

## АСТРОНОМИЯ

УДК 524.6-34

**ОРИЕНТАЦИЯ И КИНЕМАТИКА  
СИСТЕМЫ ЦЕФЕИД В ГАЛАКТИКЕ\****В. В. Бобылев*Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

По распределению классических цефеид переопределены параметры ориентации их основной плоскости в Галактике. Расстояния до цефеид были оценены на основе соотношения период—светимость. По 299 звездам из интервала гелиоцентрических расстояний  $r < 20$  кпк с периодами пульсаций  $P > 5^d$  показано, что линия узлов близка к направлению на центр Галактики, а плоскость их симметрии наклонена к галактической примерно на  $-2^\circ$  в направлении  $l \approx 270^\circ$ . Направление линии узлов, найденное по старым цефеидам ( $P < 5^d$ ), значительно отличается и составляет  $298^\circ$ . Оценка возвышения Солнца над плоскостью Галактики составила  $h_\odot = 23 \pm 5$  пк. Проанализированы пространственные скорости 205 цефеид ( $P \geq 5^d$ ). Применена линейная модель Огородникова—Милна, причем из наблюдаемых скоростей было исключено галактическое вращение. Обнаружены два заметных градиента:  $\partial W/\partial Y = -2.1 \pm 0.7$  км/с/кпк и  $\partial V/\partial Z = 27 \pm 10$  км/с/кпк. В таком случае угловая скорость твердотельного вращения вокруг галактической оси  $X$ , направленной на центр Галактики, составляет  $-15 \pm 5$  км/с/кпк. Библиогр. 22 назв. Ил. 3. Табл. 1.

*Ключевые слова:* структура Галактики, классические цефеиды, искривление диска Галактики.

**1. Введение.** Цефеиды играют важнейшую роль при изучении структуры Галактики. Количество их возрастает, уточняется калибровка соотношения «период—светимость», необходимая для определения расстояния. Это стало возможным благодаря тому, что для нескольких цефеид измерены тригонометрические параллаксы [1]. Использование данных инфракрасной фотометрии позволило существенно улучшить учет межзвездного поглощения [2].

Известно, что слой нейтрального водорода в Галактике искривлен на больших галактоцентрических расстояниях [3, 4]. Водород возвышается над галактической плоскостью во втором квадранте и уходит под нее в третьем и четвертом квадрантах.

Большой интерес представляют попытки поиска связи кинематики звезд с изгибом диска. В частности, Миямото и Жю [7] по собственным движениям звезд спек-

---

\*Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной», Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (грант № НШ-1625.2012.2).

тральных классов O–B5 нашли вращение этой системы звезд вокруг галактической оси  $x$  с угловой скоростью  $\Omega_W \approx +4$  км/с/кпк. А в работе Бобылева [8] по звездам сгущения красных гигантов показано противоположное вращение этой системы звезд вокруг оси  $x$  со скоростью  $\Omega_W \approx -4$  км/с/кпк.

Отметим, что термин «искривление» подразумевает некую нелинейную зависимость. Но мы пытаемся найти связь кинематики звезд с искривлением водородного слоя в виде простого линейного подхода. Для этого ищем вращение плоскости симметрии системы звезд вокруг какой-либо оси.

Одной из целей настоящей работы является переопределение ориентации системы цефеид в Галактике по современным данным. Другой целью является выявление связи скоростей цефеид с изгибом звездно-газового диска Галактики. Для анализа применяется линейная модель Огородникова–Милна, причем из наблюдаемых скоростей мы заранее исключаем галактическое вращение, сосредоточив внимание на движении в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$ .

**2. Данные.** Используются цефеиды плоской составляющей Галактики, классифицируемые согласно ОКПЗ [9] как DCEP, DCEPS, CEP(B), CEP, а также встречающееся у других авторов обозначение CEPS. Для определения расстояния на основе соотношения «период — светимость» применялась калибровка из работы Фуке и др. [1]:  $\langle M_V \rangle = -1.275 - 2.678 \log P$ , где период  $P$  выражается в сутках. Зная  $\langle M_V \rangle$ , взяв средние за период видимые величины  $\langle V \rangle$  и поглощение  $A_V = 3.23E(\langle B \rangle - \langle V \rangle)$  в основном из работы [10] и для ряда звезд из [11], определяем расстояние  $r$  из соотношения

$$r = 10^{-0.2(\langle M_V \rangle - \langle V \rangle - 5 + A_V)}. \quad (1)$$

Для ряда цефеид (при отсутствии данных о поглощении) использованы расстояния из каталога [2], которые были определены по инфракрасной фотометрии. Были использованы два ограничения:  $|Z| < 2$  кпк, и  $X < 6$  кпк, которым удовлетворяют 465 цефеид. Их распределения в проекциях на галактические плоскости  $XY$ ,  $XZ$  и  $YZ$  даны на рис. 1–2. Для оценки возраста цефеид используется калибровка Ефремова [12]  $\log t = 8.50 - 0.65 \log P$ , полученная по цефеидам, принадлежащим рассеянному скоплению Большого Магелланова Облака.

Лучевые скорости цефеид взяты из работ [13, 14], а также баз данных SIMBAD и DDO. Собственные движения взяты из каталога UCAC4 [15].

**3. Методы. 3.1. Определение плоскости симметрии.** Применяется известный метод определения плоскости симметрии звездной системы по отношению к основной (в данном случае галактической) системе координат. Основы подхода описаны Полаком [16], а способ оценки ошибок углов можно найти в работах Паренаго [17] и Павловской [18].

В прямоугольной системе координат с центром в Солнце ось  $x$  (ось 1) направлена в сторону галактического центра, ось  $y$  (ось 2) — в сторону галактического вращения ( $l=90^\circ$ ,  $b=0^\circ$ ), а ось  $z$  (ось 3) — в северный полюс Галактики, тогда

$$x = r \cos l \cos b, \quad y = r \sin l \cos b, \quad z = r \sin b. \quad (2)$$

Пусть  $m, n, k$  — направляющие косинусы полюса искомого большого круга от осей  $x, y, z$ . Тогда искомая плоскость симметрии звездной системы определяется как плоскость, для которой сумма квадратов высот,  $h = mx + ny + kz$ , есть минимум:

$$\sum h^2 = \min. \quad (3)$$

Сумму квадратов

$$h^2 = x^2m^2 + y^2n^2 + z^2k^2 + 2yznk + 2xzk m + 2xymn \quad (4)$$

обозначим как  $2P = \sum h^2$ . Тогда задача сводится к поиску минимума функции  $P$ :

$$2P = am^2 + bn^2 + ck^2 + 2fnk + 2ekm + 2dmn, \quad (5)$$

где моменты координат второго порядка  $a = [xx]$ ,  $b = [yy]$ ,  $c = [zz]$ ,  $f = [yz]$ ,  $e = [xz]$ ,  $d = [xy]$ , записанные через скобки Гаусса, являются компонентами симметричного тензора

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}, \quad (6)$$

собственные значения которого  $\lambda_{1,2,3}$  находятся из решения векового уравнения

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

а направления главных осей  $L_{1,2,3}$  и  $B_{1,2,3}$  — из соотношений

$$\operatorname{tg}L_{1,2,3} = \frac{ef - (c - \lambda)d}{(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2}, \quad \operatorname{tg}B_{1,2,3} = \frac{(b - \lambda)e - df}{f^2 - (b - \lambda)(c - \lambda)} \cos L_{1,2,3}. \quad (8)$$

Ошибки определения  $L_{1,2,3}$  и  $B_{1,2,3}$  оцениваются согласно следующей схеме:

$$\begin{aligned} \varepsilon(L_2) = \varepsilon(L_3) &= \frac{\varepsilon(\overline{xy})}{a - b}, & \varepsilon(B_2) = \varepsilon(\varphi) &= \frac{\varepsilon(\overline{xz})}{a - c}, & \varepsilon(B_3) = \varepsilon(\psi) &= \frac{\varepsilon(\overline{yz})}{b - c}, \\ \varepsilon^2(L_1) &= \frac{\varphi^2 \varepsilon^2(\psi) + \psi^2 \varepsilon^2(\varphi)}{(\varphi^2 + \psi^2)^2}, & \varepsilon^2(B_1) &= \frac{\sin^2 L_1 \varepsilon^2(\psi) + \cos^2 L_1 \varepsilon^2(L_1)}{(\sin^2 L_1 + \psi^2)^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\varphi = \operatorname{ctg}B_1 \cos L_1, \quad \psi = \operatorname{ctg}B_1 \sin L_1.$$

Заранее необходимо вычислить три величины,  $\overline{x^2y^2}$ ,  $\overline{x^2z^2}$  и  $\overline{y^2z^2}$ , тогда

$$\varepsilon^2(\overline{xy}) = (\overline{x^2y^2} - d^2)/n, \quad \varepsilon^2(\overline{xz}) = (\overline{x^2z^2} - e^2)/n, \quad \varepsilon^2(\overline{yz}) = (\overline{y^2z^2} - f^2)/n, \quad (10)$$

где  $n$  — количество звезд. Итак, алгоритм решения задачи заключается в составлении функции  $2P$  (5), поиске корней векового уравнения (7), конкретные значения которых нас не интересуют, и в оценке направлений главных осей эллипсоида положений по формулам (8)–(10). В классическом случае задача решалась для случая единичной сферы ( $r = 1$ ), но в настоящей работе используются расстояния.

Величины корней векового уравнения (7) описывают форму эллипсоида, но не дают информации о координатах его центра. Наиболее интересным является сдвиг по координате  $z$ , характеризующий возвышение Солнца над плоскостью Галактики  $h_{\odot} = -\bar{z}$ .

**3.2. Анализ кинематики.** Применяется линейная модель Огородникова—Милна [19], где 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:

$$\mathbf{V}(r) = \mathbf{V}_\odot + M\mathbf{r} + \mathbf{V}', \quad (11)$$

где  $\mathbf{V}_\odot(X_\odot, Y_\odot, Z_\odot)$  — пекулярная скорость Солнца относительно рассматриваемых звезд,  $\mathbf{V}'$  — остаточная скорость звезды,  $M$  — матрица (тензор) смещений, компонентами которой являются частные производные скорости  $\mathbf{u}(u_1, u_2, u_3)$  по расстоянию  $\mathbf{r}(r_1, r_2, r_3)$ , где  $\mathbf{u} = \mathbf{V}(R) - \mathbf{V}(R_0)$ , а  $R$  и  $R_0$  — галактоцентрические расстояния звезды и Солнца соответственно, тогда

$$M_{pq} = \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} \right)_\circ, \quad p, q = 1, 2, 3, \quad (12)$$

где нулик означает, что производные взяты в точке  $R = R_0$ . Все девять элементов матрицы  $M$  определяются при использовании трех компонент наблюдаемых скоростей — лучевых скоростей  $V_r$  и собственных движений звезд  $\mu_l \cos b$ ,  $\mu_b$ :

$$\begin{aligned} V_r = & -X_\odot \cos b \cos l - Y_\odot \cos b \sin l - Z_\odot \sin b + \\ & + r[\cos^2 b \cos^2 l M_{11} + \cos^2 b \cos l \sin l M_{12} + \cos b \sin b \cos l M_{13} + \\ & + \cos^2 b \sin l \cos l M_{21} + \cos^2 b \sin^2 l M_{22} + \cos b \sin b \sin l M_{23} + \\ & + \sin b \cos b \cos l M_{31} + \cos b \sin b \sin l M_{32} + \sin^2 b M_{33}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4.74r\mu_l \cos b = & X_\odot \sin l - Y_\odot \cos l + \\ & + r[-\cos b \cos l \sin l M_{11} - \cos b \sin^2 l M_{12} - \sin b \sin l M_{13} + \\ & + \cos b \cos^2 l M_{21} + \cos b \sin l \cos l M_{22} + \sin b \cos l M_{23}], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 4.74r\mu_b = & X_\odot \cos l \sin b + Y_\odot \sin l \sin b - Z_\odot \cos b + \\ & + r[-\sin b \cos b \cos^2 l M_{11} - \sin b \cos b \sin l \cos l M_{12} - \sin^2 b \cos l M_{13} - \\ & - \sin b \cos b \sin l \cos l M_{21} - \sin b \cos b \sin^2 l M_{22} - \sin^2 b \sin l M_{23} + \\ & + \cos^2 b \cos l M_{31} + \cos^2 b \sin l M_{32} + \sin b \cos b M_{33}]. \end{aligned}$$

Матрицу  $M$  полезно разделить на симметричную  $M^+$  (тензор локальной деформации) и антисимметричную  $M^-$  (тензор вращения) части:

$$M_{pq}^+ = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} + \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_\circ, \quad M_{pq}^- = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} - \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_\circ, \quad p, q = 1, 2, 3, \quad (14)$$

где нулик означает, что производные взяты в точке  $R = R_0$ . Величины  $M_{32}^-, M_{13}^-, M_{21}^-$  являются компонентами вектора твердотельного вращения малой окосолнечной окрестности вокруг осей  $x, y, z$  соответственно. В согласии с выбранной нами прямоугольной системой координат положительными вращениями являются вращения от оси 1 к 2 ( $\Omega_z$ ), от оси 2 к 3 ( $\Omega_x$ ), от оси 3 к 1 ( $\Omega_y$ ):

$$M^- = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Величина  $M_{21}^-$  эквивалентна постоянной Оорта  $B$ . Каждая из величин  $M_{12}^+, M_{13}^+, M_{23}^+$  описывает деформацию в соответствующей плоскости, в частности  $M_{12}^+$  эквивалентна постоянной Оорта  $A$ . Диагональные компоненты тензора локальной деформации  $M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$  описывают общее локальное сжатие или расширение всей звездной системы (дивергенция). В систему условных уравнений (13) входят двенадцать искомых неизвестных, которые определяются методом наименьших квадратов.

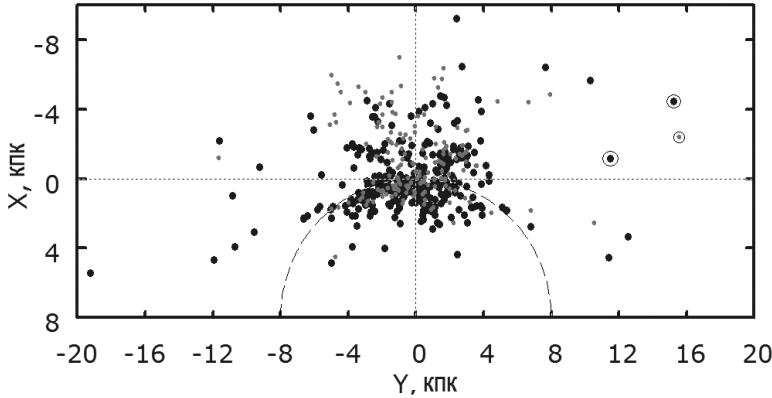


Рис. 1. Распределение цефеид в проекции на галактическую плоскость  $XY$ , Солнце расположено на пересечении пунктирных линий, штриховой линией показан круг радиусом  $R_0 = 8$  кпк, проведенный вокруг центра Галактики, жирные точки — долгопериодические цефеиды ( $P \geq 5^d$ ), серые маленькие точки — короткопериодические цефеиды ( $P < 5^d$ ), кружками отмечены три цефеиды с большими  $Z$ , о которых сказано в тексте.

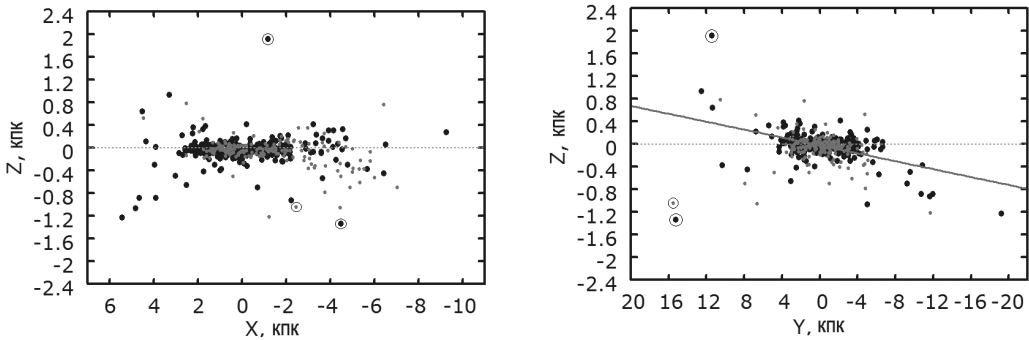


Рис. 2. Распределение цефеид в проекции на галактическую плоскость  $XZ$  (слева) и  $YZ$  (справа), сплошная линия имеет наклон  $2^\circ$ , обозначения те же, что на рис. 1.

**4. Результаты и обсуждение. 4.1. Ориентация.** По всей выборке цефеид (465 звезд, средний возраст  $\bar{t} = 98$  млн. лет), распределение которых в Галактике отражено на рис. 1–2, найдены следующие направления главных осей эллипсоида положений:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 278.96 \pm 0.05^\circ, & B_1 &= -1.33 \pm 0.00^\circ, \\
 L_2 &= 8.93 \pm 0.43^\circ, & B_2 &= 1.41 \pm 0.04^\circ, \\
 L_3 &= 232.37 \pm 0.43^\circ, & B_3 &= 88.06 \pm 0.07^\circ.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

В соответствии с решением (16) на рис. 2 угол наклона сплошной линии соответствует значению  $(90^\circ - B_3)$ .

Представляют интерес решения, полученные по далеким звездам ( $3 < r < 20$  кпк), имеющим различные периоды пульсаций (возраст). Для наиболее молодых цефеид ( $P \geq 9^d$ ,  $n_* = 63$ ,  $\bar{t} = 54$  млн. лет)

$$\begin{aligned} L_1 &= 279.6 \pm 0.3^\circ, & B_1 &= -2.1 \pm 0.1^\circ, \\ L_2 &= 9.9 \pm 1.3^\circ, & B_2 &= 0.6 \pm 0.1^\circ, \\ L_3 &= 262.8 \pm 1.3^\circ, & B_3 &= 87.8 \pm 0.3^\circ, \end{aligned} \quad (17)$$

для цефеид среднего возраста ( $5^d \leq P < 9^d$ ,  $n_* = 51$ ,  $\bar{t} = 96$  млн. лет)

$$\begin{aligned} L_1 &= 284.5 \pm 0.2^\circ, & B_1 &= -1.4 \pm 0.1^\circ, \\ L_2 &= 14.5 \pm 2.2^\circ, & B_2 &= 0.3 \pm 0.1^\circ, \\ L_3 &= 272.3 \pm 2.2^\circ, & B_3 &= 88.5 \pm 0.2^\circ, \end{aligned} \quad (18)$$

для наиболее старых цефеид ( $P < 5^d$ ,  $n_* = 63$ ,  $\bar{t} = 133$  млн. лет)

$$\begin{aligned} L_1 &= 261.6 \pm 0.4^\circ, & B_1 &= -0.9 \pm 0.0^\circ, \\ L_2 &= 351.6 \pm 1.0^\circ, & B_2 &= 3.2 \pm 0.4^\circ, \\ L_3 &= 188.0 \pm 1.0^\circ, & B_3 &= 86.7 \pm 0.1^\circ. \end{aligned} \quad (19)$$

В отличие от согласующихся в целом между собой результатов решений (17)–(18), наиболее старые цефеиды дают существенно другую ориентацию линии узлов,  $l_\Omega = L_3 + 90^\circ = 278^\circ$ . Это не удивительно, так как старые цефеиды успели далеко удалиться от места своего рождения, они сделали более половины оборота вокруг центра Галактики, т. е. сформировались в другой части Галактики (по отношению, например, к Магеллановым Облакам). Удивляет то, что наклон в  $\approx 3^\circ$  присутствует в их распределении (углы  $B_2$  и  $B_3$ ). Это означает, что изгиб диска может быть долгоживущим образованием, по крайней мере старше  $\approx 150$  млн. лет.

На рис. 1–2 отмечены три звезды с очень большими  $Z$ . Это DR Ser, FQ Lac и IT Lac. Для них нет информации об измерении лучевых скоростей, а собственные движения ненадежны. Поэтому они не использовались для определения параметров ориентации.

Так как результаты решений (17)–(18) не сильно различаются, интервал периодов можно объединить. Теперь по 299 звездам ( $r < 20$  кпк,  $P \geq 5^d$ ,  $\bar{t} = 77$  млн. лет) найдено

$$\begin{aligned} L_1 &= 281.0 \pm 0.1^\circ, & B_1 &= -1.9 \pm 0.1^\circ, \\ L_2 &= 11.0 \pm 0.7^\circ, & B_2 &= 0.2 \pm 0.1^\circ, \\ L_3 &= 275.9 \pm 0.7^\circ, & B_3 &= 88.1 \pm 0.2^\circ, \end{aligned} \quad (20)$$

линия узлов  $l_\Omega = L_3 + 90^\circ = 5.9^\circ$  близка к направлению на галактический центр. По 163 звездам ( $r < 20$  кпк,  $P < 5^d$ ,  $\bar{t} = 138$  млн. лет) найдено

$$\begin{aligned} L_1 &= 249.5 \pm 0.4^\circ, & B_1 &= -2.1 \pm 0.1^\circ, \\ L_2 &= 339.4 \pm 1.9^\circ, & B_2 &= 1.9 \pm 0.2^\circ, \\ L_3 &= 208.1 \pm 1.9^\circ, & B_3 &= 87.2 \pm 0.1^\circ, \end{aligned} \quad (21)$$

направление линии узлов  $l_\Omega = 298^\circ$ . Значение возвышения Солнца над плоскостью Галактики  $h_\odot$  зависит от гелиоцентрического расстояния, что хорошо видно из рис. 2.

Вычисления показали, что выборка с радиусом 4–5 кпк является оптимальной (наименьшая ошибка определения  $h_{\odot}$ ). Так, по выборке самых близких (71 звезда) цефеид из интервала  $r \leq 1$  кпк найдено (с отбрасыванием по критерию  $3\sigma$ )  $h_{\odot} = 30 \pm 9$  пк, но здесь велико влияние неоднородностей распределения звезд.

По 365 звездам из интервала  $r \leq 4$  кпк найдено

$$h_{\odot} = 23 \pm 5 \text{ пк}, \quad (22)$$

а по 100 звездам из интервала  $4 < r < 20$  кпк найдено  $h_{\odot} = 45 \pm 39$  пк. Результат (22) находится в хорошем согласии с оценками Бердникова [6]  $h_{\odot} = 26 \pm 6$  пк и Йоши [20]  $h_{\odot} = 17 \pm 3$  пк.

**4.2. Кинематика.** Были использованы ограничения

$$|Z| < 2 \text{ кпк}, \quad P \geq 5^d, \quad |V_{pec}| < 100 \text{ км/с}, \quad \sigma_V < 80 \text{ км/с}, \quad (23)$$

которым удовлетворяют 205 цефеид. Предполагалось, что ошибка расстояния составляет 10%,  $\sigma_V$  в (23) — это случайная ошибка полной пространственной скорости звезды. Ограничение на  $P$  выбрано по результатам анализа их ориентации.

Параметры кривой вращения Галактики были переопределены для современного значения  $R_0 = 8$  кпк по выборке, описанной в работе [21]:  $\Omega_0 = -27.4 \pm 0.6$  км/с/кпк,  $\Omega_0^1 = 3.80 \pm 0.07$  км/с/кпк<sup>2</sup>,  $\Omega_0^2 = -0.650 \pm 0.065$  км/с/кпк<sup>3</sup>,  $\Omega_0^3 = 0.142 \pm 0.036$  км/с/кпк<sup>4</sup>,  $\Omega_0^4 = -0.246 \pm 0.034$  км/с/кпк<sup>5</sup>,  $\Omega_0^5 = 0.109 \pm 0.020$  км/с/кпк<sup>6</sup>. Эта кривая вращения показана на рис. 3. Параметры этой кривой вращения были использованы для анализа пекулярной скорости  $V_{pec}$  в (23). Ограничение на  $|V_{pec}|$  является косвенным ограничением на радиус выборки, который в нашем случае составляет  $r \approx 6$  кпк.

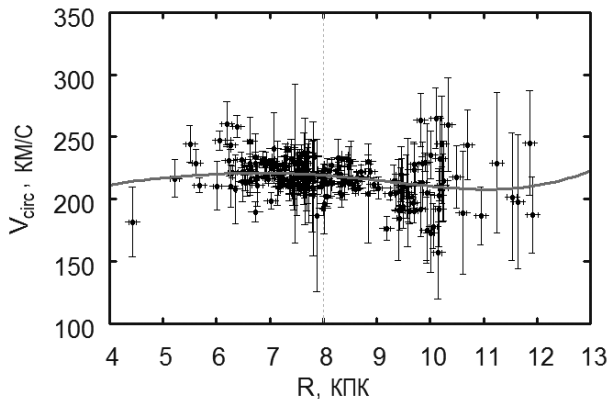


Рис. 3. Кривая вращения Галактики (сплошная линия), пунктиром отмечено положение Солнца, точки с барирами ошибок — скорости вращения цефеид.

В таблице представлены два решения системы уравнений (13). Дело в том, что система ICRS/HIPPARCOS [22], расширением которой является используемый нами каталог UCAC4, имеет небольшое остаточное вращение относительно инерциальной системы координат. Экваториальные компоненты этого вектора составляют  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.11, 0.24, -0.52) \pm (0.14, 0.10, 0.16)$  мсд/год [8]. Поэтому в таблице

**Кинематические параметры модели  
Огородникова—Милна**

Параметр	Без поправки	С поправкой
$X_{\odot}$ , км/с	$6.1 \pm 1.4$	$6.3 \pm 1.5$
$Y_{\odot}$ , км/с	$11.0 \pm 1.4$	$10.0 \pm 1.5$
$Z_{\odot}$ , км/с	$5.3 \pm 1.4$	$6.0 \pm 1.5$
$M_{11}$ , км/с/кпк	$-0.5 \pm 1.0$	$0.1 \pm 1.0$
$M_{12}$ , км/с/кпк	$-2.2 \pm 0.7$	$-2.9 \pm 0.7$
$M_{13}$ , км/с/кпк	$-8.0 \pm 11.7$	$1.9 \pm 11.9$
$M_{21}$ , км/с/кпк	$1.6 \pm 1.0$	$0.8 \pm 1.0$
$M_{22}$ , км/с/кпк	$-0.9 \pm 0.7$	$-1.1 \pm 0.7$
$M_{23}$ , км/с/кпк	$34.4 \pm 11.7$	$32.4 \pm 11.9$
$M_{31}$ , км/с/кпк	$-2.4 \pm 1.0$	$-2.8 \pm 1.0$
$M_{32}$ , км/с/кпк	$-1.1 \pm 0.7$	$-2.1 \pm 0.7$
$M_{33}$ , км/с/кпк	$11.7 \pm 11.7$	$13.2 \pm 11.9$

даны параметры, вычисленные для двух случаев: когда собственные движения цефеид не исправлялись и когда получались по собственным движениям звезд, которые были исправлены поправкой  $\omega_z = -0.52$  мсд/год. Значимых различий между двумя решениями нет. Но можно отметить, что при исправленных собственных движениях уменьшилось до нуля значение параметра  $M_{13}$  и слегка выросло значение параметра  $M_{32}$ , что для нас важно. Поэтому далее будем пользоваться результатами из последнего столбца таблицы.

**Плоскость XY.** Так как  $M_{12} = -\Omega_0$ , найденное значение  $M_{12} = -2.9 \pm 0.7$  км/с/кпк показывает, что скорости цефеид были слегка переисправлены (надо было бы именно для этой выборки использовать значение  $\Omega_0 \approx -26$  км/с/кпк). Для целей настоящей работы это не представляет серьезного значения, так как это просто линейный сдвиг, а нелинейный характер кривой галактического вращения учтен хорошо. Значения остальных параметров, описывающих кинематику в плоскости XY:  $M_{11}$ ,  $M_{21}$  и  $M_{22}$ , близки к нулю.

**Плоскость XZ.** Как видно из таблицы, среди коэффициентов  $M_{11}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{31}$  и  $M_{33}$ , описывающих кинематику в этой плоскости, нет значимо отличающихся от нуля.

**Плоскость YZ.** Графическим способом мы уточнили значение коэффициента  $M_{23} = 26.8 \pm 10.2$  км/с/кпк. Для этого зависимость  $V = f(Z)$  была вычислена при ограничении  $|Z| > 0.040$  кпк (использовано 136 звезд). Теперь рассмотрим тензор смещений  $M_W$ , который мы связываем с влиянием изгиба диска на движение системы цефеид:

$$M_W = \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial Y} & \frac{\partial V}{\partial Z} \\ \frac{\partial W}{\partial Y} & \frac{\partial W}{\partial Z} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Согласно данным таблицы оба его диагональных элемента можно положить равными нулю. Это означает, что в этой плоскости отсутствуют движения типа расширения-



сжатия. Тогда

$$\begin{aligned} M_W &= \begin{pmatrix} 0 & 26.8_{(10.2)} \\ -2.1_{(0.7)} & 0 \end{pmatrix}, \\ M_W^+ &= \begin{pmatrix} 0 & 12.4_{(5.1)} \\ 12.4_{(5.1)} & 0 \end{pmatrix}, \\ M_W^- &= \begin{pmatrix} 0 & 14.5_{(5.1)} \\ -14.5_{(5.1)} & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (25)$$

Можно заключить, что угловая скорость твердотельного вращения системы цефеид вокруг оси  $X$  составляет  $\Omega_W = M_{32}^- = -15 \pm 5$  км/с/кпк. Это является минимальной (но более надежной) оценкой. Если предположить, что деформации ( $M_{23}^+$ ) также связаны с рассматриваемым эффектом, то максимальное значение угловой скорости вращения можно оценить как  $\Omega_W = M_{32}^- - M_{23}^+ = -27 \pm 10$  км/с/кпк.

Направление найденного вращения (знак минус) находится в согласии с результатом анализа собственных движений звезд сгущения красных гигантов [8], где были использованы фотометрические оценки расстояний, имеющие ошибки  $e_\pi/\pi \approx 30\%$ . Значение  $\Omega_W = -15 \pm 5$  км/с/кпк, полученное по цефеидам, в четыре раза превышает значение  $\Omega_W \approx -4 \pm 0.5$  км/с/кпк, полученное в работе [8]. Это, возможно, связано с возрастом выборок, так как средний возраст выборки цефеид составляет 77 млн. лет, а средний возраст звезд сгущения красных гигантов составляет  $\approx 1$  млрд. лет.

**5. Заключение.** По распределению цефеид переопределены параметры ориентации их основной плоскости в Галактике. По 299 звездам из интервала гелиоцентрических расстояний  $r < 20$  кпк с периодами пульсаций  $P \geq 5^d$  найдены направления трех главных осей эллипсоида положений (решение (20)), которые показывают, что линия узлов  $l_\Omega = L_3 + 90^\circ = 5.9^\circ$  очень близка к направлению на центр Галактики, а плоскость симметрии цефеид наклонена к галактической примерно на  $-2^\circ$  в направлении первой оси ( $L_1$ ). Наиболее старые цефеиды (163 звезды,  $r < 20$  кпк,  $P < 5^d$ ) показывают существенно другую ориентацию линии узлов  $l_\Omega = 298^\circ$ .

Оценка возвышения Солнца над плоскостью Галактики, полученная по 365 звездам из интервала  $r < 4$  кпк, без ограничения на период пульсаций  $P$  составила  $h_\odot = 23 \pm 5$  пк.

Рассмотрены пространственные скорости 205 долгопериодических ( $P \geq 5^d$ ) классических цефеид. Для анализа их кинематики применена линейная модель Огородникова—Милна. Из наблюдаемых скоростей заранее было исключено галактическое вращение, найденное на основе более сложной модели. Обнаружены два заметных градиента  $\partial W/\partial Y = -2.1 \pm 0.7$  км/с/кпк и  $\partial V/\partial Z = 27 \pm 10$  км/с/кпк. Это позволяет заключить, что угловая скорость твердотельного вращения вокруг галактической оси  $x$  составляет  $\Omega_W = -15 \pm 5$  км/с/кпк, что мы связываем с проявлением изгиба звездно-газового диска Галактики.

## Литература

1. Fouqu P., Arriagada P., Storm J. et al. // *Astron. Astrophys.* Vol. 476. P. 73. 2007.
2. Berdnikov L. N., Dambis A. K., Vozyakova O. V. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* Vol. 143. P. 211. 2000.
3. Westerhout G. // *Bull. Astron. Inst. Netherlands.* Vol. 13. P. 201. 1957.
4. Burton W. B. *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy* / ed. G. Verschuur, K. Kellerman. New York: Springer-Verlag, 1988. 295 p.
5. Fernie J. D. // *Astron. J.* Vol. 73. P. 995. 1968.
6. Бердников Л. Н. // *Письма в Астрон. журн.* Т. 13. С. 110. 1987.

7. Miyamoto M., Zhu Z. // Astron. J. Vol. 115. P. 1483. 1998.
8. Бобылев В. В. // Письма в Астрон. журн. Т. 36. С. 667. 2010.
9. Казаровец Е. В., Самусь Н. Н., Дурлевич О. В. и др. // Астрон. журн. Т. 86. С. 1088. 2009.
10. Acharov A. I., Mishurov Yu. N., Kovtyukh V. V. // MNRAS. Vol. 420. P. 1590. 2012.
11. Feast M., Whitelock P. // MNRAS. Vol. 291. P. 683. 1997.
12. Ефремов Ю. Н. // Астрон. журн. Т. 80. С. 1086. 2003.
13. Mishurov Yu. N., Zenina I. A., Dambis A. K., et al. // Astron. Astrophys. Vol. 323. P. 775. 1997.
14. Гончаров Г. А. // Письма в Астрон. журн. Т. 32. С. 844. 2006.
15. Zacharias N., Finch C., Girard T., et al. // Astron. J. Vol. 145. P. 44. 2013.
16. Полак И. Ф. Введение в звездную астрономию. М.; Л.: ОНТИ, 1935.
17. Паренаго П. П. // Тр. ГАИШ. Т. 20. С. 26. 1951.
18. Павловская Е. Д. Практические работы по звездной астрономии / под ред. П. Г. Куликовского. М.: Наука, 1971. 162 с.
19. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. М.: Физматгиз, 1965.
20. Joshi Y. C. // MNRAS. Vol. 378. P. 768. 2007.
21. Бобылев В. В., Байкова А. Т., Степаннищев А. С. // Письма в Астрон. журн. Т. 34. С. 570. 2008.
22. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200. 1997.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2014 г.

Сведения об авторах

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

## THE ORIENTATION AND KINEMATICS OF THE SYSTEM OF CEPHEIDS IN THE GALAXY

*Vadim V. Bobylev*

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

From distribution of long-periodic cepheids the parameters of orientation of their main plane in the Galaxy is determined. From 299 stars with heliocentric distances  $r < 20$  kpc and periods of pulsations  $P \geq 5^d$  are shown that the line of nodes is very close to the direction to the Galaxy center, the plane of symmetry of cepheids is inclined to the Galaxy plane by  $\approx -2^\circ$  in the direction of  $\approx 270^\circ$ . The direction of the line of nodes found from old cepheids ( $P < 5^d$ ), differs significantly and is  $298^\circ$ . Assessment of the elevation of the Sun above the Galaxy plane amounted to  $h_\odot = 23 \pm 5$  pc. Spatial velocities of 205 long-periodic ( $P \geq 5^d$ ) classical cepheids was analyzed. The linear Ogorodnikov–Milne model was used when galactic rotation was excluded from velocities. Two significant gradients  $\partial W/\partial Y = -2.1 \pm 0.7$  km c<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup> and  $\partial V/\partial Z = 27 \pm 10$  km c<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup> was found. Angular velocity of rigid-body rotation around galactic axes directed to Galaxy center is  $-15 \pm 5$  km c<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup>. Refs 22. Figs 3. Tables 1.

*Keywords:* Galactic structure, classical cepheids, Galactic Warp.