

Изучение структуры и кинематики Галактики по данным РСДБ-астрометрии мазеров и радиозвезд

В.В. Бобылев^{1,*}, А.Т. Байкова¹

¹ГАО РАН

**e-mail*: vbobylev@gaoran.ru

Аннотация

В последние годы радиоинтерферометрические наблюдения достигли высокой точности в определении абсолютных значений тригонометрических параллаксов и собственных движений источников мазерного излучения и радиозвезд. Ошибка определения тригонометрических параллаксов этих объектов составляет в среднем около 10 микросекунд дуги, что позволяет уверенно изучать геометрические и кинематические свойства распределения звезд, расположенных на больших расстояниях от Солнца, вплоть до центра Галактики. В настоящей статье дан обзор основных результатов изучения структуры и кинематики Галактики, которые были получены различными научными коллективами с использованием РСДБ-наблюдений мазеров и радиозвезд. Основное внимание уделено результатам изучения Галактики, полученным авторами настоящей работы.

Введение

Мазерное излучение возникает в непосредственной близости от молодых формирующихся звезд, а также уже проэволюционировавших 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 (ОН) мазеры с частотой 1.6 ГГц, мазеры на метаноле (CH₃ОН) с частотой 6.7 и 12.2 ГГц, мазеры на парах воды (H₂O) с частотой 22 ГГц или мазеры на монооксиде кремния (SiO) с частотой 43 ГГц.

Источники мазерного излучения, связанные с очень молодыми звездами и протозвездами, расположенными в областях активного звездообразования, представляют огромный интерес для изучения структуры и кинематики Галактики. В первую очередь, это связано с тем, что в последнее время удается с высокой точностью измерять тригонометрические параллаксы и собственные движения таких объектов. Для этого проводятся наблюдения с применением радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ). Ценность радионаблюдений заключается в том, что им не препятствует поглощение излучения межзвездной пылью.

С 2000 года начались регулярные РСДБ-наблюдения мазеров в областях активного звездообразования с целью определения их высокоточных абсолютных тригонометрических параллаксов и собственных движений. Помимо основного источника обязательно наблюдались несколько опорных внегалактических объектов (квазаров), расположенных не далее $\sim 2.5^\circ$ от целевого объекта. Для уверенного получения параллактического эллипса требуются длительные наблюдения, желательно плотные. Однако мазерные пятна не отличаются стабильностью. Бывает, что за короткое время одни пятна в наблюдаемом источнике затухают, другие неожиданно появляются.

Внутренние движения в оболочках звезд-хозяев достигают скоростей в нескольких десятках км/с. Поэтому для определения надежных средних значений скоростей источника необходимо отслеживать как можно большее количество мазерных пятен.

Тем не менее, в 2006 году появились (Xu et al., 2006; Nachisuka et al., 2006) первые результаты определения высокоточных абсолютных параллаксов и собственных движений мазерных источников в области звездообразования W3 (OH), которая расположена в рукаве Персея. К настоящему времени таких определений для различных областей в Галактике насчитывается около 200 (Reid et al., 2019; Hirota et al., 2020).

Мазеры, связанные с массивными молодыми звездами, имеют огромную светимость, поэтому их можно наблюдать в отдаленных областях Галактики. Более того, известны мегамазеры, наблюдаемые в других галактиках (Gao et al., 2017). Для изучения структуры и кинематики Галактики представляют интерес и результаты РСДБ-наблюдений молодых радиозвезд в континууме. Это в основном маломассивные звезды типа Т Тельца, расположенные в Местном рукаве. Имеются также высокоточные РСДБ-наблюдения в континууме массивных двойных звезд высокой светимости, компаньонов черных дыр, например, звезда V404 Cyg (Miller-Jones et al., 2009) или GRS 1915+105 (Reid et al., 2014).

В итоге, на данный момент опубликованы более 250 РСДБ-измерений абсолютных параллаксов и собственных движений мазеров и радиозвезд. Для всех этих объектов известны значения их системных лучевых скоростей, которые в основном измерены не по мазерным, относительно широким спектральным линиям, а по более узким линиям излучения окружающих источник газовых облаков (по линиям CO).

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 Reid et al. (2009), Bobylev, Bajkova (2010), Honma et al. (2012), Rastorguev, et al. (2017), Reid et al. (2019), Hirota et al. (2020), Bobylev, Bajkova (2022). Интерес представляет также работа Immer, Rygl (2022), где дано детальное описание параметров спиральной структуры, полученных по мазерам.

В настоящей работе дан обзор основных результатов изучения структуры и кинематики Галактики, которые были получены различными научными коллективами с использованием РСДБ-наблюдений мазеров и радиозвезд, авторами настоящей статьи в частности. Это такие параметры, как угловая скорость вращения Галактики Ω_0 и ее производные Ω'_0 , Ω''_0 , расстояние от Солнца до центра Галактики R_0 , геометрические и кинематические параметры галактической спиральной волны плотности, а также амплитуды возмущений вертикальных положений и вертикальных скоростей звезд тонкого диска Галактики.

1 РСДБ-наблюдения

Результаты РСДБ-наблюдений мазеров, ассоциируемых с молодыми звездами и протозвездами, объединены в обзорном проекте BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey ¹). Проект нацелен на определение высокоточных расстояний до областей звездообразования, изучение строения, кинематики и динамики Галактики. Важнейшим вкладчиком здесь является американская решетка VLBA, состоящая из десяти 25-метровых антенн с максимальной базовой линией более 8000 км. Наблюдения охватывают 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 обзор BeSSeL является европейская РСДБ-сеть EVN (European VLBI Network). Здесь самые длинные базовые линии составляют около 9000 км, а самой большой в решетке является 100-метровая антенна в Эффельсберге. Наблюдения ведутся на частотах от 6.7 до 22.2 ГГц.

В Японии выполняются РСДБ-наблюдения мазеров по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry ²). Интерферометр состоит из четырех 20-метровых антенн, расположенных по всей Японии, что обеспечивает базовую длину от 1020 до 2270 км. Выполняются наблюдения H₂O-мазеров на частоте 22.2 ГГц, реже, SiO-мазеров на частоте 43.1 и 42.8 ГГц. Важнейшим 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 производятся в начале и конце сессии путем переадресации антенн, что потом требует дополнительных усилий для учета атмосферных искажений. Отметим, что астрометрическая точность тем лучше, чем выше частота наблюдений. Т.о., РСДБ-наблюдения, выполненные по программе VERA, являются наиболее точными по сравнению с наблюдениями, полученными в рамках остальных программ.

Недавно начала работать восточноазиатская РСДБ-сеть, EAVN (East Asian VLBI Network ³). Здесь 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 H₂O-мазеров на частоте 22.2 ГГц. Результаты наблюдений источника G 034.84–00.95 отражены в работе Sakai et al. (2022).

Известен также первый результат РСДБ-измерения параллакса источника G 339.884–1.259, полученный с помощью радиоинтерферометра LBA (Long Baseline Array) в Австралии (Krishnan et al., 2015). Интерферометр состоял из пяти антенн большого диаметра (более 20 метров), наблюдались метанольные мазеры на частоте 6.7 ГГц.

Помимо мазеров интерес представляют РСДБ-наблюдения молодых радиозвезд в континууме. В настоящее время примерно для 60 звезд, наблюдаемых по программе GOBELINS (Ortiz-León et al., 2017) на частоте 5 и 8 ГГц, имеется полная информация — измерены их абсолютные тригонометрические параллаксы и собственные движения, а также известны их лучевые скорости.

На рис. 1 дан пример РСДБ-наблюдений по программе VERA H₂O-мазеров, связанных

¹<http://bessel.vlbi-astrometry.org>

²<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

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

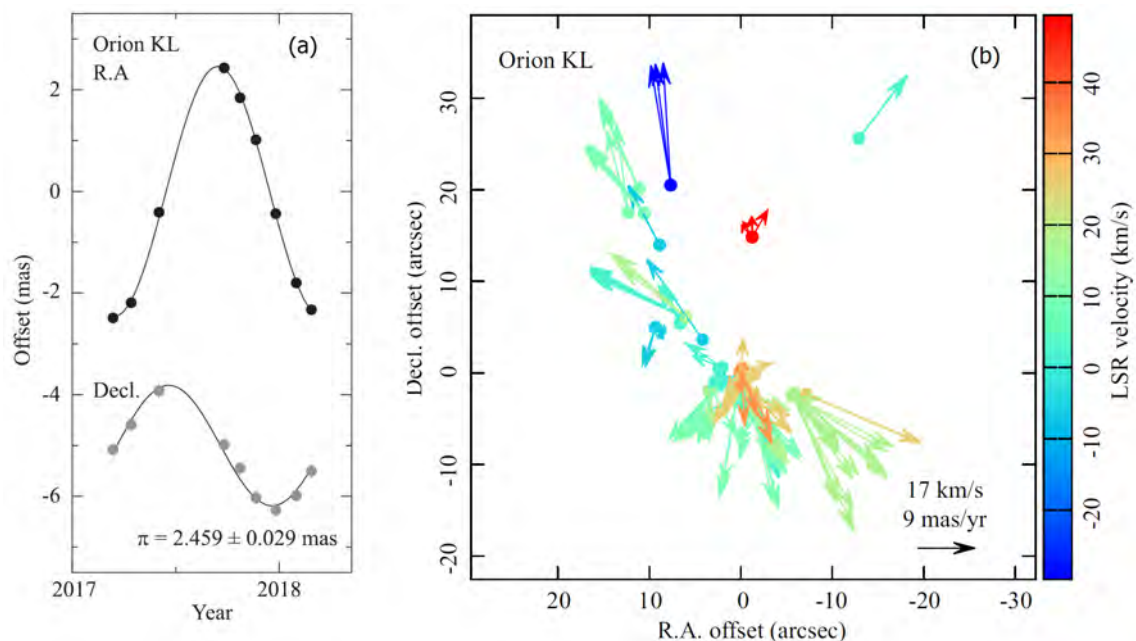


Рис. 1: Пример РСДБ-наблюдений по программе VERA H_2O -мазеров в области Orion BN/KL. Периодические изменения координат α и δ после удаления трендов, описывающих собственные движения центра источника (а). Векторы относительных собственных движений индивидуальных мазерных пятен вокруг источника (б). Лучевые скорости даны относительно местного стандарта покоя (LSR, Local Standard of Rest). Рисунок взят из работы Nagayama et al. (2020).

с радиоисточником в области Orion BN/KL (Asaki et al., 2010). Видим, что распределение индивидуальных мазерных пятен в области источника отнюдь не симметричное. Векторы скоростей на рис. 1(b) отражают внутреннюю кинематику объекта.

Для определения тригонометрического параллакса целевого источника требуется 1.5–2 года регулярных наблюдений. Как уже было отмечено, первые результаты РСДБ-наблюдений мазеров опубликованы в 2006 году. Уже в 2009 накопилось достаточно таких измерений для использования их для оценки параметров вращения Галактики (Reid et al., 2009). В настоящее время РСДБ-методом уже измерены абсолютные (с привязкой к внегалактическим опорным источникам) тригонометрические параллаксы и собственные движения более 200 мазеров. Достигнутая ошибка определения тригонометрических параллаксов составляет в среднем около 10 микросекунд дуги. Это позволяет уверенно (с ошибкой менее 10%) анализировать объекты, расположенные от Солнца до 10 кпк, т.е., вплоть до центра Галактики.

На рис. 2 отражены результаты РСДБ-наблюдений с использованием американской решетки VLBA в радиообсерватории NRAO (National Radio Astronomy Observatory) мазеров в оболочке красного сверхгиганта S Per (Asaki, et al., 2010). На рис. 2(a) можно видеть, что более 40 мазерных пятен очень равномерно распределены в области радиусом около 50 мсд (миллисекунды дуги) вокруг центра наблюдаемой оболочки, а векторы остаточных скоростей отлично указывают на положение центра, который отмечен крестом. На рис. 2(b) отмечено положение хорошо известного двойного рассеянного звездного скопления h и χ Персея, членами которого являются очень молодые OB-звезды. А главное — совсем рядом со звездой S Per расположен внегалактический радиоисточник KR 143, привязка к которому служит для определения абсолютных значений тригонометрических параллаксов и собственных движений. В поле зрения имеется еще один внегалактический радиоисточник — ICRF 0244+624, достаточно далеко от S Per, но в работе Asaki, et al., (2010) он тоже

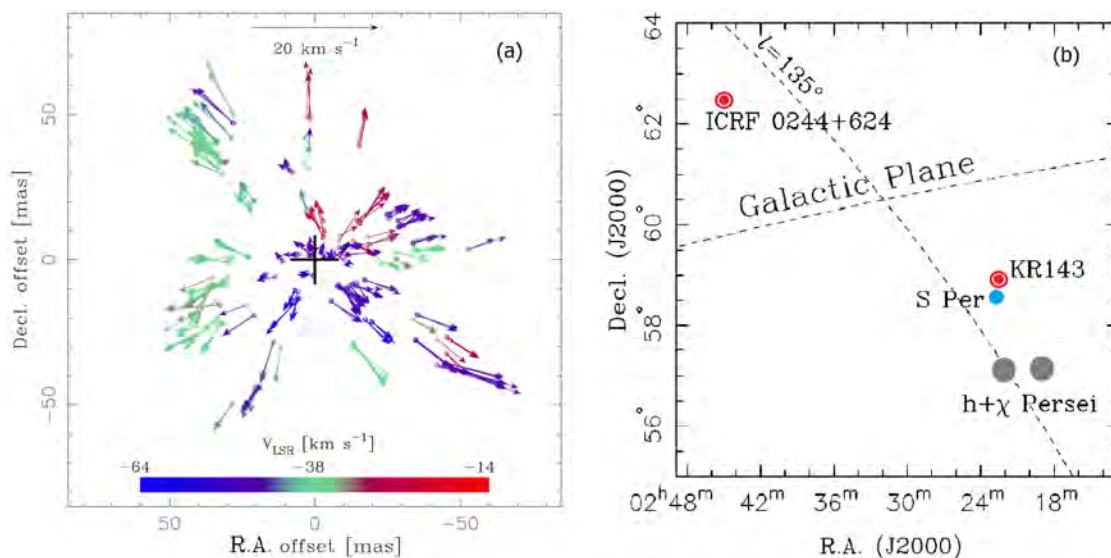


Рис. 2: Пример РСДБ-наблюдений H_2O -мазеров в оболочке красного сверхгиганта S Per с решеткой VLBA. Векторы относительных собственных движений индивидуальных мазерных пятен вокруг источника (а), положение S Per на небесной сфере, рядом с внегалактическим радиоисточником KR 143 (б). Рисунок взят из работы Asaki et al. (2010).

был использован для учета тропосферной задержки и контроля стабильности источника KR 143.

Мониторинг H_2O -мазеров вокруг S Per осуществлялся Asaki et al., (2010) в течении шести лет. РСДБ-наблюдения велись на частоте 22 ГГц. В итоге, был получен первоклассный результат, $\pi = 0.413 \pm 0.017$ мсд, $\mu_{\alpha} \cos \delta = -0.49 \pm 0.23$ мсд/год и $\mu_{\delta} = -1.19 \pm 0.20$ мсд/год. Т.о., оценка гелиоцентрического расстояния до S Per составила $2.42^{+0.11}_{-0.09}$ кпк, а также было найдено совсем небольшое отклонение от круговой скорости вращения вокруг центра Галактики около 12 км/с (это пекулярная скорость звезды).

Наиболее сложную и запутанную наблюдаемую картину дают мазеры, связанные с формирующимися протозвездами и самыми молодыми звездами. Здесь в одной области присутствуют мазеры, связанные с вращающимся вокруг звезды диском, мазеры в джете, мазеры в окружающей среде и др. На рис. 3 дан пример наблюдения H_2O -мазеров, связанных с очень молодой формирующейся массивной ($5.6 \pm 2 M_{\odot}$) звездой IRAS 21078+5211, имеющей диск и замагниченный джет. При наличии достаточного количества мазерных пятен с измеренными лучевыми скоростями и при благоприятной ориентации источника, наблюдаемая картина поддается расшифровке, что и было сделано в недавней работе Moscadelli et al. (2022).

Пока имеется один недостаток — практически все наблюдения мазеров и радиозвезд выполнены из северного полушария Земли. Поэтому в проекции на Галактическую плоскость пока остается непокрытым источниками четвертый галактический квадрант.

На рис. 4 дан пример распределения мазеров и радиозвезд в проекции на галактическую плоскость XY . Для построения рисунка была использована выборка из 256 объектов, из которой были отобраны 204 мазера с относительными ошибками параллакссов менее 15%. Использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^{\circ}$ дан согласно работе Bobylev, Vajkova

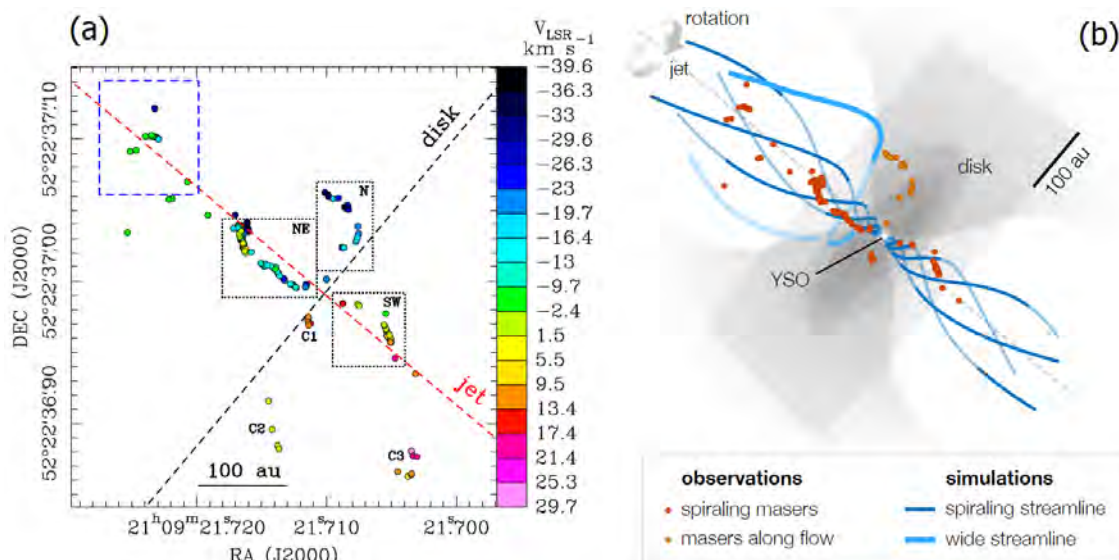


Рис. 3: Распределение на небесной сфере H_2O -мазеров, связанных с радиоисточником IRAS 21078+5211 (а), положение этих мазерных пятен вместе с предлагаемой моделью диска и джета (б). Рисунок взят из работы Moscadelli et al. (2022).

(2014), здесь он построен со значением расстояния от Солнца до оси вращения Галактики $R_0 = 8.1$ кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие четыре спиральные рукава: I — Щита, II — Килья-Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав.

2 Структура и кинематика Галактики

Для изучения динамики Галактики важнейшее значение имеет характер кривой вращения. На ее основе оценивается масса Галактики, характер распределения плотности вещества по всем направлениям в Галактике, изучаются кинематические свойства различных галактических подсистем и др. В частности, мазеры, связанные с молодыми звездами и протозвездами, представляют особый интерес. Они являются представителями экстремально тонкого диска Галактики, максимально быстро вращаются вокруг оси вращения Галактики.

Для построения кривой вращения Галактики важны такие величины как расстояние от Солнца до центра Галактики R_0 (точнее от Солнца до оси вращения Галактики), угловая и линейная скорости вращения на околосолнечном расстоянии Ω_0 и V_0 , при этом $V_0 = R_0\Omega_0$. Для оценки значений этих параметров используют различные подходы. Иногда по данным наблюдений оценивают непосредственно линейную скорость вращения и ее производные (Reid et al., 2009; Hirota et al., 2020). Более распространен метод оценивания угловой скорости вращения и ее производных (Rastorguev et al., 2017; Bobylev et al., 2022).

2.1 Расстояние от Солнца до центра Галактики

В таблице 1 даны оценки расстояния R_0 , а также скоростей Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 и V_0 , найденные по различным выборкам мазеров и радиозвезд. Здесь имеется в виду следующее разложение угловой скорости вращения Ω в ряд до членов соответствующего порядка малости r/R_0 :

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega'_0(R - R_0) + \Omega''_0(R - R_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

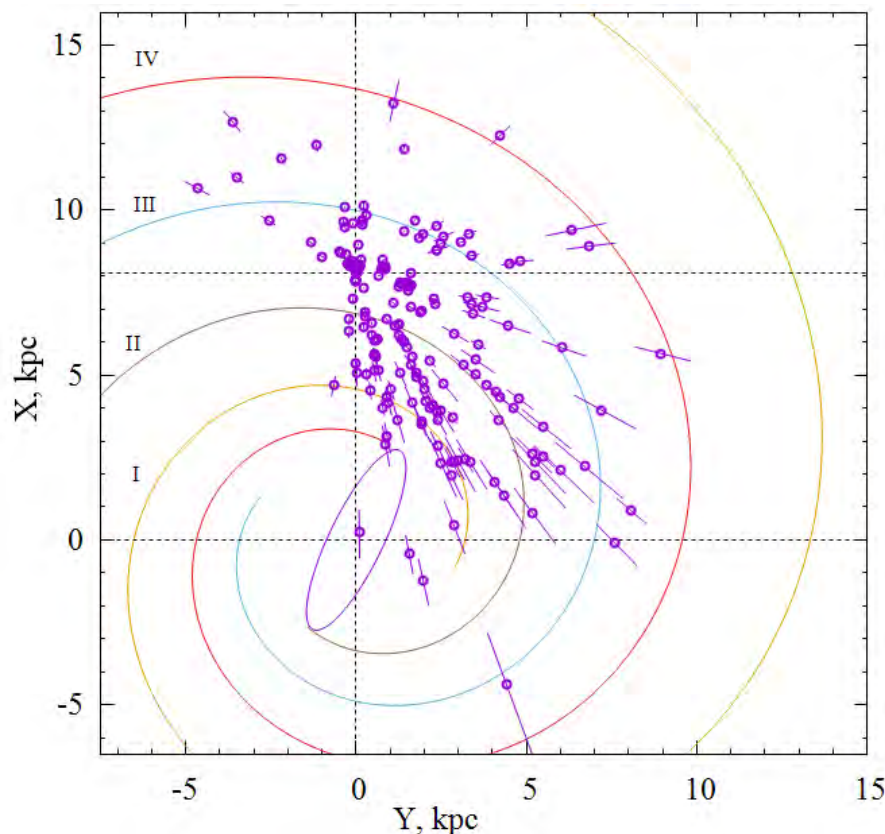


Рис. 4: Распределение мазеров и радиозвезд с ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% в проекции на галактической плоскости XY , показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, отмечен центральный галактический бар, Солнце расположено в точке $(X, Y) = (8.1, 0)$ кпк.

где r — гелиоцентрическое расстояние звезды, которое вычисляется через тригонометрический параллакс $r = 1/\pi$, R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Иногда применяют разложение угловой скорости вращения Ω полиномом по обратным степеням R (Loktin, Porova, 2019).

Практически все значения, указанные в таблице 1, были найдены одновременно, т.е., R_0 также выступало в роли искомого неизвестного при решении кинематических уравнений. Правда, в каждой из указанных работ уравнения были несколько различного вида. Мазеры, расположенные во внутренней области Галактики ($R < 4$ кпк), где имеется заметное влияние центрального бара, не рассматривались.

Результаты определения R_0 (первые пять строк таблицы 1) можно сравнить с наиболее надежной современной оценкой, полученной из анализа шестнадцатилетнего ряда наблюдений движения звезды S2 вокруг массивной черной дыры Sgr A* в центре Галактики $R_0 = 8.178 \pm 0.013$ (стат.) ± 0.022 (сист.) кпк (Abuter et al., 2019). Правда, в последней публикации этого коллектива (Abuter et al., 2021) показано наличие инструментальных aberrаций. Поэтому все предыдущие оценки коллаборации, начиная с 2018 года, были пересмотрены, и предложено уточненное значение $R_0 = 8.275 \pm 0.009$ (стат.) ± 0.033 (сист.) кпк.

Отметим, что в работе Bobylev, Vajkova (2021) значение $R_0 = 8.15 \pm 0.11$ кпк было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок, которые были получены с 2011 по 2021 годы. А значение $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк было ре-

Таблица 1: Оценки расстояния R_0 , скоростей Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 и V_0 , найденные по мазерам и радиозвездам.

R_0 кпк	n_*	Ω_0 км/с/кпк	Ω'_0 км/с/кпк ²	Ω''_0 км/с/кпк ³	V_0 км/с	Ref
8.03 ± 0.12	93	29.7 ± 0.5	-4.20 ± 0.11	0.73 ± 0.03	238 ± 6	(1)
8.19 ± 0.12	131	28.64 ± 0.53	-4.00 ± 0.09	1.28 ± 0.04	235 ± 7	(2)
8.15 ± 0.15	199	28.95 ± 0.27			236 ± 7	(3)
7.92 ± 0.16	99	28.63 ± 0.26			227 ± 5	(4)
8.15 ± 0.12	256	29.01 ± 0.33	-3.90 ± 0.07	0.83 ± 0.03	236 ± 4	(5)
8.1 ± 0.1 *	150	30.18 ± 0.38	-4.37 ± 0.08	0.85 ± 0.04	244 ± 4	(6)

n_* – количество мазеров в выборке, (1) – Bajkova, Bobylev (2015), (2) – Rastorguev et al. (2017), (3) – Reid et al. (2019), (4) – Hirota et al. (2020), (5) – Bobylev et al. (2020), (6) – Bobylev, Bajkova (2022), (*) – R_0 принималось заранее заданым согласно рекомендации работы Bobylev, Bajkova (2021).

комендовано для практического использования. В целом, можем заключить, что оценки R_0 , найденные по мазерам, находятся в очень хорошем согласии с наиболее надежными современными оценкам этой величины.

2.2 Параметры вращения Галактики

Значения скоростей Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 и V_0 , указанные в таблице 1, были найдены в разное время по выборкам мазеров и радиозвезд. Анализируемые в этих работах мазеры и радиозвезды являются представителями наиболее молодой звездной популяции в Галактике. Видим, что вращаются они вокруг галактического центра с довольно большой скоростью.

На рис. 5 даны кривые вращения Галактики, построенные как для угловых скоростей вращения Ω_{circ} рис. 5(a), так и для линейных скоростей вращения V_{circ} рис. 5(b) мазеров и радиозвезд. Сплошной линией на обоих графиках показаны кривые вращения, найденные в работе Bobylev, Bajkova (2022) по выборке мазеров с ошибками параллакссов менее 10%. Пунктирными линиями на рис. 5(a) указаны границы доверительных областей, соответствующих уровню ошибок 1σ .

Красной пунктирной линией на рис. 5(b) дана кривая вращения, найденная в работе Reid et al. (2019), где она задана в табличном виде. Для ее построения Reid et al. (2019) использовали подход, который они называют построением двухпараметрической универсальной кривой вращения. Такой подход применяется для изучения вращения спиральных галактик (Persic et al., 1996). При построении рис. 5, мы добавили 8 км/с к данным Reid et al. (2019) для согласования с нашей кривой в точке R_0 (см. табл. 1). В целом, на рассматриваемом интервале расстояний R можем видеть хорошее согласие в поведении двух кривых вращения.

2.3 Вертикальное распределение вещества

Bobylev, Bajkova (2016b) использовали данные о зонах НШ, молекулярных облаках и метанольных мазерах для оценки параметров вертикального распределения в Галактике молодых объектов тонкого диска. Для этого использовались большие выборки с оценками кинематических расстояний. Было показано, что объекты Местного рукава заметно влияют на характер вертикального распределения. Отклонения от симметрии распределения

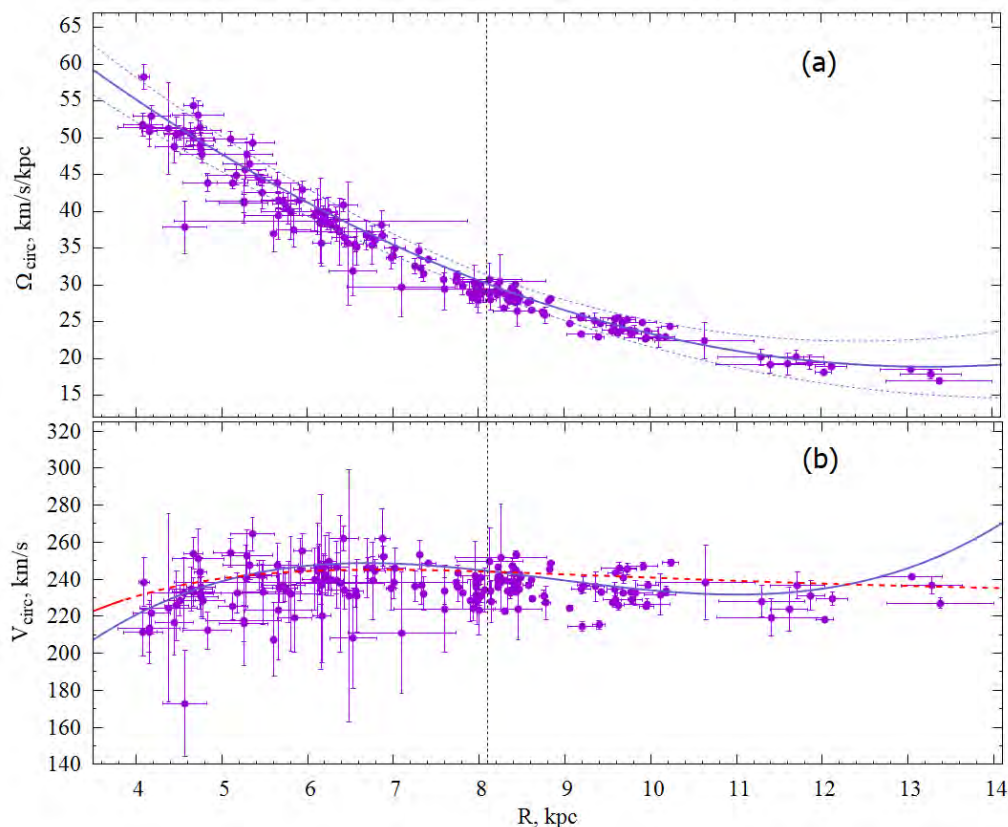


Рис. 5: Угловые скорости вращения Ω_{circ} (a) и линейные скорости вращения V_{circ} (b) мазеров в зависимости от расстояния R , вертикальной линией отмечено положение Солнца, см. также текст.

особенно заметны в выборке мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, где велика доля мазеров, принадлежащих Местному рукаву. В итоге, объекты, расположенные внутри Местного рукава были исключены из рассмотрения.

В случае экспоненциального распределения плотности, наблюдаемое частотное распределение объектов вдоль координатной оси Z описывается выражением следующего вида:

$$N(Z) = N \exp\left(-\frac{|Z - Z_{\odot}|}{h}\right), \quad (2)$$

где N — нормировочный коэффициент.

В модели самогравитирующего изотермального диска наблюдаемое частотное распределение объектов вдоль оси Z описывается формулой следующего вида (Spitzer, 1942):

$$N(Z) = N \operatorname{sech}^2\left(\frac{Z - Z_{\odot}}{\sqrt{2} h}\right). \quad (3)$$

Необходимо учитывать при сравнении полученных результатов, что в модели (3) некоторые авторы используют различающиеся коэффициенты в знаменателе, либо двойку $N(Z) = N \operatorname{sech}^2[(Z - Z_{\odot})/2h]$ (Maiz-Apellániz, 2001), либо единицу $N(Z) = N \operatorname{sech}^2[(Z - Z_{\odot})/h]$ (Marshall et al., 2006).

На основе модели (3), по объектам, расположенным внутри солнечного круга ($R \leq R_0$), были получены оценки возвышения Солнца над плоскостью симметрии диска Z_{\odot} и значение вертикальной шкалы диска h . Были получены следующие оценки: по выборке из

639 метанольных мазеров $Z_{\odot} = 5.7 \pm 0.5$ пк и $h = 24.1 \pm 0.9$ пк, по 878 зонам НШ $Z_{\odot} = 7.6 \pm 0.4$ пк и $h = 28.6 \pm 0.5$ пк, по 538 гигантским молекулярным облакам $Z_{\odot} = 10.1 \pm 0.5$ пк и $h = 28.2 \pm 0.6$ пк.

В случае экспоненциального распределения плотности (2) по мазерам было найдено значение $h = 26.5 \pm 0.7$ пк. Это значение немного больше $h = 19 \pm 2$ пк, найденного по выборке из 199 мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами в работе Reid et al. (2019). Кроме того, Reid et al. (2019) нашли значение $Z_{\odot} = 5.5 \pm 5.8$ пк, которое не противоречит нашей более точной оценке $Z_{\odot} = 5.7 \pm 0.5$ пк.

Оценки h показывают, что мазеры являются представителями популяции экстремально тонкого диска. Например, полученное на основе модели (2) значение шкалы высот по огромной выборке классических цефеид (со средним возрастом ~ 100 млн лет), расположенных внутри солнечного круга, $h = 73.5 \pm 3.2$ пк (Skowron, 2019) значительно превосходит найденное по мазерам.

3 Спиральная волна плотности

При анализе выборки из 28 мазеров, в работе Bobylev, Vajkova (2010) впервые было показано, что отклонения скоростей мазеров от кривой вращения Галактики можно объяснить влиянием галактической спиральной волны плотности. В работе Stepanishchev, Bobylev (2011) из анализа этой выборки было найдено, что значения пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя существенным образом зависят от значения фазы Солнца в спиральной волне плотности.

3.1 Галактический спиральный узор

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно описать следующим уравнением:

$$R = R_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan i}, \quad (4)$$

где θ — позиционный угол звезды: $\tan \theta = y / (R_0 - x)$, где x, y — гелиоцентрические галактические прямоугольные координаты звезды, причем ось x направлена от Солнца к галактическому центру, а направление оси y совпадает с направлением галактического вращения; θ_0 — некоторый произвольно выбранный начальный угол; i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали).

Так как θ_0 константа, а приближенное значение $\tan i$ нам известно из предыдущих исследований, то в первом приближении можно принять $\theta_0 \tan i = \text{const}$. Теперь уравнение (4) после логарифмирования можно переписать так: $\ln(R/R_0) = \theta \tan i + \text{const}$, или в более удобном виде

$$\ln(R/R_0) = a\theta + b. \quad (5)$$

Как можно видеть, соотношение (5) является уравнением прямой линии на плоскости “позиционный угол – логарифм расстояния”. Решая методом наименьших квадратов систему условных уравнений отдельно для каждого отрезка спирального рукава, можем найти две величины: a и b . Очевидно, что $a = \tan i$. Теперь предположим, что $\theta = 0$, тогда находим величину $a_0 = R_0 e^b$ — место пересечения центром рассматриваемого спирального рукава оси X , направленной из центра Галактики и проходящей через Солнце. Т.е., параметр a_0

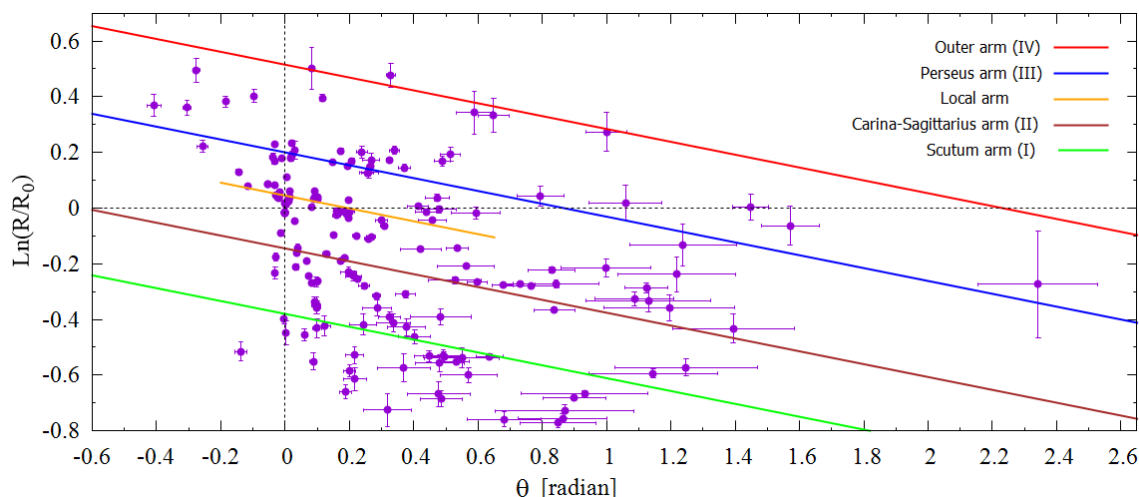


Рис. 6: Распределение мазеров и радиозвезд с ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% на плоскости “позиционный угол – логарифм расстояния”, наклон всех линий соответствует углу закрутки $i = -13^\circ$, Солнце находится в начале координат.

задает радиальное положение центра спирального рукава на оси X . Отметим, наконец, что в этом методе оценка угла закрутки i не зависит от количества спиральных рукавов m .

Значение угла закрутки спирального узора Галактики, i , по распределению мазеров оценивалось на основе соотношения (5) в работах Bobylev, Vajkova (2013; 2014). В итоге, по четырем отрезкам спиральных рукавов, была получена оценка $i = -13 \pm 1^\circ$.

На рис. 6 дано распределение 204 мазеров и радиозвезд на плоскости “позиционный угол – логарифм расстояния”. Это та же выборка, что использовалась для построения рис. 4. На рис. 6 можно различить Внешний рукав, рукав Персея, Местный и в меньшей степени рукав Киля-Стрельца. Выделить же объекты рукава Щита на этом рисунке невозможно.

До сих пор не существует общепринятой модели глобальной (grand design) спиральной структуры Галактики. Обсуждаются модели с различным количеством спиральных рукавов, с постоянным или переменным углом закрутки, симметричными или асимметричным характером спирали. Современные данные о распределении облаков нейтрального и ионизированного водорода, а также мазерных источников с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами говорят скорее о четырехрукавной модели с постоянным значением угла закрутки, заключенным в интервале $10\text{--}14^\circ$. Большая доказательная база в пользу именно четырехрукавного глобального узора собрана в обзорах Vallée (1995; 2002; 2008; 2017).

3.2 Скорости возмущений

Влияние спиральной волны плотности в радиальных V_R (по радиусу от оси вращения Галактики) и остаточных тангенциальных скоростях ΔV_{circ} является периодическим с амплитудой около $10\text{--}15$ км/с. Согласно линейной теории волн плотности (Lin, Shu, 1964) скорости возмущений удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} V_R &= -f_R \cos \chi, \\ \Delta V_{circ} &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\chi = m[\cot(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_{\odot} \quad (7)$$

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

$$2\pi R_0/\lambda = m \cot(|i|). \quad (8)$$

Для изучения периодических отклонений мазеров от кривой вращения Галактики в работе Vajkova, Bobylev (2012) был впервые предложен метод, основанный на периодограммном Фурье-анализе, который учитывает логарифмический характер спиральной структуры Галактики, а также позиционные углы галактических объектов. Метод позволяет проводить точный анализ скоростей объектов, распределенных в широком диапазоне галактоцентрических расстояний.

В работе Bobylev, Vajkova (2013) этот метод был использован при анализе выборки из 73 мазеров, которые распределены в широкой области Галактики, с галактоцентрическими расстояниями R : 0–20 кпк, была оценена линейная скорость вращения Галактики V_0 , и скорости возмущений f_R и f_{θ} в радиальном и тангенциальном направлении соответственно.

Оценки этих параметров регулярно, по мере увеличения выборки мазеров, уточняются различными авторами. В работе Bobylev, Vajkova (2022), последней в этом ряду, этот метод был использован при анализе выборки мазеров и радиозвезд, параллаксы которых определены с ошибками менее 10%. Значение найденной скорости вращения Галактики указана в таблице 1. Были определены также амплитуды скоростей возмущений $f_R = 6.7 \pm 1.1$ км/с и $f_{\theta} = 2.6 \pm 1.2$ км/с, длина волны возмущений $\lambda = 2.1 \pm 0.3$ кпк и фаза Солнца в спиральной волне $-148 \pm 15^\circ$.

В работе Bobylev, Vajkova (2015) впервые показано наличие периодических возмущений в вертикальных скоростях мазеров. В частности, была найдена амплитуда скорости вертикальных возмущений $f_W = 3.4 \pm 0.7$ км/с и длина волны возмущений $\lambda = 4.3 \pm 1.2$ кпк. Наличие вертикальных возмущений в скоростях мазеров подтверждено, например, в работах Bobylev et al. (2016a), Rastorguev et al. (2017). В упомянутой выше работе Bobylev, Vajkova (2022) по мазерам была получена новая оценка амплитуды возмущений вертикальных скоростей $f_W = 5.2 \pm 1.5$ км/с.

На рис. 7 даны результаты спектрального анализа выборки мазеров и радиозвезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%, который был выполнен в работе Bobylev, Vajkova (2022).

4 Другие задачи

4.1 Смещение нуля-пункта параллаксов Gaia

Известно, что тригонометрические параллаксы Gaia (Prusti et al., 2016) имеют небольшой сдвиг относительно неподвижных внегалактических источников (квazarов). Неболь-

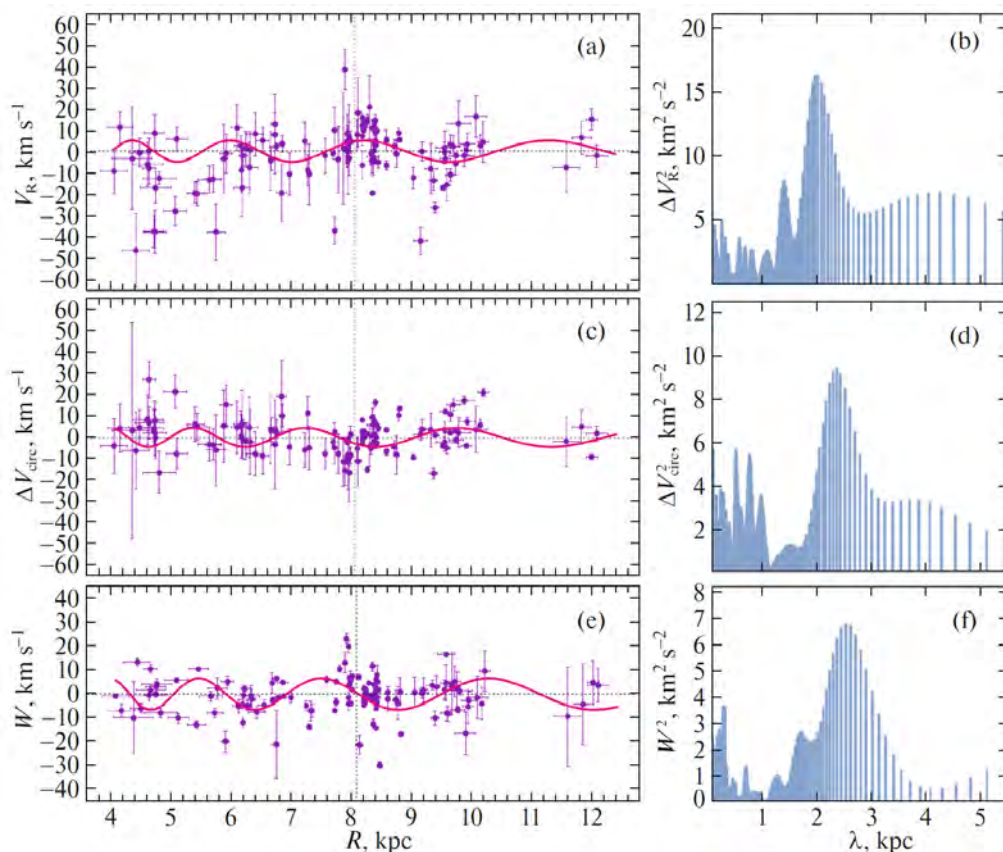


Рис. 7: Радиальные скорости мазеров V_R в зависимости от расстояния R (a) и их спектр мощности (b), остаточные скорости вращения мазеров ΔV_{circ} в зависимости от R (c) и их спектр мощности (d), вертикальные скорости мазеров W в зависимости от R (e) и их спектр мощности (f), сплошные волнистые линии отражают результаты спектрального анализа. Здесь использованы 134 мазерных источника с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%, расположенных не далее 5 кпк от Солнца, рисунок взят из работы Bobylev, Vajkova (2022).

пой сдвиг, трудно поддающийся учету, сохранился даже в версии Gaia DR3 (Vallenari et al., 2022).

Впервые в работе Lindegren et al. (2018) было отмечено наличие систематического сдвига $\Delta\pi = -0.029$ мсд в параллаксах Gaia DR2 (Brown et al., 2018) по отношению к инерциальной системе координат. Позже наличие такой поправки было подтверждено многими авторами на разнообразном материале, причем с очень хорошей точностью. Поправку $|\Delta\pi|$ необходимо прибавить к параллаксам звезд каталога Gaia. В этом случае расстояния до звезд, вычисленные по исправленным параллаксам, уменьшатся. Т.о., после учета поправки звезды становятся ближе к Солнцу.

Так, по 89 разделенным затменно-двойным звездам Stassun, Torres (2018) нашли поправку $\Delta\pi = -0.082 \pm 0.033$ мсд. Согласно этим авторам, относительные ошибки параллаксов использованных затменно-двойных в среднем не превышают 5% и не зависят от расстояния. Riess et al. (2018) получили оценку $\Delta\pi = -0.046 \pm 0.013$ мсд по выборке из 50 долгопериодических цефеид. Использовались фотометрические характеристики этих цефеид, измеренные с борта космического телескопа им. Хаббла. В работе Zinn et al. (2019) из сравнения расстояний около 3000 гигантов из каталога APOKAS-2 было найдено значение $\Delta\pi = -0.053 \pm 0.002$ мсд.

В работе Bobylev (2019) выполнена оценка параметров связи между оптической и ра-

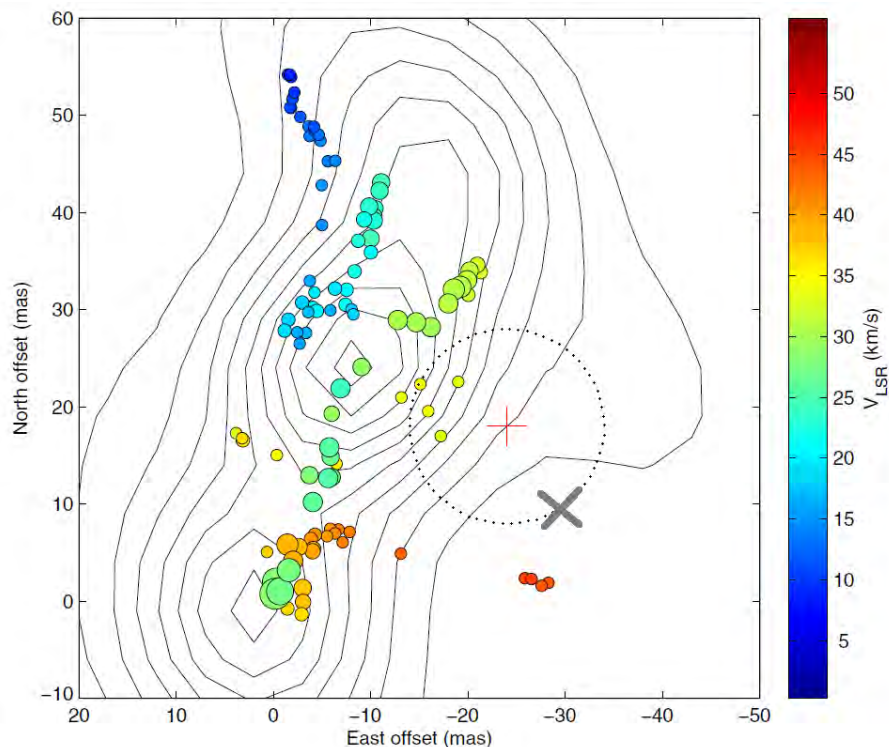


Рис. 8: Распределение мазерных пятен вокруг сверхгиганта VY CMa. Красным крестиком отмечено радиоположение центра звезды, кружком из пунктирных линий указана граница ее атмосферы размером 10 мсд, косым крестом показан центр оптического изображения звезды. Рисунок взят из работы Zhang et al. (2012).

дио системами по данным каталога Gaia DR2 и РСДБ-измерениям по выборке из 88 мазеров и радиозвезд. Для этой цели были использованы как мазеры, так и различные радиозвезды (как молодые, так и проэволюционировавшие гиганты асимметричной ветви), наблюдаемые в континууме. Была получена новая оценка систематического смещения между оптической и радиосистемами: $\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046$ мсд как средневзвешенное разностей параллаксов радиозвезд вида “Gaia-VLBI”. Как видно, результат получен с большой неопределенностью. Xu et al. (2019) повторили анализ Бобылева практически по той же выборке звезд. Однако они отдельно изучили различия молодых и старых, одиночных и кратных звезд. В итоге, по выборке из 34 молодых одиночных радиозвезд, эти авторы нашли $\Delta\pi = -0.075 \pm 0.029$ мсд. Еще раньше, из сравнения параллаксов 55 радиозвезд в поясе Гулда, Kounkel et al. (2018) определили $\Delta\pi = -0.073 \pm 0.034$ мсд.

Относительно большие ошибки оценок параметров связи между оптической и радио системами показывают, что имеется еще и проблема смещения между центрами изображения оптических и радиоизображений. При оптических наблюдениях одиночных звезд обычно фотоцентр лежит очень близко к направлению на физический центр звезды. Мазеры же зачастую распределены несимметрично в широкой газовой-пылевой оболочке звезды.

Примером несовпадения оптических и радиоизображений является сверхгигант VY CMa (Zhang et al., 2012), радиокарта которого дана на рис. 8. Видно, что мазерные пятна расположены несимметрично в очень широкой области вокруг звезды, причем на этом рисунке показана лишь часть мазерных пятен. Для нее разность параллаксов между радио и измерением в каталоге Gaia DR2 составила -6.772 ± 0.827 мсд (Bobylev, 2019). Однако, при сравнении с каталогом Gaia EDR3 разности параллаксов существенно уменьшилась (до

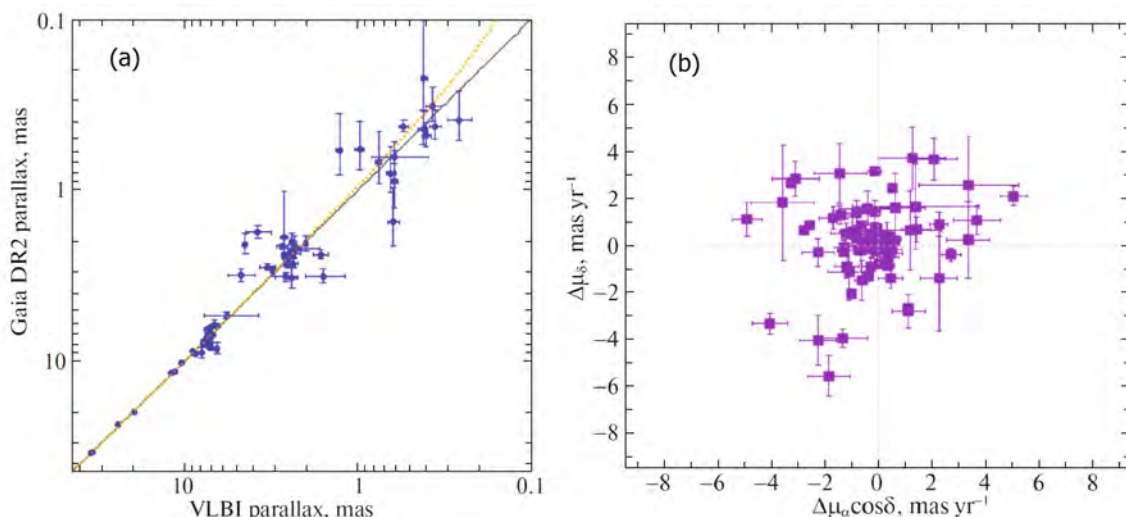


Рис. 9: Параллаксы радиозвезд из каталога Gaia DR2 в зависимости от их РСДБ-параллаксов, сплошная линия соответствует корреляции с коэффициентом 1 (a), разности собственных движений звезд вида “Gaia–VLBI” (b). Рисунок взят из работы Bobylev (2019).

значений менее 2.5 мсд), причем за счет улучшения оптических измерений.

Примером симметричного радиоизображения может служить сверхгигант S Per, результаты радионаблюдений которого даны на рис. 2. Для этой звезды разность параллаксов между радио и оптическим измерением составила -0.191 ± 0.123 мсд (Bobylev, 2019).

Для сравнения параллаксов Bobylev (2019) также использовал систему условных уравнений вида

$$\pi_{(\text{Gaia})} = a + b \cdot \pi_{(\text{VLBI})}, \quad (9)$$

из решения которой методом наименьших квадратов были получены оценки параметров a и b . В итоге было показано, что масштабный коэффициент b близок к единице, $b = 1.002 \pm 0.007$. На рис. 9(a) даны параллаксы радиозвезд из каталога Gaia DR2 в зависимости от их РСДБ-параллаксов, на котором красная пунктирная линия соответствует найденному решению.

Систематические ошибки, присутствующие в астрометрии и широкополосной фотометрии в каталоге Gaia EDR3, перешли в последнюю версию каталога — в Gaia DR3. В частности, анализ данных Gaia EDR3 позволил заключить, что значение смещения параллаксов Gaia DR3 относительно квазаров имеет величину ~ -0.017 мсд (Lindgren et al., 2021).

4.2 Взаимное вращение оптической и радио систем

Для определения скоростей взаимного вращения двух систем вокруг экваториальных осей координат $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ обычно используются уравнения связи следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_\alpha \cos \delta &= -\omega_x \cos \alpha \sin \delta - \omega_y \sin \alpha \sin \delta + \omega_z \cos \delta, \\ \Delta\mu_\delta &= +\omega_x \sin \alpha - \omega_y \cos \alpha, \end{aligned} \quad (10)$$

где в левых частях уравнений находятся разности собственных движений звезд вида “Gaia–VLBI”. В работе Bobylev (2019) была использована 81 разность собственных движений звезд, модули которых не превышают 6 мсд/год. Распределение этих разностей дано на

рис. 9(b). По ним были найдены следующие величины:

$$(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.14, 0.03, -0.33) \pm (0.15, 0.22, 0.16) \text{ мсд/год}, \quad (11)$$

на основе которых был сделан вывод об отсутствии значимо отличающихся от нуля скоростей взаимного вращения.

Lindgren (2020) составил выборку из 41 ярких звезд с собственными движениями из каталога Gaia DR2, имеющих также РСДБ-измерения. В итоге им были использованы 26 разностей собственных движений звезд, по которым были получены следующие оценки:

$$(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.07, -0.05, -0.01) \pm (0.05, 0.05, 0.07) \text{ мсд/год}. \quad (12)$$

Здесь вывод об отсутствии значимо отличающихся от нуля скоростей взаимного вращения еще более очевиден.

4.3 Масса Галактики

Мазеры с измеренными тригонометрическими параллаксами дают надежную оценку значения локальной скорости вращения Галактики V_0 на околосолнечном расстоянии. Поэтому в настоящее время эти данные широко используются для построения кривой галактического вращения. Современные кривые вращения Галактики строятся в очень широком диапазоне расстояний, вплоть до внешней границы Галактики ($R \sim 300$ кпк). Разумеется, для построения такой кривой используются кинематические данные о разнообразных объектах, цефеидах, шаровых скоплениях, карликовых галактиках-спутниках Млечного Пути и др. (Sofue 2012; Bhattacharjee et al., 2014).

В работе Vajkova, Bobylev (2017) данные о мазерах были использованы в задаче уточнения гравитационного потенциала Галактики для шести моделей потенциала. Все шесть являются осесимметричными трехкомпонентными моделями, состоящими из балджа, диска и гало темной материи. Был сделан вывод о том, что наилучшей из рассмотренных является модель III, в которой гало темной материи описывается соотношением NFW (Navarro, Frenk, White, 1997). В итоге масса Галактики, заключенная внутри сферы радиусом 200 кпк, была найдена равной $M_{200} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Еще лет десять назад оценки массы Галактики различались на порядки. В настоящее время, благодаря появлению массовых каталогов с высокоточными фотометрическими и кинематическими данными, разброс таких оценок существенно сократился. Масса Галактики, заключенная внутри сферы радиусом 200 кпк, по-разным оценкам, лежит в интервале значений $(0.5 - 1.5) \times 10^{12} M_{\odot}$ (см. рис. 14 в работе Wang et al. 2022).

Отметим последние публикации на эту тему. Bird et al. (2022) по звездам голубой горизонтальной ветви с данными из каталогов LAMOST, SDSS/SEGUE и Gaia нашли $M_{200} = (1.00^{+0.67}_{-0.33}) \times 10^{12} M_{\odot}$, а по К-гигантам получили оценку $M_{200} = (0.55^{+0.15}_{-0.11}) \times 10^{12} M_{\odot}$. В работе Wang et al. (2022) по шаровым скоплениям с собственными движениями из каталога Gaia EDR3 (Brown et al., 2021) был сделан вывод о том, что общая масса Галактики лежит в интервале $(0.54^{+0.81}_{-0.68} - 0.78^{+3.08}_{-1.97}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

4.4 Поправки за эффект Лутца-Келкера

Поправки за эффект Лутца-Келкера (Lutz, Kelker, 1973) играют важную роль при использовании тригонометрических параллаксов π звезд при оценивании гелиоцентрических расстояний r на их основе, $r = 1/\pi$. Как показано в работе Lutz, Kelker (1973) учет поправок становится необходимым при относительных ошибках определения параллаксов более 10–15%.

В работе Stepanishchev, Bobylev (2013) для выборки из 54 мазеров с РСДБ-параллаксами впервые (впервые для мазеров) были получены оценки поправок за эффект Лутца-Келкера. Наибольшей величины поправка была найдена для источника IRAS 16293–2422, правда этот источник оказался одним из самых близких к Солнцу. Поэтому введение найденной поправки, -1.175 мсд, критического влияния на определение, например, параметров галактического вращения, зависящих от расстояния, не оказало. Поправки за эффект Лутца-Келкера были также приняты во внимание в работе Rastorguev et al. (2017) при кинематическом анализе выборки из 131 мазера.

При относительных ошибках определения параллаксов менее 10% поправками за эффект Лутца-Келкера можно пренебречь. Поэтому мы считаем очень надежными результаты определения параметров вращения Галактики, которые были получены нами (Bobylev, Vajkova, 2022) при ограничениях на величину относительных ошибок параллаксов мазеров (см. табл. 1).

5 Местный рукав и волна Рэдклиффа

Вблизи Солнца известна волна Рэдклиффа, распространяющаяся вдоль Местного рукава. Впервые она была обнаружена из анализа распределения молекулярных облаков (Alves et al., 2020). Первые авторы этого научного коллектива являются представителями Института перспективных исследований Рэдклиффа в Кембридже, Массачусетс. Поэтому волну они назвали в честь родного института.

Волна Рэдклиффа представляет из себя узкую цепочку из молекулярных облаков, расположенную под наклоном около -30° к галактической оси Y . Главное свойство ее в том, что проявляется она в вертикальных координатах облаков Z . Согласно Alves et al. (2020) волна является затухающей, имеет длину волны около 2 кпк с максимальной амплитудой около 160 пк. Причем максимальное значение амплитуды наблюдается вблизи Солнца, в области пояса Гулда. Геометрические характеристики волны Рэдклиффа подтверждены по наблюдениям межзвездной пыли, звезд типа Т Тельца и ОВ-звезд. А вот кинематические и динамические свойства этой волны пока изучены плохо.

На рис. 10 даны вертикальные координаты выделенных в работе Alves et al. (2020) молекулярных облаков. Здесь они расположены вдоль оси Y' , которая ориентирована под углом -30° к галактической оси Y . На рисунке показан целый ряд моделей волны Рэдклиффа, которые были найдены в работе этих авторов.

В работе Bobylev, Vajkova (2022), Bobylev et al. (2022) показано, что мазеры, принадлежащие Местному рукаву, демонстрирует наличие волны Рэдклиффа. Всего 68 таких мазеров и радиозвезд были отобраны для анализа. На основе спектрального анализа по ним определены параметры волны Рэдклиффа, такие как длина волны $\lambda = 2.8 \pm 0.1$ кпк, амплитуда отклонения от плоскости симметрии $Z_{max} = 87 \pm 4$ пк. Впервые получена оцен-

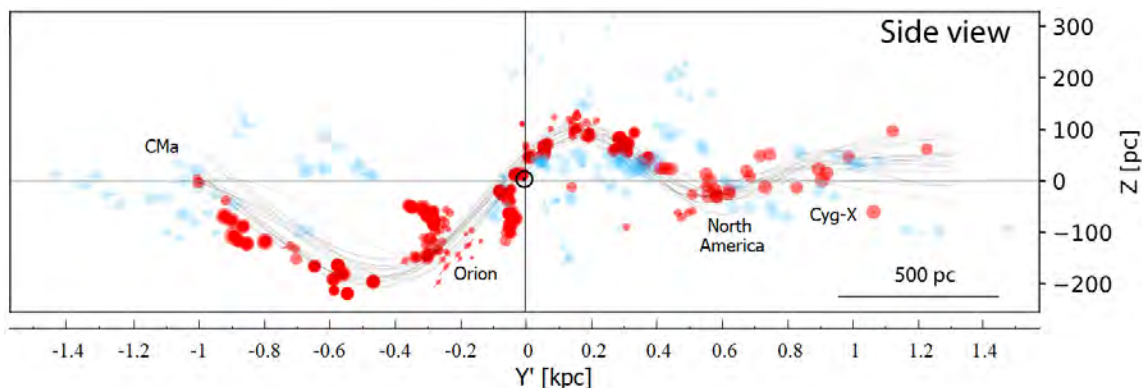


Рис. 10: Вертикальные координаты молекулярных облаков Z в зависимости от положения на оси Y' (эта ось расположена под углом -30° к галактической оси Y), красными кружками даны облака, трассирующие волну Рэдклифа, синими кружками даны облака поля, серыми пунктирными линиями даны модели волны Рэдклифа. Рисунок взят из работы Alves et al. (2020, к которому мы добавили более подробную шкалу Y').

ка амплитуды возмущения вертикальных скоростей $W = 5.1 \pm 0.7$ км/с с длиной волны $\lambda = 3.9 \pm 1.6$ кпк.

Результаты спектрального анализа отражены на рис. 11. Пунктирными линиями на рис. 11(a) и (с) показаны сглаженные средние значения данных. Хорошее согласие в поведении сплошных и пунктирных линий в околосолнечной области говорит о надежности проведенного спектрального анализа.

Заключение

Выделим наиболее важные результаты, полученные нами из анализа мазеров и радиозвезд с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями.

1). По мере увеличения выборки мазеров и радиозвезд регулярно уточняются параметры вращения Галактики. Речь идет о представителях молодой, наиболее быстро вращающейся вокруг галактического центра звездной фракции тонкого диска Галактики. В одной из последних работ в этом ряду, по выборке мазеров и радиозвезд с ошибками параллаксов менее 10%, линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк найдена равной $V_0 = 244.4 \pm 4.3$ км/с.

2). Дан обзор оценок геометрических характеристик спирального узора Галактики. В настоящее время считается, что вероятнее всего в Галактике реализуется четырехрукавный спиральный узор с постоянным углом закрутки i с величиной $10-14^\circ$.

3). Приведены результаты определения скоростей возмущения f_R и f_θ , вызванных влиянием галактической спиральной волны плотности на движение молодых звезд. Важно отметить, что такие возмущения найдены и в вертикальных скоростях мазеров, f_W .

4). Дан обзор оценок параметров вертикального распределения звезд в тонком диске Галактики. В частности, значение вертикальной шкалы диска h в предположении об экспоненциальном распределении вещества, найденное нами по метанольным мазерам, составляет 26.5 ± 0.7 пк.

5). Сделан небольшой обзор работ, посвященных уточнению гравитационного потенци-

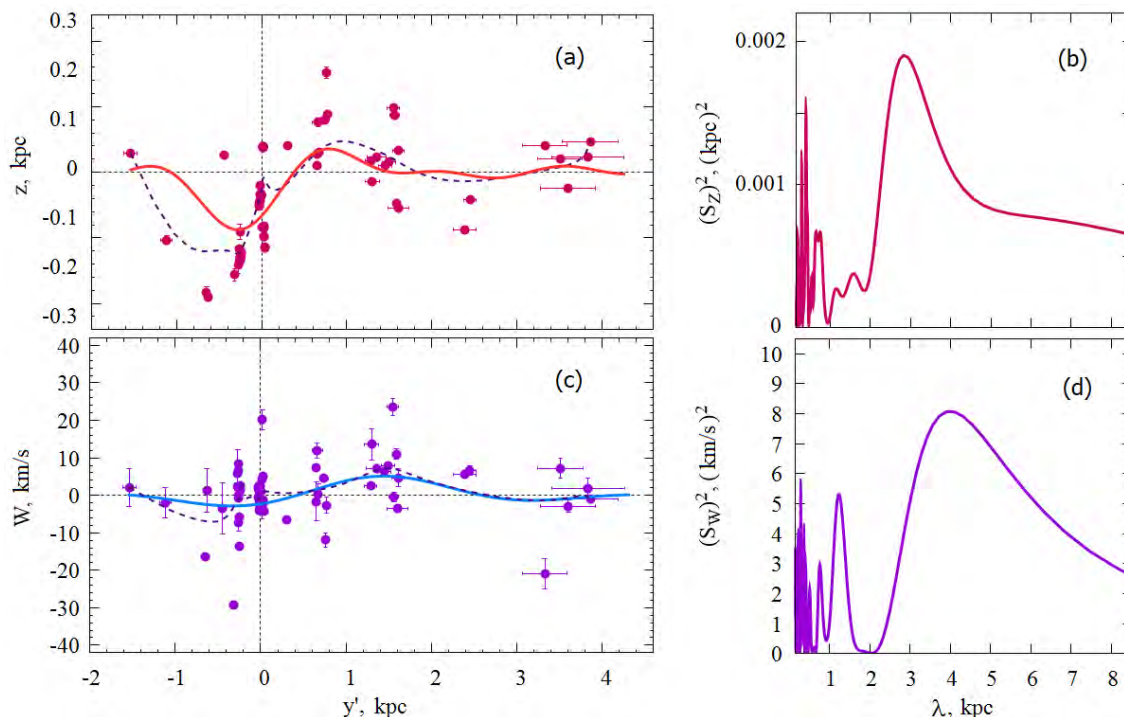


Рис. 11: Координаты мазеров Z в зависимости от расстояния Y' (a) и их спектр мощности (b), вертикальные скорости мазеров W в зависимости от расстояния Y' (c) и их спектр мощности (d), периодические кривые, показанные сплошными жирными линиями, отражают результаты спектрального анализа, пунктирными линиями показаны сглаженные средние значения. Рисунок взят из работы Bobylev et al. (2022).

ала и оценкам массы Галактики. Согласно современным оценкам, масса Галактики, заключенная внутри сферы радиусом 200 кпк, лежит в интервале значений $(0.5 - 1.5) \times 10^{12} M_{\odot}$.

6). Отмечены работы, посвященные мазерам и радиозвездам, принадлежащих Местному рукаву. Имеются свидетельства того, что они демонстрируют наличие волны Рэдклиффа. Найденные по ним длина волны и амплитуда отклонения от плоскости симметрии находятся в хорошем согласии с теми, что получены по молекулярным облакам в пионерской работе Alves et al. (2020). А в работе Bobylev et al. (2022) впервые по мазерам была определена амплитуда скорости вертикальных возмущений в волне Рэдклиффа, $W = 5.1 \pm 0.7$ км/с с длиной волны $\lambda = 3.9 \pm 1.6$ кпк.

7). Рассказано об использовании мазеров и радиозвезд с измеренными РСДБ-параллаксами для оценки смещения нуля-пункта параллаксов Gaia DR2 и определения параметров взаимного вращения радио и оптической систем.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abuter et al. (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, N. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **625**, L10 (2019).
2. Abuter et al. (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A59 (2021).
3. J. Alves, C. Zucker, A.A. Goodman, et al., *Nature* **578**, 237 (2020).

4. Y. Asaki, S. Deguchi, H. Imai, et al, *Astrophys. J.* **721**, 267 (2010).
5. A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **38**, 549 (2012).
6. A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, *Baltic Astron.* **24**, 43 (2015).
7. A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, *Open Astron.* **26**, 72 (2017).
8. S.A. Bird, X.-X. Xue, C. Liu, et al., *MNRAS* **516**, 731 (2022).
9. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *MNRAS* **408**, 1788 (2010).
10. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **39**, 759 (2013).
11. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
12. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *MNRAS* **447**, L50 (2015).
13. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, and K.S. Shirokova, *Baltic Astron.* **25**, 15 (2016).
14. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **42**, 182 (2016a).
15. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **42**, 210 (2016b).
16. V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **45**, 10 (2019).
17. V.V. Bobylev, O.I. Krisanova, and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **46**, 439 (2020).
18. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021).
19. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 376 (2022).
20. V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, and Yu.N. Mishurov, *Astron. Lett.* **48**, XXX (2022).
21. P. Bhattacharjee, S. Chaudhury, and S. Kundu, *Astrophys. J.* **785**, 63 (2014).
22. Brown et al. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
23. Brown et al. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1 (2021).
24. F. Gao, J.A. Braatz, M.J. Reid, et al., *Astrophys. J.* **834**, 52 (2017).
25. K. Hachisuka, A. Brunthaler, K.M. Menten, et al., *ApJ* **645**, 337 (2006).
26. M. Honma, T. Nagayama, K. Ando, et al., *PASJ* **64**, 136 (2012).
27. Hirota et al. (VERA collaboration, T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, et al.), *PASJ* **70**, 51 (2020).
28. K. Immer, K.L.J. Rygl, *Universe* **8**, 390 (2022).
29. V. Krishnan, S.P. Ellingsen, M.J. Reid, et al., *Astrophys. J.* **805**, 129 (2015).
30. M. Kounkel, K. Covey, G. Suarez, et al.), *Astron. J.* **156**, 84 (2018).
31. Lindegren et al. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 2 (2018).
32. L. Lindegren, *Astron. Astrophys.* **637**, C5 (2020).
33. Lindegren et al. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, U. Bastian, M. Biermann, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 4 (2021).
34. C.C. Lin, F.H. Shu, *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
35. A.V. Loktin, M.E. Popova, *Astrophys. Bull.* **74**, 270 (2019).
36. T.E. Lutz, D.H. Kelker, *PASP* **85**, 573 (1973).

37. J. Maiz-Apellániz, *Astron. J.* **121**, 2737 (2001).
38. D.J. Marshall, A.C. Robin, C. Reylé, et al. *Astron. Astrophys.* **453**, 635 (2006).
39. J.C.A. Miller-Jones, P.G. Jonker, V. Dhawan, et al., *Astrophys. J.* **706**, L230 (2009).
40. L. Moscadelli, A. Sanna, H. Beuther, arXiv: 2209.00432 (2022).
41. T. Nagayama, T. Hirota, M. Honma, et al., *PASJ* **72**, 51 (2020).
42. J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White, *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
43. G.N. Ortiz-León, L. Loinard, M.A. Kounkel, et al., *Astrophys. J.* **834**, 141 (2017).
44. M. Persic, P. Salucci, and F. Stel, *MNRAS* **281**, 27 (1996).
45. Prusti et al. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 1 (2016).
46. A.S. Rastorguev, N.D. Utkin, M.V. Zabolotskikh, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 122 (2017).
47. A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., *Astrophys. J.* **861**, 126 (2018).
48. M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, et al., *Astrophys. J.* **700**, 137 (2009).
49. M.J. Reid, J.E. McClintock, J.F. Steiner, et al., *Astrophys. J.* **796**, 2 (2014).
50. M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, et al., *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
51. N. Sakai, B. Zhang, S. Xu, et al., arXiv: 2211.12534 (2022).
52. D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, et al., *Science* **365**, 478 (2019).
53. Y. Sofue, *PASJ* **64**, 75 (2012).
54. L. Spitzer, *Astrophys. J.* **95**, 329 (1942).
55. K.G. Stassun, G. Torres, *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).
56. A.S. Stepanishchev, V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **37**, 254 (2011).
57. A.S. Stepanishchev, V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **39**, 185 (2013).
58. Vallenari et al. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al.), arXiv: 2208.00211 (2022).
59. J.P. Vallée, *Astrophys. J.* **454**, 119 (1995).
60. J.P. Vallée, *Astrophys. J.* **566**, 261 (2002).
61. J.P. Vallée, *Astron. J.* **135**, 1301 (2008).
62. J.P. Vallée, *New Astron. Review* **79**, 49 (2017).
63. J. Wang, F. Hammer, and Y. Yang, *MNRAS* **510**, 2242 (2022).
64. Y. Xu, M.J. Reid, X.W. Zheng, and K.M. Menten, *Science* **311**, 54 (2006).
65. S. Xu, B. Zhang, M.J. Reid, et al., *Astrophys. J.* **875**, 114 (2019).
66. B. Zhang, M.J. Reid, K.M. Menten, et al., *Astrophys. J.* **744**, 23 (2012).
67. J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello, *Astrophys. J.* **878**, 136 (2019).

Study of the structure and kinematics of the Galaxy according to
VLBI-astrometry of masers and radio stars

V.V. Bobylev, A.T. Bajkova

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

In recent years, radio interferometric observations have achieved high accuracy in determining the absolute values of trigonometric parallaxes and proper motions of maser radiation sources and radio stars. The error in determining the trigonometric parallaxes of these objects averages about 10 microarcseconds, which allows us to confidently study the geometric and kinematic properties of the distribution of stars located at great distances from the Sun, up to the center of the Galaxy. This article provides an overview of the main results of studying the structure and kinematics of the Galaxy, which were obtained by various scientific teams using VLBI observations of masers and radio stars. The main attention is paid to the results of studying the Galaxy obtained by the authors of this work.