ведутся на частотах от 6.7 до 22.2 ГГц.

Наконец, в Японии выполняются РСДБ-наблюдения мазеров по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry²), которые также входят в программу BeSSeL. Интерферометр состоит из четырех 20-метровых антенн, расположенных по всей Японии, что обеспечивает базовую длину от 1020 до 2270 км. Выполняются наблюдения H_2O -мазеров на частоте 22.2 ГГц, реже, SiO -мазеров на частоте 43.1 и 42.8 ГГц. Уникальным свойством антенн VERA является двухлучевая приемная система, позволяющая одновременно отслеживать пару мазерных целей и фазовых опорных источников. Во всех других программах (VLBA, EVN и др.) наблюдения опорных внегалактических объектов проводятся в начале и конце сессии путем перенацеливания антенн, что потом требует дополнительных усилий для учета атмосферных искажений. Отметим, что астрометрическая точность тем лучше, чем выше частота наблюдений. Таким образом, РСДБ-наблюдения, выполненные по программе VERA, являются наиболее точными по сравнению с наблюдениями, полученными в рамках остальных программ. В работе Хироты и др. (2020) описан каталог из 99 источников, для которых тригонометрические параллаксы и компоненты собственного движения были получены исключительно по программе VERA.

Недавно начала работать объединенная восточноазиатская РСДБ-сеть, EAVN (East Asian VLBI Network³), где вкладчиками являются корейская KVN (Korean VLBI Network), китайская CVN (Chinese VLBI Network) и японская VERA РСДБ-сети. В настоящее время EAVN состоит из 21 телескопов, с помощью которых проводятся наблюдения H_2O -мазеров на частоте 22.2 ГГц (Акияма и др., 2022). Первые результаты определения тригонометрического параллакса мазерного источника отражены в работе Сакаи и др. (2023).

Появились также результаты РСДБ-измерения мазеров, полученные с помощью радиоинтерферометра LBA (Long Baseline Array) в Австралии (Кришнан и др., 2015). Интерферометр состоит из антенн большого диаметра (более 20 метров), с помощью которого наблюдаются метанольные мазеры на частоте 6.7 ГГц.

Для каждого мазера в списках Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020) указаны значения измерен-

¹<http://bessel.vlbi-astrometry.org>

²<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

³https://radio.kasi.re/eavn/main_eavn.php

ных экваториальных координат, тригонометрического параллакса, двух компонент собственного движения. Даны также значения лучевых скоростей, взятые из различных литературных источников, приведена обширная библиография. Списки Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020) имеют пересечения, поэтому в настоящей работе мы составили общий список данных без совпадений.

К этому общему списку нами добавлены новые измерения, выполненные после 2020 года (Сакаи и др., 2020, 2023; Ортиз-Леон и др., 2020, 2023; Сюй и др., 2021; Биан и др., 2022; Мэй и др., 2023). Наиболее интересными являются измерения четырех мазерных источников, выполненные из южного полушария (Хайлэнд и др., 2023, 2024) с помощью австралийского радиоинтерферометра. Эти объекты расположены в четвертом галактическом квадранте, где ранее практически отсутствовали измерительные данные.

Помимо источников мазерного излучения в нашем списке имеются радиозвезды, РСДБ-наблюдения которых выполнены не в линиях молекул (как в случае мазеров), а в континууме (Ортиз-Леон и др., 2018; Гайи и др., 2018). В большинстве своем – это маломассивные звезды типа Т Тельца, расположенные в области пояса Гулда. В настоящее время примерно для 60 таких звезд, наблюденных на частотах 5 и 8 ГГц по программе GOBELINS (Gould's Belt Distances Survey, Ортиз-Леон и др., 2017), измерены их абсолютные тригонометрические параллаксы и собственные движения, а также известны их лучевые скорости.

По мере накопления измерительного материала периодически появляются работы, посвященные анализу структуры и кинематики Галактики с использованием данных о мазерах в областях активного звездообразования. Можно отметить работы Рида и др. (2009), Бобылева, Байковой (2010, 2022), Хонмы и др. (2012), Растиоргуева и др. (2017), Рида и др. (2019), Хироты и др. (2020).

На данный момент список содержит всего 308 результатов определения РСДБ-параллаксов и собственных движений мазеров и радиозвезд (связанных с протозвездами и молодыми звездами, расположенными в областях активного звездообразования).

На рис. 1 дана гистограмма распределения звезд в зависимости от относительной ошибки определения параллакса для всей выборки исследуемых объектов, а в табл. 1 дано количество объектов в зависимости от относительной ошибки определения параллакса σ_{π}/π и положения в Галактике (в зависимости от расстояния R). Статистика дана как для всей выборки, так и для интервала расстояний $R : [3 - 14]$ кпк, который представляет большой интерес для изучения вращения Галактики (см., например, Рид и др., 2009, 2019), а также параметров спиральной структуры (см., например, Растиоргуев и др., 2017; Рид и др., 2019; Бобылев и др., 2020; Бобылев, Байкова, 2022). Здесь наиболее важным является условие $R < 3$ кпк, которое

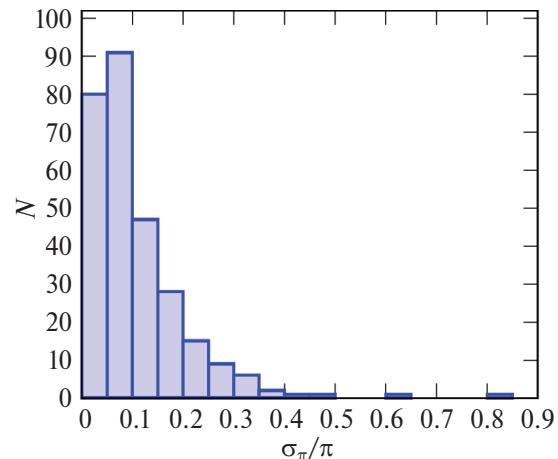


Рис. 1. Количество мазеров и радиозвезд в зависимости от относительной ошибки РСДБ-измерений их тригонометрических параллаксов.

Таблица 1. Количество мазеров и радиозвезд с относительными ошибками определения параллаксов

σ_{π}/π	$R > 0$ кпк	$3 < R < 14$ кпк
30%	267	259
20%	243	236
15%	215	210
10%	168	164

сильно ограничивает влияние галактического бара на движение звезд.

На рис. 2а дано распределение 164 мазеров и радиозвезд с ошибками измерения параллаксов менее 10% в проекции на галактическую плоскость XY. На рис. 2б дано распределение 210 мазеров с ошибками измерения параллаксов менее 15% в проекции на галактическую плоскость XY, где красными кружками выделена цепочка мазеров, которую мы хотим проверить на наличие возмущений вертикальных координат Z и скоростей W. На этом рисунке использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Четырехрукий спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ дан согласно работе Бобылева, Байковой (2014), здесь он построен со значением $R_0 = 8.1$ кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие четыре спиральные рукава: I – Щита, II – Килия–Стрельца, III – Персея и IV – Внешний рукав.

МЕТОДЫ

Из наблюдений для каждой звезды имеем лучевую скорость V_r , направленную вдоль луча зрения, и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r_{\mu} \cos b$ и $V_b = 4.74r_{\mu} b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, коэффициент

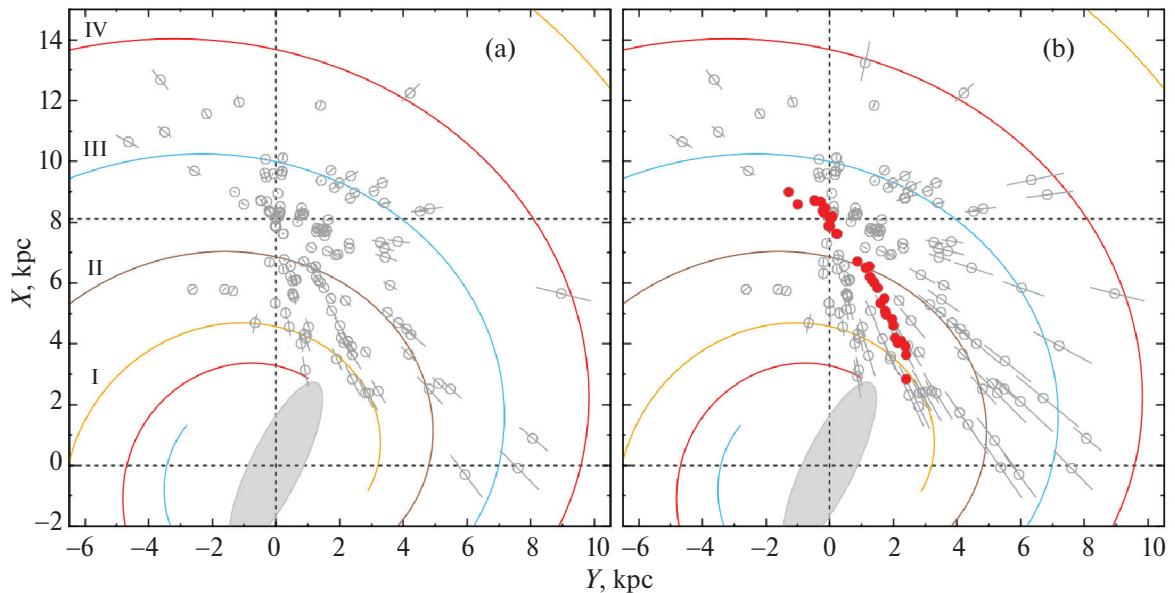


Рис. 2. Распределение 164 мазеров и радиозвезд с ошибками измерения параллаксов менее 10% в проекции на галактическую плоскость XY (а), распределение 210 мазеров с ошибками измерения параллаксов менее 15% (б).

4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году. Все три скорости выражены в км/с, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое вычисляется через параллакс π , $r = 1/\pi$. 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:

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

где скорость U направлена от Солнца параллельно направлению на центр Галактики, точнее на ось галактического вращения, 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} , направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе 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 $\operatorname{tg} \theta = y/(R_0 - x)$, x, y, z — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды (вдоль соответствующих осей x, y, z направлены скорости U, V, W), V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 .

Определение параметров вращения Галактики

Для определения параметров кривой галактического вращения используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых проведено разложение угловой скорости Ω в ряд до членов второго порядка малости r/R_0 :

$$\begin{aligned} V_r &= -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - \\ &- W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + \\ &+ 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_l &= U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r \Omega_0 \cos b + \\ &+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + \\ &+ 0.5(R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_b &= U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \\ &- W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - \\ &- 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики, $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Скорости $(U, V, W)_\odot$ являются средней групповой скоростью выборки, они отражают пекулярное движение Солнца, поэтому взяты с обратными знаками; Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости вращения, $V_0 = R_0 \Omega_0$.

Мы принимаем R_0 равным 8.1 ± 0.1 кпк. Это значение было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок в работе Бобылева, Байковой (2021).

Решение условных уравнений вида (3)–(5) ищется методом наименьших квадратов (МНК). В итоге получаем оценку шести следующих неизвестных: $(U, V, W)_\odot, \Omega_0, \Omega'_0$ и Ω''_0 . Отметим, что скорости U, V и W в уравнениях (2) освобождены от пекулярной скорости Солнца U_\odot, V_\odot и W_\odot со значениями, найденными в результате МНК-решения кинематических уравнений вида (3)–(5).

Сpirальная волна плотности

Положение звезды в логарифмической спиральной волне в общем виде записывается следующим образом:

$$R = a_0 e^{(\theta - \theta_0) \operatorname{tg} i}, \quad (6)$$

где R — расстояние от центра Галактики до звезды, θ — позиционный угол звезды, θ_0 — произвольно выбранный начальный угол, который положим равным нулю, a_0 — место пересечения спиралью оси X , i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали), который связан с остальными параметрами так:

$$\operatorname{tg}(|i|) = m\lambda/(2\pi R_0), \quad (7)$$

где m — количество спиральных рукавов, λ — длина волны, равная расстоянию (в радиальном направлении) между отрезками спиральных рукавов в околосолнечной области. После деления левой и правой частей уравнения (6) на R_0 и логарифмирования, получим соотношение

$$\ln \frac{R}{R_0} = \ln(a_0/R_0) + \theta \operatorname{tg} i, \quad (8)$$

которое является уравнением прямой. Тогда из диаграммы “ $\ln(R/R_0) - \theta$ ” можем оценить значение a_0 и i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры вращения Галактики

Для поиска МНК-решения кинематических уравнений применены два способа. В первом случае использовались три скорости — V_r, V_l и V_b (вариант $V_r + V_l + V_b$), а во втором случае использовались только собственные движения мазеров (вариант $V_l + V_b$). Результаты отражены в табл. 2.

В работе Бобылева, Байковой (2022) по 150 мазерам при аналогичных условиях для варианта $V_r + V_l + V_b$ были получены следующие оценки: $(U, V, W)_\odot = (9.15, 12.81, 8.93) \pm (0.86, 0.86, 0.75)$ км/с, $\Omega_0 = 30.18 \pm 0.38$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.368 \pm 0.077$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.845 \pm 0.037$ км/с/кпк³, где ошибка единицы веса σ_0 составила 8.9 км/с и $V_0 = 244.4 \pm 4.3$ км/с (для принятого $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). Сравнение значений этих параметров с соответствующими из табл. 2 показывает, что в настоящей работе все оценки получены с меньшими ошибками. Улучшение решения произошло из-за использования большего количества мазеров в решениях.

Таблица 2. Кинематические параметры, найденные по 164 мазерным источникам, расположенным в области Галактики $R > 3$ кпк

Параметры	$V_r + V_l + V_b$	$V_l + V_b$
U_\odot , км/с	9.42 ± 0.81	9.61 ± 1.32
V_\odot , км/с	13.17 ± 0.84	11.49 ± 0.96
W_\odot , км/с	8.96 ± 0.73	8.49 ± 0.62
Ω_0 , км/с/кпк	30.11 ± 0.31	29.66 ± 0.36
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.333 ± 0.067	-3.917 ± 0.096
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.837 ± 0.034	0.648 ± 0.043
σ_0 , км/с	9.0	7.9
V_0 , км/с	243.9 ± 3.9	240.2 ± 4.1

Радиальные V_R , остаточные тангенциальные ΔV_{circ} и вертикальные W скорости мазеров и радиозвезд в зависимости от расстояния R даны на рис. 3. Оранжевыми линиями на рисунках показаны усредненные значения скоростей. На всех трех панелях рисунка хорошо видны периодичности, отражающие возмущения скоростей, вызванные галактической спиральной волной плотности. Параметры таких возмущений (амплитуды и длины волн) были определены в работе Бобылева, Байковой (2022) с применением спектрального анализа трех видов скоростей — V_R , ΔV_{circ} и W . В зависимости от вида скоростей значения параметров возмущений были найдены следующими: $\lambda_{R,\theta,W} = (2.1, 2.1, 2.6)$ кпк и амплитуды возмущений $f_{R,\theta,W} = (6.7, 2.6, 5.2)$ км/с. В работе Бобылева, Байковой (2022) было показано очень хорошее согласие между кривыми, полученными путем скользящего среднего (оранжевые линии на рис. 3) и периодическими кривыми, найденными в результате спектрального анализа.

Диаграмма “ $\ln(R/R_0) - \theta$ ”

Для построения диаграммы “ $\ln(R/R_0) - \theta$ ”, которая дана на рис. 4, была использована выборка мазеров с ошибками измерения их параллаксов менее 15%. Для отрезков спиральных рукавов Ориона, Персея и Внешнего проведены линии с углом закрутки -13° . Для цепочки мазеров, отмеченных на рисунке красными точками, найдено, что они располагаются под углом -48° . Для них также получена оценка $\ln(a/R_0) = -0.015$. В дальнейшем для отбора этой цепочки мазеров используем зону отбора шириной $\ln(R/R_0) = 0.12$ (0.97 кпк). Для этого используем ограничение на угол $-0.2 < \theta < 0.8$ радиан и две ограничительные линии на диаграмме:

$$\begin{aligned} \ln(R/R_0) &= 0.045 + \theta \operatorname{tg}(-48^\circ), \\ \ln(R/R_0) &= -0.075 + \theta \operatorname{tg}(-48^\circ). \end{aligned} \quad (9)$$

Отобранные таким образом мазеры, которых оказалось 65 источников, отмечены красными кружками на рис. 2б. Вначале мы хотели посмотреть только свойства более короткой цепочки звезд, т.е. находящихся

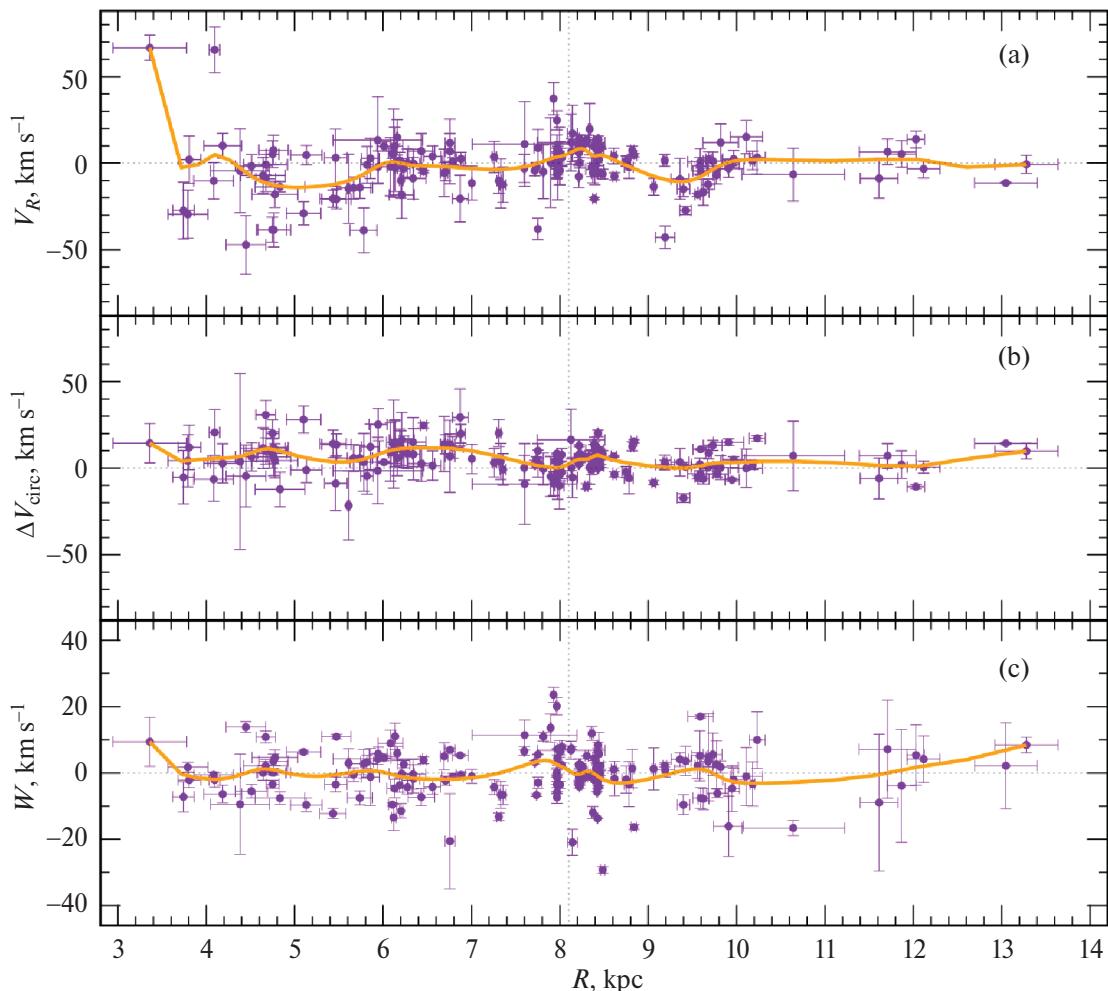


Рис. 3. Скорости мазеров и радиоизвезд с относительными ошибками определения параллаксов менее 10% в зависимости от расстояния R : (а) – радиальные, (б) – остаточные тангенциальные, (с) – вертикальные.

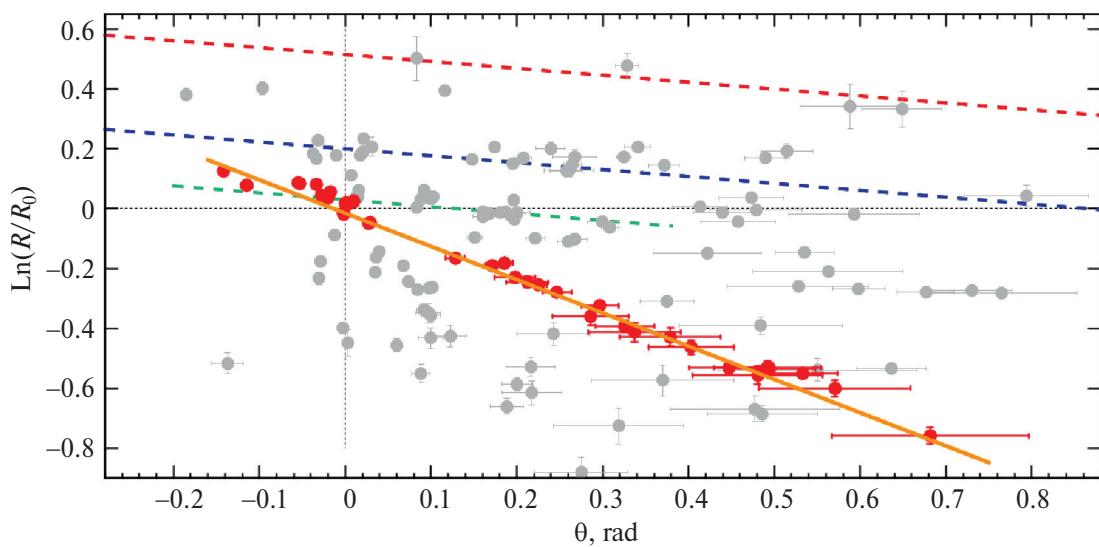


Рис. 4. Галактоцентрические расстояния мазеров вида $\ln(R/R_0)$ в зависимости от позиционных углов θ , пунктирные линии проведены под углом к горизонтальной оси -13° для Внешнего рукава (красная линия), Персея (синяя линия), Ориона (зеленая линия), а для цепочки красных точек – под углом -48° (оранжевая сплошная линия).

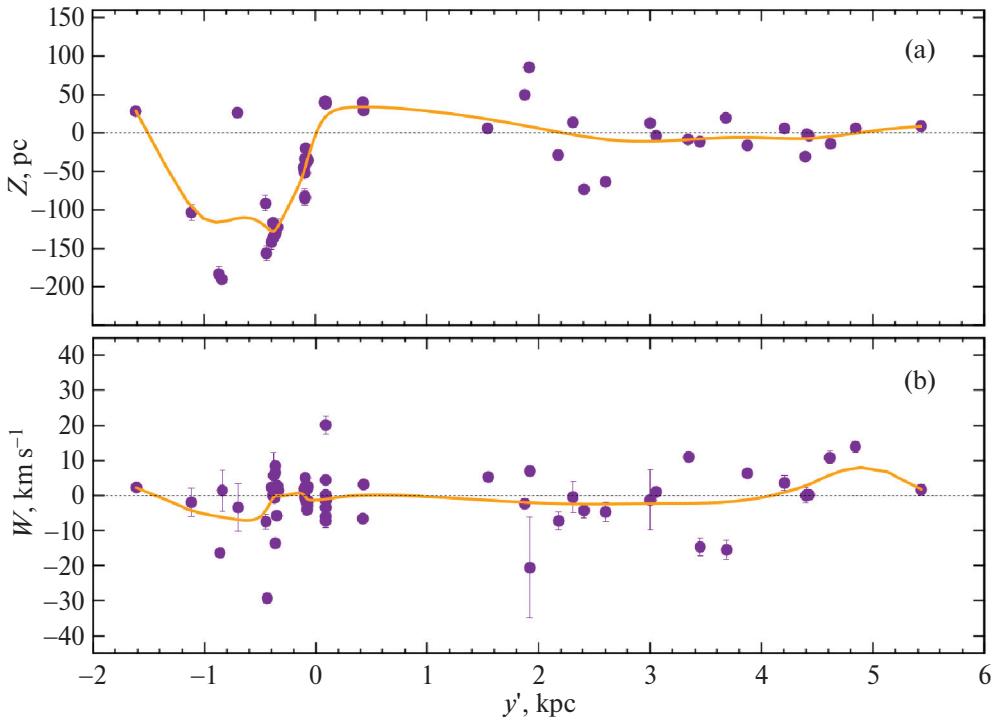


Рис. 5. Вертикальные координаты (а) и скорости (б) цепочки мазеров вдоль оси y' .

в интервале $0.1 < \theta < 0.8$ радиан, но оказалось, что подключение звезд из ближайшего окружения Солнца более информативно.

Волна Рэдклиффа и цепочка Киля–Щита

Для выяснения наличия периодических возмущений вертикальных координат и скоростей избранных мазеров был осуществлен переход (в гелиоцентрической системе координат) к штрихованной оси y' на угол 48° следующим образом:

$$y' = y \cos 48^\circ + x \sin 48^\circ. \quad (10)$$

Такой подход обычно применяется при изучении волн Рэдклиффа (Алвес и др., 2020; Бобылев и др., 2022; Конецка и др., 2024). Зависимости вертикальных координат и скоростей отобранных 65 мазеров от координат y' даны на рис. 5.

На рис. 5 видно, что мазеры, расположенные в интервале $1 < y' < 6$ кпк, не демонстрируют заметных периодических возмущений вертикальных координат и скоростей, характерных для волны Рэдклиффа.

В области $-2 < y' < 1$ кпк на этом рисунке расположены мазеры, находящиеся под воздействием волны Рэдклиффа. Проявление этой волны хорошо видно в координатах Z . Влияние волны Рэдклиффа здесь редуцированное (здесь видим другое значение длины волны). Хорошо известно, что волна Рэдклиффа ориентирована под углом 25° – 30° к оси y . Но амплитуда возмущения $Z \sim 150$ пк (рис. 5а) находится в полном согласии с известной для волны Рэдклиффа.

С другой стороны, узкая цепочка избранных мазеров (рис. 4) выглядит как отрезок логарифмической

спирали с углом закрутки -48° . Если это реально, то можно предположить, что такая крупномасштабная спиральная волна могла спровоцировать образование пояса Гулда, а также могла возбудить волну в вертикальных координатах и скоростях в волне Рэдклиффа. Эта гипотеза тем более интересна, что численное моделирование спиральной структуры Галактики при наличии бара дает аргументы в ее поддержку. Например, на рис. 3 из работы Ли и др. (2022), построенного по результатам такого моделирования, можем видеть отходящую от концов бара струю, похожую на наш случай. В модели Ли и др. (2022) значение угловой скорости бара принималось равным $\Omega_b = 37.5$ км/с/кпк. Предположим, что обнаруженная нами цепочка мазеров является подобной струей, которая твердоценно вращается с угловой скоростью вращения бара. Это означает, что в области Солнца струя наезжает на вещество волны Рэдклиффа, так как в этом случае волна Рэдклиффа расположена от центра Галактики дальше радиуса коротации бара. Здесь имеется согласие как с радиальным, так и с тангенциальным движением волны Рэдклиффа, обнаруженным недавно в работе Конецки и др. (2024). Еще одним аргументом в поддержку данной гипотезы является то, что описываемая цепочка мазеров берет начало от конца длинного бара. Согласно определениям различных авторов (см., например, Бенджамин и др., 2005; Кабрера-Лаверс и др., 2008; Вегг и др., 2015) длинный бар ориентирован под углом от 30° до 45° к оси X , и половина его длины составляет от 4 до 5 кпк.

На рис. 6 даны радиальные, остаточные тангенциальные и вертикальные скорости избранной цепоч-

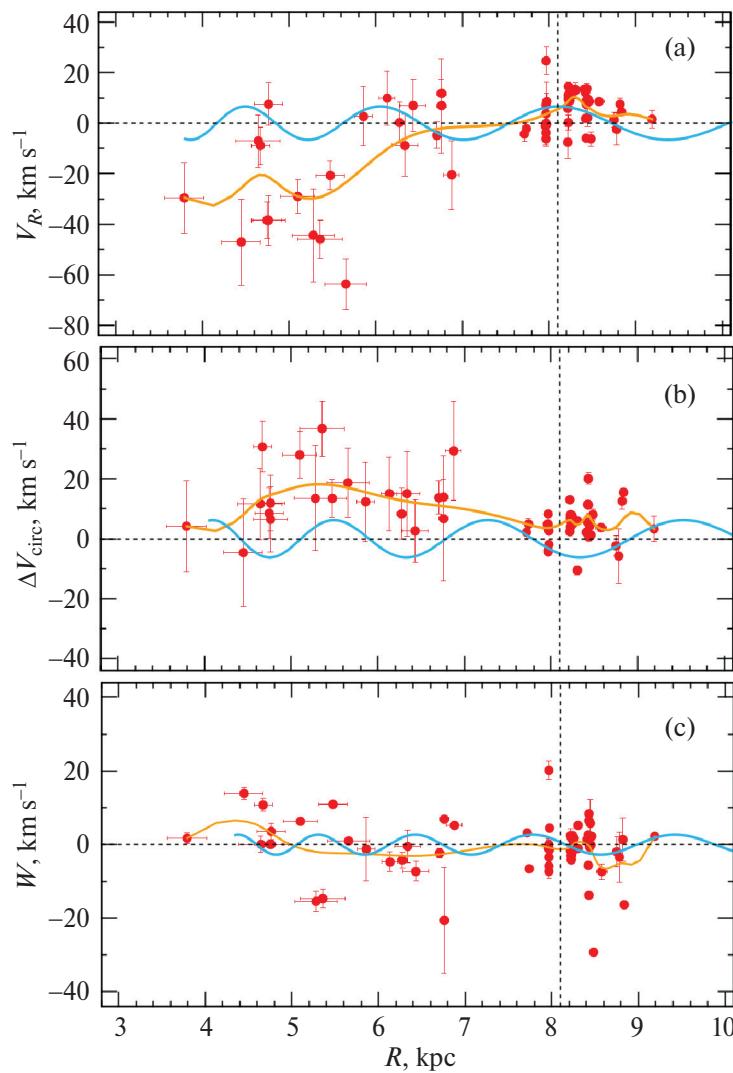


Рис. 6. Скорости избранной цепочки мазеров и радиозвезд в зависимости от расстояния R : (а) – радиальные, (б) – остаточные тангенциальные, (с) – вертикальные (см. текст).

ки мазеров в зависимости от расстояния R . На этом рисунке синей линией даны периодические кривые, найденные в работе Бобылева, Байковой (2022) по выборке мазеров на основе спектрального анализа. Эти кривые, параметры которых уже были перечислены при обсуждении параметров вращения Галактики, отражают влияние галактической спиральной волны плотности. Оранжевой линией даны средние значения скоростей. Как видно на рисунке, в области рукава Щита ($R \sim 5$ кпк) скорости V_R и ΔV_{circ} имеют значительные отклонения от синей кривой. Это говорит о необычной кинематике целой группировки источников в этой области.

Значение угла закрутки спирали, близкое к -48° , очень редко, но встречается в других галактиках (см., например, рис. 9 в работе Ю, Хо, 2019). Спиральный узор с углом закрутки $i = -48^\circ$ при малых значениях m должен иметь большую длину волны λ . С использованием соотношения (7) можем оценить значение λ для

$i = -48^\circ$ и $R_0 = 8.1$ кпк: $\lambda = 28$ кпк при $m = 2$ или $\lambda = 14$ кпк при $m = 4$, и т.д.

В литературе неоднократно обсуждались модели спиральной структуры Галактики, состоящие из суммирования нескольких спиральных узоров. Например, известна модель Лепине и др. (2001) о существовании на солнечном радиусе двухрукавного и четырехрукавного спиральных узоров (с углами закрутки 6° и 12° соответственно). Энглмайер и др. (2008) предложили модель, в которой внутри солнечного круга реализован двухрукавный узор, а во внешней части Галактики спиральный узор уже становится четырехрукавным (см. также работу этих авторов Пол и др., 2008).

Интересно также отметить работы Грива и др. (2017, 2021), где на основе кинематического анализа выборок различных молодых объектов был сделан вывод о реализации в Галактике однорукавной моды ($m = 1$), т.е. в такой модели $\lambda = 2\pi R_0 \operatorname{tg}|i|$. Тогда в примене-

ния к нашему случаю (Бобылев, Байкова, 2014) найдем $\lambda \sim 12$ кпк при $m = 2$, $i = -13^\circ$ и $R_0 = 8.1$ кпк, или $\lambda \sim 24$ кпк при $m = 4$, $i = -13^\circ$ и $R_0 = 8.1$ кпк. Впрочем, Гривом и др. (2017, 2021) при $m = 1$ получены вполне обычные значения параметров волны плотности в околосолнечной окрестности $i \approx -2^\circ$ и $\lambda \approx 2$ кпк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным составлена наиболее полная на сегодняшний день выборка галактических мазерных источников и радиозвезд с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами, их собственными движениями и лучевыми скоростями. Эти мазеры и радиозвезды являются очень молодыми объектами, ассоциируемые с протозвездами, звездами не достигшими главной последовательности, а в ряде случаев с очень массивными молодыми звездами. Все они тесно связаны с областями активного звездообразования.

В результате совместного решения системы кинематических уравнений с использованием 164 мазеров с ошибками измерения их тригонометрических параллаксов менее 10%, расположенных в области Галактики $R > 3$ кпк, найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_\odot = (9.15, 12.81, 8.93) \pm \pm (0.86, 0.86, 0.75)$ км/с и следующие параметры угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 30.11 \pm \pm 0.31$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.333 \pm 0.067$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.837 \pm 0.034$ км/с/кпк³, где линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составила $V_0 = 243.9 \pm 3.9$ км/с для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

Изучена очень узкая цепочка мазеров длиной 3–4 кпк, вытянутая в направлении $l \sim 40^\circ$, проходящая от отрезка спирального рукава Киля–Стрельца до рукава Щита. Проверена гипотеза Мэя и др. (2023) о том, что эта цепочка мазеров может быть аналогом волны Рэдклиффа. В настоящей работе не найдено значительных периодических возмущений вертикальных координат и скоростей в этой структуре, характерных для волны Рэдклиффа. Таким образом, цепочка мазеров между отрезками спиральных рукавов Киля и Щита не является аналогом волны Рэдклиффа.

В процессе проведенного анализа обнаружено, что узкая цепочка мазеров, которая уже тянется от Солнца (захватывает область пояса Гулда) до отрезка рукава Щита выглядит как отрезок логарифмической спирали с углом закрутки -48° . Возможно, что такая крупномасштабная спиральная волна плотности могла спровоцировать образование пояса Гулда, а также возбудить волну в вертикальных координатах и скоростях в волне Рэдклиффа. Эту гипотезу интересно будет проверить на большем материале. В настоящее же время для ее проверки не хватает высокоточных в отношении измерения параллаксов данных. Например, до многочисленных облаков нейтрального водорода

Галактики, расстояния определены не очень точным кинематическим способом. Расстояния до классических цефеид измеряются с точностью 5–10%, однако они распределены с большой дисперсией относительно центров спиральных рукавов, поэтому от них нельзя ожидать хорошей концентрации к узкой цепочке, описанной в настоящей работе. Надежда – на финальную версию каталога Gaia.

Наша рабочая гипотеза состоит в том, что обнаруженная цепочка мазеров является подобной струе структурой, отходящей от конца бара, которая твердо-твильно вращается с угловой скоростью вращения бара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акияма и др. (K. Akiyama, J.-C. Algaba, T. An, K. Asada, K. Asanok, D.-Y. Byun, T. Chanapote, W. Chen, et al.), *Galaxies* **10**, 113 (2022).
2. Алвес и др. (J. Alves, C. Zucker, A.A. Goodman, J.S. Speagle, S. Meingast, Th. Robitaille, D.P. Finkbeiner, E.F. Schlaflly, and G.M. Green), *Nature* **578**, 237 (2020).
3. Бенджамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler, R. Indebetouw, M.R. Meade, B.A. Whitney, C. Watson, M.G. Wolfire, et al.), *Astrophys. J.* **630**, L149 (2005).
4. Биан и др. (S.B. Bian, Y. Xu, J.J. Li, Y.W. Wu, B. Zhang, X. Chen, Y.J. Li, Z.H. Lin, et al.), *Astron. J.* **163**, 54 (2022).
5. Бобылев, Байкова (V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **408**, 1788 (2010).
6. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
7. Бобылев В.В., Крисанова О.И., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **46**, 470 (2020) [V.V. Bobylev, O.I. Krisanova, and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **46**, 439 (2020)].
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 492 (2022) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 376 (2022)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Мишуров Ю.Н., Письма в Астрон. журн. **48**, 553 (2022) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, and Yu.N. Mishurov, *Astron. Lett.* **48**, 434 (2022)].
10. Валенари и др. (Gaia Collab., A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, 1 (2023).
11. Вегг и др. (C. Wegg, O. Gerhard, and M. Portail), *MNRAS* **450**, 4050 (2015).
12. Гайи и др. (P.A.B. Galli, L. Loinard, G.N. Ortiz-Leon, M. Kounkel, S.A. Dzib, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, L. Hartmann, et al.), *Astrophys. J.* **859**, 33 (2018).
13. Грив и др. (E. Griv, L.-G. Hou, I.-G. Jiang, and C.-C. Ngeow), *MNRAS* **464**, 4495 (2017).
14. Грив и др. (E. Griv, M. Gedalin, and I.-G. Jiang), *MNRAS* **503**, 354 (2021).
15. Донада, Фигуэрос (J. Donada and F. Figueras), arXiv: 2111.04685 (2021).
16. Иммер, Ригл (K. Immer and K.L.J. Rygl), *Universe* **8**, 390 (2022).

17. Кабрера-Лаверс и др. (A. Cabrera-Lavers, C. Gonzalez-Fernandez, F. Garzon, P.L. Hammersley, and M. Lopez-Corredoira), *Astron. Astrophys.* **491**, 781 (2008).
18. Конецка и др. (R. Konietzka, A.A. Goodman, C. Zucker, A. Burkert, J. Alves, M. Foley, C. Swiggum, M. Koller, and N. Miret-Roig), *Nature* **628**, 62 (2024).
19. Кришнан и др. (V. Krishnan, S.P. Ellingsen, M.J. Reid, A. Brunthaler, A. Sanna, J. McCallum, C. Reynolds, H.E. Bignall, et al.), *Astrophys. J.* **805**, 129 (2015).
20. Лепине и др. (J.R.D. Lepine, Yu.N. Mishurov, and S.Yu. Dedikov), *Astrophys. J.* **546**, 234 (2021).
21. Ли, Чен (G.-X. Li and B.-Q. Chen), *MNRAS* **517**, L102 (2022).
22. Ли и др. (Z. Li, J. Shen, O. Gerhard, and J.P. Clarke), *Astrophys. J.* **925**, 71 (2022).
23. Мэй и др. (X. Mai, B. Zhang, M.J. Reid, L. Moscadelli, S. Xu, Y. Sun, J. Zhang, W. Chen, et al.), *Astrophys. J.* **949**, 10 (2023).
24. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, L. Loinard, M.A. Kounkel, S.A. Dzib, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, R.A. Gonzalez-Lopezlira, et al.), *Astrophys. J.* **834**, 141 (2017).
25. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, L. Loinard, S.A. Dzib, P.A.B. Galli, M. Kounkel, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, et al.), *Astrophys. J.* **865**, 73 (2018).
26. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, K.M. Menten, T. Kaminski, A. Brunthaler, M.J. Reid, and R. Tylenda), *Astron. Astrophys.* **638**, 17 (2020).
27. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-Leon, S.A. Dzib, L. Loinard, Y. Gong, T. Pillai, and A. Plunkett), *Astrophys. Asyrophys.* **673**, L1 (2023).
28. Пол и др. (M. Pohl, P. Englmaier, and N. Bissantz), *Asyrophys. J.* **677**, 283 (2008).
29. Прусти и др. (Gaia Collab., T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 1 (2016).
30. Растрогуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюлл. **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, N.D. Utkin, M.V. Zabolotskikh, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 122 (2017)].
31. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, L. Moscadelli, Y. Xu, B. Zhang, M. Sato, et al.), *Astrophys. J.* **700**, 137 (2009).
32. Рид и др. (M.J. Reid, N. Dame, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
33. Сакаи и др. (N. Sakai, T. Nagayama, H. Nakanishi, N. Koide, T. Kurayama, N. Izumi, T. Hirota, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **72**, 53 (2020).
34. Сакаи и др. (N. Sakai, B. Zhang, S. Xu, D. Sakai, Y. Tamura, T. Jike, T. Jung, C. Oh, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **75**, 208 (2023).
35. Сюй и др. (Y. Xu, S.B. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, K.M. Menten, T.M. Dame, B. Zhang, A. Brunthaler, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 9 (2021).
36. Туласидхаран и др. (L. Thulasidharan, E. D'Onghia, E. Poggio, R. Drimmel, J.S. Gallagher III, C. Swiggum, R.A. Benjamin, and J. Alves), *Astron. Astrophys.* **660**, 12 (2022).
37. Цукер и др. (C. Zucker, J. Alves, A. Goodman, S. Meingast, and P. Galli), *Protostars and Planets VII*, ASP Conf. Ser., Vol. 534, Proc. conf. held 10–15 April 2023 at Kyoto, Japan. Eds. S.-I. Inutsuka, Y. Aikawa, T. Muto, K. Tomida, and M. Tamura. San Francisco: Astron. Soc. Pacific, p. 43 (2023).
38. Хайленд и др. (L.J. Hyland, M.J. Reid, G. Orosz, S.P. Ellingsen, S.D. Weston, J. Kumar, R. Dodson, et al.), *Astrophys. J.* **953**, 21 (2023).
39. Хайленд и др. (L.J. Hyland, S.P. Ellingsen, M.J. Reid, J. Kumar, and G. Orosz), *Cosmic Masers: Proper Motion toward the Next-Generation Large Projects*. Proceedings IAU Symposium No. 380, 2024, T. Hirota, H. Imai, K. Menten, and Y. Pihlstrom, eds. (2024).
40. Хирота и др. (VERA collaboration, T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **70**, 51 (2020).
41. Хонма и др. (M. Honma, T. Nagayama, K. Ando, T. Bushimata, Y.K. Choi, T. Handa, T. Hirota, H. Imai, et al.), *PASJ* **64**, 136 (2012).
42. Эденхофер и др. (G. Edenhofer, C. Zucker, P. Frank, A.K. Saydjari, J.S. Speagle, D. Finkbeiner, and T.A. En?lin), *Astron. Astrophys.* **685**, A82 (2024).
43. Энглмайер и др. (P. Englmaier, M. Pohl, and N. Bissantz), arXiv: 0812.3491 (2008).
44. Ю, Хо (S.-Y. Yu, L.C. Ho), *Astrophys. J.* **871**, 194 (2019).