

АСТРОНОМИЯ

УДК 524.6-34

НЕЛИНЕЙНОСТИ В ДВИЖЕНИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ МАЗЕРОВ*

*В. В. Бобылев*Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

По выборке из 114 галактических мазеров найдены параметры галактического вращения. Для принятого значения расстояния Солнца от центра Галактики $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк значения постоянных Орта составляют $A = -16.51 \pm 0.34$ км/с/кпк и $B = 12.75 \pm 0.49$ км/с/кпк, а линейная скорость вращения на околосолнечном расстоянии равна $V_0 = 243 \pm 6$ км/с. Анализ трехмерной кинематики этих мазеров показал, что помимо производных высших порядков в кривой галактического вращения, которые проявляют себя в плоскости xy , существенную роль имеют периодические возмущения во всех трех плоскостях, связанные с влиянием спиральной волны плотности. Библиогр. 22 назв. Ил. 5.

Ключевые слова: кинематика Галактики, мазеры.

1. Введение. Параметры галактического вращения неоднократно определялись многими авторами с использованием объектов, которые принадлежат различным структурным составляющим Галактики: по ионизованному и нейтральному водороду, по далеким ОВ-ассоциациям звезд и рассеянным скоплениям звезд. Галактические мазеры представляют большой интерес для изучения кинематики Галактики, так как их тригонометрические параллаксы измеряются средствами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) с высокой точностью, в среднем не хуже 10% [1].

Количество мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами уже превышает 100. Это позволяет изучать не только параметры вращения Галактики и влияние спиральной структуры (движения в плоскости xy), но и проверять наличие каких-либо кинематических особенностей в двух других плоскостях (xz и yz). Например, в движении далеких цефеид обнаруживается кинематическая связь с искривлением галактического диска [2], проявляющаяся в плоскости yz . Из анализа ОВ-звезд Бранхам [3] обнаружил значимо отличающиеся от нуля значения градиентов $\partial w/\partial z$ и $\partial^2 w/\partial^2 z$. Витязев и Цветков [4] сообщают о наличии значимо отличающихся от нуля внемоделльных по отношению к линейной модели Огородникова—Милна гармоник в движении звезд из различных каталогов.

* Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН П-21 «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

Целью настоящей работы является анализ трехмерной кинематики мазеров и определение рода нелинейности в их движении. Основная идея заключается в следующем. Вначале мы определим параметры кривой галактического вращения на основе нелинейного подхода по выборке галактических мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами. Затем исправим наблюдаемые пространственные скорости мазеров u, v за это вращение и проанализируем остаточные скорости u, v, w на основе линейной модели Огородникова—Милна для того, чтобы обнаружить возможные проявления нелинейностей в движении этих мазеров.

2. Данные. По литературным данным мы собрали информацию о координатах, лучевых скоростях, собственных движениях и тригонометрических параллаксах галактических мазерных источников, которые измерены методом РСДБ с ошибкой, в среднем, менее 10%. Мы используем мазеры, которые связаны с очень молодыми объектами — протозвездами, в основном, большой массы, расположенными в областях активного звездообразования. Значения собственных движений и тригонометрических параллаксов мазеров являются абсолютными, так как определяются по отношению к внегалактическим опорным объектам (квазарам).

Одним из проектов по измерению тригонометрических параллаксов и собственных движений является японский проект VERA (VLBI Exploration of Radio Astronomy), посвященный наблюдениям H_2O -мазерных источников на частоте 22.2 ГГц, а также SiO -мазеров на частоте 43 ГГц [5]. Метанольные CH_3OH (6.7 и 12.2 ГГц) и H_2O мазеры наблюдаются в США на VLBA [6]. Аналогичные наблюдения ведутся и в рамках европейской РСДБ-сети [7], в которой участвуют три российские антенны: Светлое, Зеленчук и Бадары. С такими же целями ведутся и РСДБ-наблюдения радиозвезд в континууме на частоте 8.4 ГГц [8]. В рамках этой программы наблюдаются радиоисточники, расположенные в местном рукаве (рукав Ориона), которые связаны с молодыми маломассивными протозвездами (звезды типа Т Тельца).

В нашу выборку входят всего 120 источников. Помимо данных о 103 мазерах из работе Рида и др. [1] в нее вошли еще 14 источников, тригонометрические параллаксы которых измерены РСДБ-методом. В основном дополнительные мазеры принадлежат местному рукаву, данные о них взяты из работы [9]. Отметим наиболее интересные другие новые данные, которые вошли в нашу выборку: 1) массивная спектрально-двойная Cyg X-1 [10], один из компонентов которой является кандидатом в черные дыры; 2) красный сверхгигант IRAS 22480+6002 [11]; 3) красный сверхгигант PZ Cas [12]; 4) IRAS 20143+3634 [13]; 5) IRAS 22555+6213 [14]. Для области звездообразования S 269 (которая входит в выборку [1] из 103 мазеров) мы взяли новую оценку расстояния и собственного движения из работы [15].

3. Методы. 3.1. Уравнения Боттлингера. Используется прямоугольная галактическая система координат с осями, направленными от наблюдателя в сторону галактического центра ($l=0^\circ, b=0^\circ$, ось x), в направлении галактического вращения ($l=90^\circ, b=0^\circ$, ось y) и в направлении северного полюса Галактики ($b=90^\circ$, ось z).

Из уравнений Боттлингера с разложением в ряд угловой скорости галактического вращения Ω до членов второго порядка малости относительно r/R_0 можем записать следующие условные уравнения:

$$V_r = -u_\odot \cos b \cos l - v_\odot \cos b \sin l - w_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + 0.5 R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \quad (1)$$

$$V_l = u_{\odot} \sin l - v_{\odot} \cos l + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 + \\ + (R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)0.5\Omega''_0 - r\Omega_0 \cos b, \quad (2)$$

$$V_b = u_{\odot} \cos l \sin b + v_{\odot} \sin l \sin b - w_{\odot} \cos b - \\ - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0, \quad (3)$$

где V_r — лучевая скорость звезды в км/с, $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$, $V_b = 4.74r\mu_b$ — скорости в мсд/год в направлениях l и b соответственно, коэффициент размерности 4.74 представляет собой частное от деления числа километров в астрономической единице на число секунд в тропическом году; r — гелиоцентрическое расстояние звезды; $u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$ — компоненты групповой скорости звезд относительно Солнца, взятые с обратным знаком (скорость u направлена к центру Галактики, v — по направлению галактического вращения, w — в северный галактический полюс); R_0 — галактоцентрическое расстояние Солнца; R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (4)$$

Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения на расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 являются производными угловой скорости первого и второго порядков соответственно. Веса уравнений назначаются в соответствии с выражениями

$$w_r = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2}, \quad w_l = \beta^2 S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}, \quad w_b = \gamma^2 S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_b}^2}, \quad (5)$$

где через S_0 обозначена величина средней по всем наблюдениям дисперсии, имеющей смысл «космической» дисперсии, значение которой нами принимается равным 8 км/с; $\beta = \sigma_{V_r}/\sigma_{V_l} = 1$ и $\gamma = \sigma_{V_r}/\sigma_{V_b}$ — масштабные коэффициенты, численные значения которых для мазеров близки к единице, т. е. $\beta = 1$ и $\gamma = 1$ [16]. Ошибки скоростей V_l и V_b вычисляются по формуле

$$\sigma_{(V_l, V_b)} = 4.74r \sqrt{\mu_{l,b}^2 (\sigma_r^2 / r^2) + \sigma_{\mu_{l,b}}^2}. \quad (6)$$

Основываясь на современных определениях, значение R_0 в данной работе принимаем равным 8.3 ± 0.2 кпк. Например, из анализа кинематики галактических мазеров Ридом и др. [1] получена оценка $R_0 = 8.34 \pm 0.16$ кпк, а Бобылевым и Байковой [16] другим методом найдено $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк.

Из решения системы уравнений (1)–(3) методом наименьших квадратов находим шесть неизвестных: три компонента пекулярной скорости Солнца $u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$, угловую скорость вращения Галактики Ω_0 , а также две ее производные Ω'_0 и Ω''_0 .

3.2. Линейная модель Огородникова—Милна. В этой модели [17] наблюдаемая скорость звезды $\mathbf{V}(r)$, имеющая гелиоцентрический радиус-вектор \mathbf{r} , с точностью до членов первого порядка малости $r/R_0 \ll 1$ описывается уравнением в векторной форме

$$\mathbf{V}(r) = \mathbf{V}_{\odot} + M\mathbf{r} + \mathbf{V}', \quad (7)$$

где $\mathbf{V}_{\odot}(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot})$ — пекулярная скорость Солнца относительно рассматриваемых звезд, \mathbf{V}' — остаточная скорость звезды, M — матрица смещений, компонентами которой являются частные производные скорости $\mathbf{u}(u, v, w)$ по расстоянию $\mathbf{r}(x, y, z)$,

где $\mathbf{u} = \mathbf{V}(R) - \mathbf{V}(R_0)$. Пренебрегая остаточными скоростями, уравнения (7) можно записать в развернутом виде так:

$$\begin{aligned} u &= u_{\odot} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{\circ} x + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{\circ} y + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{\circ} z, \\ v &= v_{\odot} + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{\circ} x + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{\circ} y + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{\circ} z, \\ w &= w_{\odot} + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\circ} x + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_{\circ} y + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{\circ} z, \end{aligned} \quad (8)$$

где (...) означает, что производные взяты в точке $R = R_0$. В цилиндрической системе координат (R, θ, z) матрица смещений M имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_R}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} - \frac{V_{\theta}}{R} & \frac{\partial V_R}{\partial z} \\ \frac{\partial V_{\theta}}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{V_R}{R} & \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} \\ \frac{\partial V_z}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Здесь все производные взяты в точке с координатами $(R = R_0, \theta = 0^{\circ}, z = z_0)$.

4. Результаты. Следуя рекомендации Рида и др. [1], при определении параметров вращения Галактики мазеры, расположенные на расстояниях $R < 4$ кпк, не использовались, так как в этой области велико влияние некруговых движений, связанных с влиянием центрального галактического бара. Мы постарались найти решение с использованием максимально возможного количества источников. Отброшенными по критерию 3σ оказались всего 10 мазеров. В итоге, получено следующее решение:

$$\begin{aligned} (u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) &= (8.06, 17.02, 8.94) \pm (1.06, 1.10, 0.84) \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= +29.26 \pm 0.35 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.98 \pm 0.08 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= +0.785 \pm 0.046 \text{ км/с/кпк}^3. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае значения постоянных Оорта составляют $A = -16.51 \pm 0.34$ км/с/кпк и $B = 12.75 \pm 0.49$ км/с/кпк, а линейная скорость вращения на околосолнечном расстоянии составила $V_0 = 243 \pm 6$ км/с. На рис. 1 дан пример кривой вращения Галактики, $V_{\text{circ}} = |R\Omega|$, построенной с параметрами (10), где нанесены скорости 114 мазеров. Как можно видеть из рисунка, кривая вращения хорошо описывает распределение скоростей вращения мазеров в интервале $4 < R < 12$ кпк.

Теперь обратимся к модели Огородникова—Милна. На рис. 2 даны девять зависимостей скоростей мазеров u, v, w от координат x, y, z . Фактически, здесь в графическом виде отображены все девять элементов матрицы смещений M (7), причем панели на рисунке следуют в том же порядке, что и элементы матрицы M в записях (8) и (9).

Вращение Галактики вокруг оси z описывается скоростями u и v , которые лежат в галактической плоскости xy . К этому движению относятся четыре панели — (а), (б), (г) и (д). Скорости на панелях (б) и (г) не являются остаточными, на остальных панелях скорости являются остаточными и сформированы с учетом в скоростях

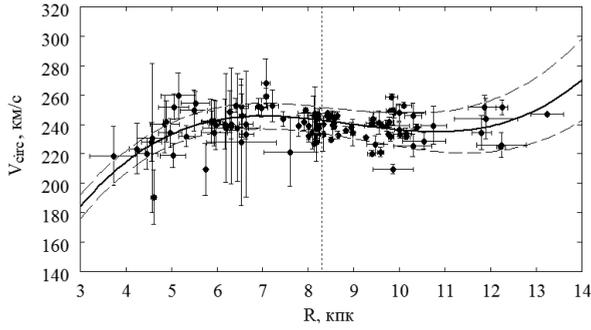


Рис. 1. Кривая вращения Галактики, построенная с параметрами (10); тонкими линиями отмечена доверительная область, соответствующая уровню 1σ , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

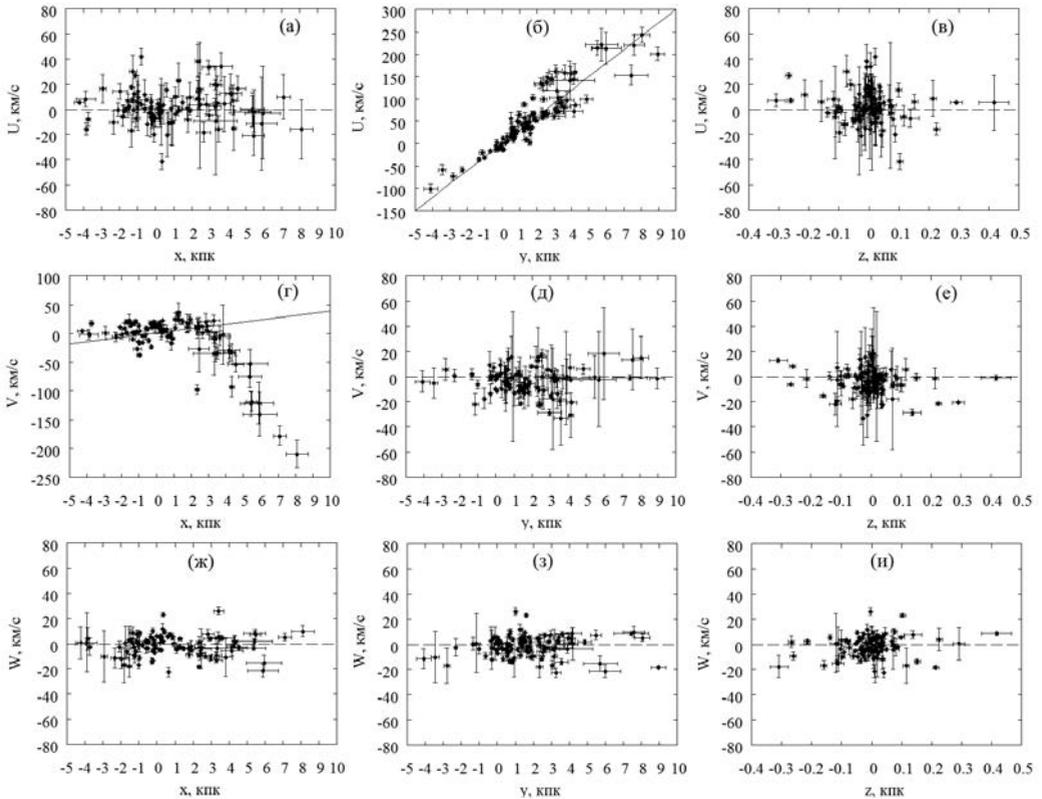


Рис. 2. Зависимости скоростей выборки из 114 мазеров от координат. Скорости на графиках (б) и (г) не являются остаточными, на других графиках скорости u и v являются остаточными.

V_r, V_l, V_b вращения Галактики с параметрами (10). Сплошной тонкой линией на панели (б) нанесена зависимость $\partial u/\partial y = 30$ км/с/кпк — это взятое с обратным знаком значение угловой скорости галактического вращения, $\Omega_0 = (B - A) = V_\theta/R$. Видно, что нанесенная линейная зависимость очень хорошо представляет данные в широ-

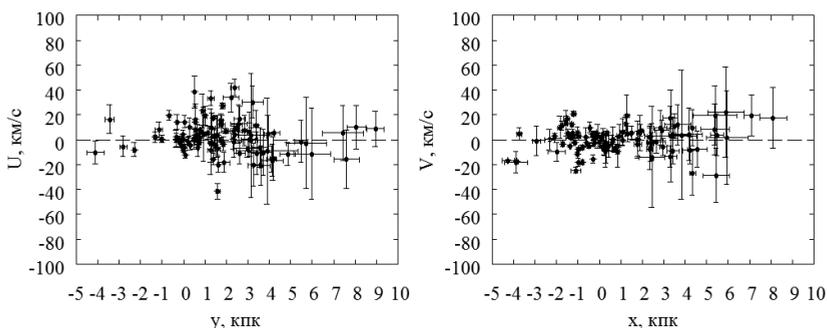


Рис. 3. Остаточные скорости мазеров u, v в зависимости от координат y, x .

ком диапазоне значений координаты $y = [-3; 8]$ кпк. Это говорит о том, что член $\partial V_R / (R \partial \theta)$ в матрице (9) можно положить равным нулю. Так как на панелях (а) и (д) нет значительных линейных трендов, можно заключить, что в рассматриваемом интервале расстояний крупномасштабные эффекты в Галактике типа расширения/сжатия отсутствуют. Сплошной тонкой линией на панели (г) нанесена зависимость $\partial v / \partial x = 3.7$ км/с/кпк, это первая производная линейной скорости галактического вращения, $-(A + B) = \partial V_\theta / \partial R$. Хорошо видно, что применение линейного подхода ограничивается радиусом около 2 кпк от Солнца — вне этого интервала скорости v значительно уклоняются от линейного тренда.

На рис. 3 даны зависимости остаточных скоростей u и v мазеров от координат y и x соответственно. Видно, что учет найденных параметров вращения Галактики (10) с двумя производными угловой скорости неплохо исправляют данные, хотя в скоростях u на левой панели рис. 3 просматривается волна с небольшой амплитудой (≈ 10 км/с).

К движениям в плоскости yz относятся панели (д), (е), (з) и (и) рис. 2. Как видно из рисунка, здесь никаких значительных линейных трендов не прослеживается. Эта плоскость интересна тем, что скорости объектов могут иметь кинематическую связь с таким крупномасштабным явлением в Галактике, как изгиб диска [2]. Для изучения этого эффекта пока явно недостаточно мазеров, находящихся на далеких (более 10 кпк) от Солнца расстояниях в направлениях $l \approx 90^\circ$ и $l \approx 270^\circ$ со значительными z .

К движениям в плоскости xz относятся панели (а), (в), (ж) и (и) рис. 2. Здесь также никаких значительных линейных трендов не прослеживается. Обращает на себя внимание панель (ж), где отчетливо видна периодичность с длиной волны 3–4 кпк и амплитудой около 10 км/с. Согласно линейной модели спиральной структуры Линя и Шу [18], возмущениям от волны плотности подвержены только скорости V_R и V_θ . Проявления этих возмущений отчетливо видны на панелях (а) и (г) рис. 2, а также на правой панели рис. 3.

Возмущения тангенциальных скоростей, вызванные влиянием спиральной волны плотности, хорошо видны на рис. 1 как периодические отклонения от гладкой кривой вращения. Еще лучше они проявляются в радиальных скоростях V_R , что легко можно видеть из рис. 4.

Можем заключить, что периодические возмущения скоростей, проявляющиеся на рис. 2 (панели (а) и (г)) скорее всего связаны с влиянием галактической спиральной волны плотности. Если это так, то более интересной должна быть зависимость скоростей w от R , которая показана на рис. 5. Из рисунка можем видеть, что во внутренней области Галактики картина размытая, но мазеры местного рукава и рукава

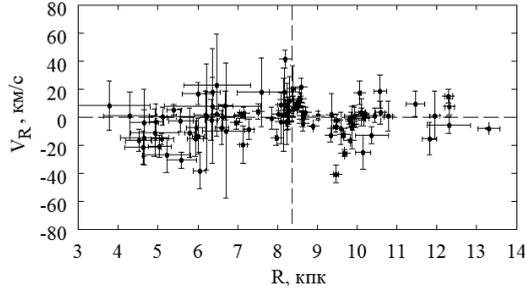


Рис. 4. Радиальные скорости V_R в зависимости от галактоцентрического расстояния R , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

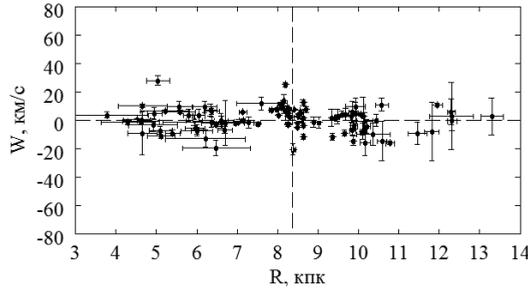


Рис. 5. Скорости w в зависимости от галактоцентрического расстояния R , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

Персея ($R \approx 10$ кпк) имеют значительные возмущения. Местному рукаву принадлежат около 30 мазеров. Распределение скоростей, показанное на рис. 5, для пояса Гулда не вызывает удивления. Действительно, если звезды пояса Гулда подвержены собственному расширению от центра $l \approx 180^\circ$ под углом к галактической плоскости около 20° , то будут проекции этих скоростей на ось z , причем для звезд ассоциации Скорпиона-Центавра ($R < R_0$) проекции таких скоростей будут положительными, а для звезд ассоциации Ориона ($R > R_0$) — отрицательными, в точности как на рисунке. Примечательно, что удаление из выборки объектов пояса Гулда ($r < 0.5$ кпк) не изменяет характер картины. Таким образом, весь местный рукав показывает возмущение скоростей по z , за что может отвечать единый механизм, например волна плотности.

Наконец, отметим работу Бранхама [3], в которой был выполнен анализ трехмерной кинематики более 6000 ОВ-звезд из окосолнечной окрестности радиусом $r < 3$ кпк. Им был использован метод, основанный на обобщенных формулах Оорта, причем в список определяемых параметров были добавлены еще два члена, $\partial w / \partial z$ и $\partial^2 w / \partial^2 z$. Как можно видеть на панели (и) рис. 2, в скоростях мазеров не просматривается даже линейного тренда ($\partial w / \partial z$), поэтому добавление двух указанных членов при изучении мазеров пока представляется нецелесообразным.

5. Обсуждение. В работе Бобылева, Байковой [16] применялся метод, основанный на формулах Ботлингера (1)–(3). По данным о 73 мазерах получено решение, которое имеет вид $u_\odot = 7.81 \pm 0.63$ км/с, $v_\odot = 17.47 \pm 0.33$ км/с, $w_\odot = 7.73 \pm 0.23$ км/с,

$\Omega_0 = 28.86 \pm 0.45$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.96 \pm 0.09$ км/с/кпк², $\Omega''_0 = 0.790 \pm 0.027$ км/с/кпк³, $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк. В этом случае значения постоянных Оорта составляют $A = -16.49 \pm 0.60$ км/с/кпк и $B = 12.37 \pm 1.12$ км/с/кпк. Можно видеть, что решение (10) находится в хорошем согласии с этим результатом, но использование большего количества мазеров в решении (10) уменьшает случайные ошибки определяемых параметров.

Обнаруженные осцилляции скоростей w в зависимости от x (панель (ж) рис. 2) или R (рис. 5) показывают, что внемоделные по отношению к линейной модели Огородникова—Милна гармоника в движении звезд (Витязев, Цветков [4]) могут проявляться в различных плоскостях, но они имеют характер локальных возмущений. Очевидно, что если радиус выборки небольшой, величина таких локальных гармоник может быть значительной. Действительно, если по мазерам местного рукава на рис. 5 провести линейный тренд, то получается большой коэффициент $\partial w / \partial R \approx -22$ км/с/кпк, который определяется с маленькой ошибкой.

В большинстве моделей спиральной структуры Галактики рассматриваются возмущения лишь в радиальных и тангенциальных скоростях. Интересно отметить, что крупномасштабные возмущения вертикальных скоростей найдены в последнее время в галактическом диске по данным нескольких экспериментов, таких как SEGUE, RAVE и LAMOST. Отличные от нуля вертикальные скорости объектов обычно объясняют воздействием каких-либо внешних факторов, например пролетом через галактической диск карликовой галактики или облаков темной материи. Однако можно объяснить такие возмущения и без привлечения воздействия внешних сил. В рамках теории волн плотности небольшие возмущения скоростей в вертикальном направлении могут иметь место. Фридман [19] отмечал возможность таких возмущений. Численное моделирование, выполненное недавно в работах Форе и др. [20] и Дебаттисы [21] показало, что распространение в галактическом диске спиральной волны плотности может приводить к возникновению вертикальных колебаний с амплитудой 10–20 км/с.

В настоящее время в рамках проекта BeSSeL [22] ведутся наблюдения около 400 мазерных источников с целью определения их тригонометрических параллаксов и собственных движений. Поэтому вскоре можно будет более детально изучить отмеченные тонкие кинематические эффекты по большой выборке источников.

6. Заключение. По литературным данным собрана информация о координатах, лучевых скоростях, собственных движениях и тригонометрических параллаксах галактических мазерных источников. По выборке из 114 мазеров найдены параметры галактического вращения $\Omega_0 = +29.26 \pm 0.35$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.98 \pm 0.08$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = -0.785 \pm 0.046$ км/с/кпк³ для принятого значения галактоцентрического расстояния Солнца $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк. В этом случае значения постоянных Оорта составляют $A = -16.51 \pm 0.34$ км/с/кпк и $B = 12.75 \pm 0.49$ км/с/кпк, а линейная скорость вращения на околосолнечном расстоянии равна $V_0 = 243 \pm 6$ км/с.

Анализ трехмерной кинематики мазеров показал, что значительные нелинейности присутствуют в плоскости xy (вращение вокруг галактической оси z), что связано с особенностями кривой галактического вращения (наличием производных высоких порядков в разложении угловой скорости). В плоскостях xz и yz заметных линейных трендов не обнаружено. Выявлена волна в скоростях w с длиной волны около 3 кпк и амплитудой около 10 км/с, которая связана с галактической спиральной волной плотности.

Основной вывод работы заключается в том, что помимо производных высших порядков в кривой галактического вращения, которые проявляют себя в плоскости

xy, существенную роль имеют периодические возмущения во всех трех плоскостях, связанные с влиянием спиральной волны плотности.

Литература

1. Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., et al. // *Astrophys. J.* 2014. Vol. 783. P. 130.
2. Бобылев В. В. // Письма в Астрон. журн. 2013. Т. 39. С. 909.
3. Branham R. L. // *Astrophysics and Space Science.* 2014. Vol. 353. P. 179.
4. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. // *MNRAS.* 2014. Vol. 442. P. 1249.
5. Hirota T., Bushimata T., Choi Y. K., et al. // *PASJ.* 2007. Vol. 59. P. 897.
6. Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., et al. // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 700. P. 137.
7. Rygl K. L. J., Brunthaler A., Reid M. J., et al. // *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 511. P. A2.
8. Torres R. M., Loínard L., Mioduszewski A. J., et al. // *Astrophys. J.* 2007. Vol. 671. P. 1813.
9. Xu Y., Li J. J., Reid M. J., et al. // *Astrophys. J.* 2013. Vol. 769. P. 15.
10. Reid M. J., McClintock J. E., Narayan R., et al. // *Astrophys. J.* 2011. Vol. 742. P. 83.
11. Imai H., Sakai N., Nakanishi H., et al. // *PASJ.* 2012. Vol. 64. P. 142.
12. Kusuno K., Asaki Y., Imai H., Oyama T. // *Astrophys. J.* 2013. Vol. 774. P. 107.
13. Burns R. A., Yamaguchi Y., Handa T., et al. // arXiv:1404.5506, 2014.
14. Chibueze J. O., Sakanoue H., Nagayama T., et al. // arXiv:1406.277, 2014.
15. Asaki Y., Imai H., Sobolev A. M., Parfenov S. Yu. // *Astrophys. J.* 2014. Vol. 787. P. 54.
16. Бобылев В. В., Байжова А. Т. // Письма в Астрон. журн. 2014. Т. 40. С. 435.
17. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. М.: Физматгиз, 1965.
18. Lin C. C., Shu F. H. // *Astrophys. J.* 1964. Vol. 140. P. 646.
19. Фридман А. М. // УФН. 2007. Т. 177. С. 121.
20. Faure C., Siebert A., Famaey B. // *MNRAS.* 2014. Vol. 440. P. 2564.
21. Debattista V. // *MNRAS.* 2014. Vol. 443. P. L1.
22. Brunthaler A., Reid M. J., Menten K. M., et al. // *AN.* 2011. Vol. 332. P. 461.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

Сведения об авторе

Бобылев Вадим Вадимович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; bob-v-vzz@rambler.ru

NONLINEARITIES IN THE MOTION OF THE GALACTIC MASERS

Vadim V. Bobylev

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation; bob-v-vzz@rambler.ru

Parameters of the Galactic rotation were estimated using sample of 114 Galactic masers with known trigonometric VLBI parallaxes. For adopted Solar galactocentric distance $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ kpc the values of the Oort constants are estimated as $A = -16.51 \pm 0.34$ km c⁻¹ kpc⁻¹ and $B = 12.75 \pm 0.49$ km c⁻¹ kpc⁻¹, linear velocity of the galactic rotation at the Solar distance is equal to $V_0 = 243 \pm 6$ km c⁻¹. Analysis of three-dimensional kinematics of these masers shows that in addition to derivatives of higher orders in the Galactic rotation curve, which manifest themselves in the *xy*-plane, the periodic perturbations in all three planes play a significant role, what is connected with the influence of the Galactic spiral density wave. Refs 22. Figs 5.

Keywords: Galactic kinematics, masers.

References

1. Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., et al., *Astrophys. J.* **783**, 130 (2014).
2. Bobylev V. V., *Astron. Lett.* **39**, 819, 2013.
3. Branham R. L. *Astrophysics and Space Science* **353**, 179 (2014).
4. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. *MNRAS* **442**, 1249 (2014).
5. Hirota T., Bushimata T., Choi Y. K., et al., *PASJ* **59**, 897 (2007).
6. Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., et al., *Astrophys. J.* **700**, 137 (2009).

7. Rygl K. L. J., Brunthaler A., Reid M. J., et al., *Astron. Astrophys.* **511**, A2 (2010).
8. Torres R. M., Loinard L., Mioduszewski A. J., et al., *Astrophys. J.* **671**, 1813 (2007).
9. Xu Y., Li J. J., Reid M. J., et al., *Astrophys. J.* **769**, 15 (2013).
10. Reid M. J., McClintock J. E., Narayan R., et al., *Astrophys. J.* **742**, 83 (2011).
11. Imai H., Sakai N., Nakanishi H., et al., *PASJ* **64**, 142 (2012).
12. Kusuno K., Asaki Y., Imai H., Oyama T., *Astrophys. J.* **774**, 107 (2013).
13. Burns R. A., Yamaguchi Y., Handa T., et al., arXiv:1404.5506, 2014.
14. Chibueze J. O., Sakanoue H., Nagayama T., et al., arXiv:1406.277, 2014.
15. Asaki Y., Imai H., Sobolev A. M., Parfenov S. Yu., *Astrophys. J.* **787**, 54 (2014).
16. Bobylev V. V., Bajkova A. T., *Astron. Lett.* **40**, 435 (2014).
17. Ogorodnikov K. F., *Dynamics of stellar systems* (Moscow, Fizmatgiz, 1965) [in Russian].
18. Lin C. C., Shu F. H., *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
19. Fridman A. M., *UFN* **177**, 121 (2007) [in Russian].
20. Faure C., Siebert A., Famaey B., *MNRAS* **440**, 2564 (2014).
21. Debattista V., *MNRAS* **443**, L1 (2014).
22. Brunthaler A., Reid M. J., Menten K. M., et al., *AN* **332**, 461 (2011).