



## Изучение структуры и кинематики Галактики по данным о классических цефеидах

В.В. Бобылев<sup>1\*</sup>; А.Т. Байкова<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> ГАО РАН

### Аннотация

Классические цефеиды имеют важное значение для изучения свойств галактического диска, спиральной структуры Галактики, ее вращения, эволюции и др. В настоящей статье дан обзор основных результатов изучения структуры и кинематики Галактики, которые были получены различными научными коллективами с использованием классических цефеид. Основное внимание уделено результатам изучения Галактики, полученным авторами настоящей работы. Рассмотрены такие вопросы, как: а) характер пространственного распределения цефеид в Галактике, как вблизи экваториальной плоскости Галактики, так и в вертикальном направлении; в частности, рассмотрена пространственная и кинематическая связь цефеид с крупномасштабным искривлением галактического диска; б) применение молодых цефеид для уточнения параметров спирального узора Галактики; в) использование молодых цефеид для уточнения параметров вращения Галактики и скоростей возмущения, вызванных влиянием галактической спиральной волны плотности.

### Введение

Цефеиды — это класс пульсирующих переменных звезд. Свое название они получили от звезды-прототипа  $\delta$  Цефея ( $\delta$  Cep), принадлежащей созвездию Цефея. Переменность блеска цефеид определяется их радиальными пульсациями. Благодаря соотношению период–светимость (Leavitt, 1908; Leavitt и Pickering, 1912) удается с высокой точностью оценивать расстояния до этих звезд. В конечном итоге это позволяет установить независимую цефеидную шкалу расстояний, и охватить ею значительную область Вселенной. Отметим, что именно благодаря цефеидам Эдвин Хаббл открыл эффект расширения Вселенной (Hubble, 1929).

Различным аспектам изучения цефеид в Галактике посвящено огромное количество научных публикаций, например, Mishurov и др., 1997; Bobylev, 2013; Groenewegen, 2018; Skowron и др., 2019; Mroz и др., 2019; Lazovik и Rastorguev, 2020; Ablimit и др., 2020; O. Nikiforov, Levkin и Simak, 2023; Feast и Whitelock, 1997; Mel’Nik, Dambis и Rastorguev, 1999; Caputo, Marconi и Musella, 2000; Berdnikov, Dambis и Vozyakova, 2000; Rastorguev и Dambis, 2011; Zabolotskikh, Rastorguev и Dambis, 2002; Efremov, 2003. Это далеко не полный список. Отметим работу Pietrukowicz, Soszynski и Udalski, 2021, где отражены современные статистические данные о наблюдениях цефеид в Галактике.

В последнее время вопрос определения расстояний до цефеид особенно обострился в связи с различием в значениях постоянной Хаббла, найденных по цефеидам и сверхновым типа Ia,  $H_0 = 73.2 \pm 1.3$  км/с/Мпк (Riess, Macri и др., 2016; Riess, Casertano и др., 2021), а также по измерениям космического спутника Planck,  $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  км/с/Мпк (Planck Collaboration и Aghanim, 2020). Интересный обзор проблемы дан в работе López-Corredoira, 2022.

Цефеиды являются гигантами и сверхгигантами спектральных классов F–G–K. Их блеск изменяется с амплитудой в  $1\text{--}2^m$ , а спектральный класс изменяется от F5–F8 в максимуме до F7–K1 в минимуме. На диаграмме Герцшпрунга–Рессела цефеиды несколько раз пересекают полосу

\*e-mail: vbobylev@gaoran.ru

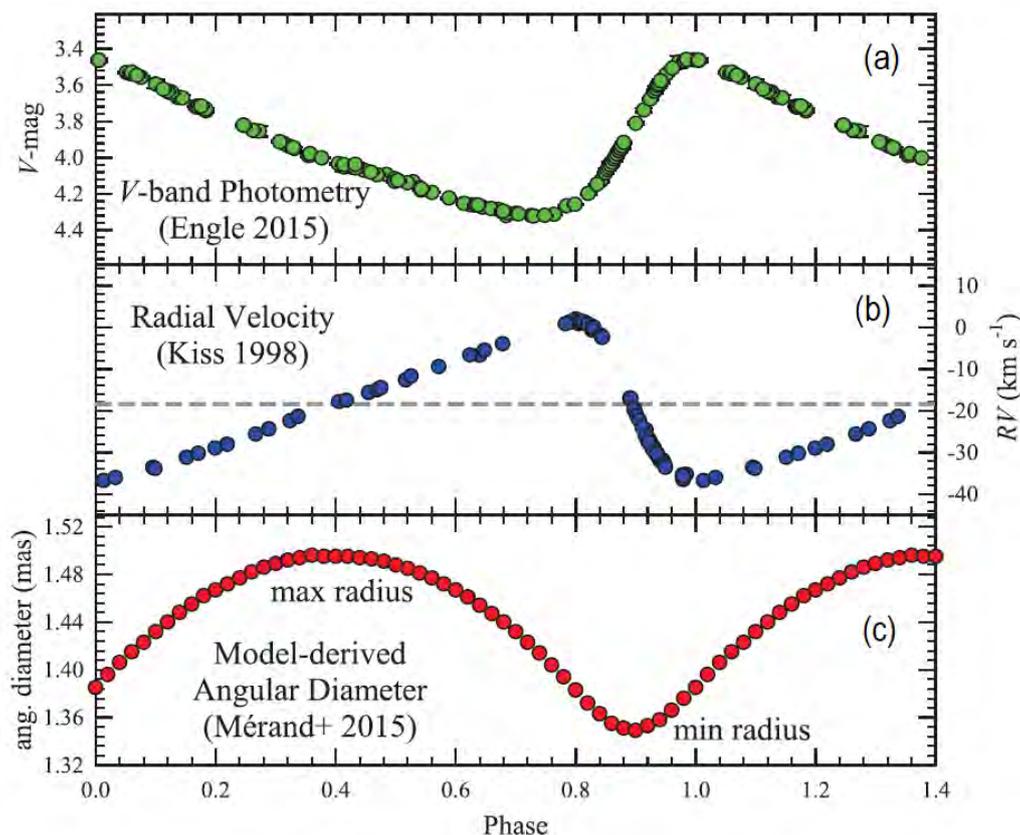


Рис. 1: (a) кривая блеска звезды  $\delta$  Цефея в видимом диапазоне, (b) кривая изменения ее лучевых скоростей и (c) кривая изменения углового диаметра этой звезды в зависимости от фазы пульсации. Это часть рисунка, взятая из работы S. G. Engle и др., 2017.

нестабильности в процессе своей эволюции. Кривые блеска цефеид отличаются довольно быстрым ростом яркости и более медленным спадом.

Для примера на рис. 1 для звезды  $\delta$  Цефея (звезды-прототипа класса цефеид) дана кривая блеска в видимом диапазоне (согласно наблюдениям S. Engle, 2015), кривая изменения лучевых скоростей (согласно работе Kiss, 1998) и кривая изменения углового диаметра  $\delta$  Цефея (по данным Mérand и др., 2015) в зависимости от фазы пульсации.

Цефеиды делятся на два основных класса – классические цефеиды (I тип) и цефеиды II типа, которые также неоднородны и делятся на подклассы. Звезды этих классов сильно различаются массами и возрастами, находятся на разных стадиях эволюции и принадлежат различным звездным популяциям, а также имеют разные зависимости между периодом и светимостью.

Классическими являются цефеиды с периодами пульсации от 1 до 100 дней. Абсолютные звездные величины таких звезд лежат в диапазоне от  $-0.5^m$  до  $-6^m$ . Массы их заключены в интервале  $3-18 M_{\odot}$ , а возрасты не превышают примерно 400 млн лет. Классические цефеиды являются молодыми звездами населения I. Они принадлежат плоской подсистеме Галактики, тесно связаны с рассеянными звездными скоплениями, трассируют спиральный узор, распределены по всему галактическому диску. Поэтому классические цефеиды имеют важное значение для изучения свойств тонкого диска Галактики, спиральной структуры, кинематики, динамики и эволюции Галактики.

Цефеиды типа II это старые звезды населения II, принадлежащие сферической подсистеме Галактики. Они встречаются в основном в шаровых звездных скоплениях и подчиняются иной зависимости период-светимость, нежели классические цефеиды. Абсолютные звездные величины таких звезд лежат в диапазоне от  $0^m$  до  $-3^m$ , а периоды чаще всего составляют 12–28 суток. Массы цефеид типа II заключены в диапазоне  $0.5-0.8 M_{\odot}$ , а их возраст составляет более 10 млрд

лет.

Для определения гелиоцентрического расстояния до звезды  $r$  с использованием фотометрических данных служит соотношение следующего вида:

$$r = 10^{-0.2(\langle M_\lambda \rangle - \langle m_\lambda \rangle - 5 + A_\lambda)}, \quad (1)$$

где  $m_\lambda$  – усредненное за определенный период значение видимой звездной величины цефеиды в какой-либо фотометрической полосе  $\lambda$ ;  $M_\lambda$  – значение абсолютной звездной величины цефеиды, которую можно установить на основе соотношения период–светимость и  $A_\lambda$  – межзвездное поглощение в соответствующей фотометрической полосе  $\lambda$ .

Например, согласно Fouqué и др., 2007, в видимом диапазоне ( $V$ ) соотношение период–светимость выглядит так:

$$\langle M_V \rangle = -1.275 - 2.678 \log P, \quad (2)$$

где период пульсаций  $P$  выражается в сутках. Иногда соотношение (2) преобразуют в соотношение период–светимость–металличность путем добавления члена, зависящего от индекса металличности (Groenewegen, 2018).

Ошибка определения расстояний до цефеид, согласно оценкам различных авторов (Berdnikov, 1987; Sandage и Tammann, 2006), составляет 10–15% при использовании данных в видимом диапазоне. Известно, что при оценивании фотометрических расстояний до звезд влияние межзвездного поглощения существенно снижается (увеличивается точность оценки расстояния) в случае использования данных из инфракрасного диапазона. Так, в инфракрасной полосе  $K_s$  значение поглощения почти на порядок меньше, чем в оптическом диапазоне  $A_{K_s}/A_V = 0.12$  (например, Wang и др., 2018).

При построении шкалы расстояний во Вселенной цефеиды играют важную роль, однако они не являются первой ступенью такой шкалы. Т.е., соотношение типа (2) необходимо откалибровать (оценить значения свободного члена и коэффициента при логарифме периода пульсаций) с использованием наиболее точных наблюдений. В настоящее время источниками таких наиболее точных измерительных данных являются каталоги с измеренными тригонометрическими параллаксами звезд. Это каталоги, полученные в результате космических наблюдений, такие как Hipparcos (Esa, 1997) и Gaia (Gaia Collaboration и Brown, 2016), а также наблюдения цефеид, например, с борта космического телескопа им. Хаббла. В частности, одна из наилучших современных калибровок 10 цефеид проведена в работе Benedict и др., 2007 с привязкой к наблюдениям телескопа им. Хаббла.

Отметим важнейший для нас каталог Skowron и др., 2019, где для 2431 классической цефеиды дано расстояние, возраст, период пульсации и фотометрические данные. Основу каталога составили наблюдения переменных звезд, выполненные в рамках программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Udalski, M. K. Szymanski и G. Szymanski, 2015). Звездные величины цефеид в каталоге лежат в диапазоне от  $I = 11^m$  до  $I = 18^m$ . Расстояния до цефеид были вычислены на основе калибровочных соотношений период–светимость, найденных в работе Wang и др., 2018 по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне для восьми полос. Это четыре полосы каталога космического телескопа WISE, W1–W4: [3.35], [4.60], [11.56] и [22.09] мкм и четыре полосы обзора GLIMPSE (это наблюдения с борта космического телескопа им. Спитцера): [3.6], [4.5], [5.8] и [8.0] мкм. Расстояния до цефеид Skowron и др., 2019 вычислили на основе соотношения (1), поэтому для каждой звезды они нашли значение поглощения  $A_{K_s}$  по картам поглощения (различных авторов). Расстояния в каталоге даны для цефеид, пульсирующих в фундаментальной моде, а также в первом обертоне (калибровочные соотношения период–светимость для разных типов пульсаций отличаются). Согласно этим авторам, ошибка определения расстояния до цефеид в их каталоге составляет ~5%.

Часто используется соотношение период–Весенхейт Madore, 1982. Суть подхода заключается в получении соотношения период–светимость уже с учетом покраснения. Иногда такой подход еще называют соотношением период–светимость–цвет. Функции Весенхейта  $W_\lambda$  и  $w_\lambda$  для фото-

метрических полос  $m_\beta$  и  $m_\lambda$  выглядят так

$$\begin{aligned} W_\lambda &= a + b \log P, \\ w_\lambda &= m_\lambda - R_{\beta\lambda}(m_\beta - m_\lambda), \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициент  $R_\lambda$  является отношением общего поглощения к селективному,  $R_{\beta\lambda} = A_\lambda/E(m_\beta - m_\lambda)$ . Его можно рассчитать из теоретических соображений (например,  $R_{JK_S} = 0.69$  согласно Wielgórski и др., 2022), а при калибровке можно уточнить (Caputo, Marconi и Musella, 2000). В конечном итоге имеем

$$r = 10^{-0.2(W_\lambda - w_\lambda - 5)}, \quad (4)$$

где  $W_\lambda$  — вычисляемая по периоду пульсаций и калибровочным константам абсолютная звездная величина Весенхейта, и  $w_\lambda$  — вычисляемая по фотометрическим данным видимая звездная величина Весенхейта (Riess, Casertano и др., 2021; lin и др., 2022). В настоящее время соотношения период–светимость и период–Весенхейт хорошо откалиброваны с использованием высокоточных тригонометрических параллаксов звезд (Groenewegen, 2018; Benedict и др., 2007; Ripepi, Molinaro и др., 2019; Ripepi, Catanzaro и др., 2022).

В работе Lazovik и Rastorguev, 2020 предложено соотношение период–светимость получать новым методом, использующим многофазные измерения температуры, что позволяет наиболее точно рассчитать индивидуальные избытки цвета цефеид. Метод основан на подходе Бааде–Беккера–Весселинка (Baade, 1926; Becker, 1940; Wesselink, 1946) и практически не использует тригонометрические параллаксы.

Известны простые соотношения, позволяющие по периоду пульсации оценивать возраст цефеиды (Efremov, 2003; Woно и др., 2005). Оценки возраста цефеид в работе Skowron и др., 2019 сделаны более строго с применением методики Anderson и др., 2016, где дополнительно учитываются периоды осевого вращения звезд и индексы металличности.

Целью настоящей работы является обзор основных результатов кинематического анализа классических цефеид, выполненных нами в последнее время. Статья структурирована следующим образом. В главах 1 и 2 приведена статистика цефеид, определены используемые системы координат. В разделах 3.1 и 3.2 отражены результаты пространственного распределения большой выборки цефеид. Раздел 3.3 посвящен анализу вращения Галактики по данным об этих цефеидах, раздел 3.4 — проявлению галактической спиральной волны плотности в скоростях цефеид, а раздел 3.5 посвящен анализу вертикальных скоростей цефеид.

## 1 Немного статистики

В таблице 1, взятой из обзора Pietrukowicz, Soszynski и Udalski, 2021, собраны современные статистические данные о 3352 подтвержденных классических цефеидах в Галактике.

OGLE — это эксперимент по оптическому гравитационному линзированию, который осуществляется с 1997 года с использованием 1.3-м телескопа Warsaw, расположенного в обсерватории Лас Кампанас в Чили (Udalski, M. K. Szymanski и G. Szymanski, 2015).

В общем каталоге переменных звезд (ОКПЗ, Samus' и др., 2017), наряду с другими переменными звездами, собраны визуальные, фотографические, фотоэлектрические, ССD-наблюдения и другие наземные наблюдения классических цефеид со времен их открытия. Т.о., это наиболее продолжительные и плотные наблюдения ярких цефеид. Наблюдения охватывают полосы V, V, I, J, H, K. Важно отметить, что для цефеид ОКПЗ имеются надежные измерения системных лучевых скоростей цефеид,  $V_\gamma$  (см. рис. 1).

По программе ZTF (Zwicky Transient Facility) с 2018 года осуществляется оптический мониторинг (вплоть до  $I=20.5^m$ ) северной части неба с использованием 1.2-м телескопа Самуэля Ошина в Паломарской Обсерватории в США. Во втором выпуске обзора, ZTF DR2, обнаружено 781 602 переменные звезды, включая 582 кандидата в классические цефеиды Chen, Wang, Deng, de Grijs, Yang и Tian, 2020.

Таблица 1: Вкладчики в список классических цефеид Галактики согласно Pietrukowicz, Soszynski и Udalski, 2021.

Количество цефеид	Программа	Ссылка
1690	OGLE	Pietrukowicz, Soszynski и Udalski, 2021
737	ОКПЗ	Samus' и др., 2017
422	ZTF-DR2	Chen, Wang, Deng, de Grijs и Yang, 2018
161	ASAS-SN	Kochanek и др., 2017
139	ATLAS	Tonry и др., 2018
108	ASAS	Kochanek и др., 2017)
40	NSVS	Hoffman, Harrison и McNamara, 2009
21	VVV	Dekany и др., 2019
12	WISE	Chen, Wang, Deng, de Grijs и Yang, 2018
2	Gaia DR2	Gaia Collaboration и Brown, 2018
17	другие	
Всего: 3352		

Обзор неба ASAS (All-Sky Automated Survey for Supernovae) был начат с установки первой станции на Гавайях в 2013 году. Год спустя проект был расширен на южное небо, где была создана станция в Межамериканской обсерватории Серро Тололо, Чили. ASAS-SN патрулирует все небо в поисках сверхновых и различных переменных до  $V=17^m$  (Kochanek и др., 2017).

Система последнего оповещения об ударе астероида о землю, ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System, Tonry и др., 2018), использует два 0.5-м телескопа Шмидта в Гавайской обсерватории Халеакала с 2015 года и обсерватории Мауна-Лоа с 2017 года.

Проект NSVS (Northern Sky Variability Survey, Woźniak и др., 2004) был осуществлен в Лос-Аламосе, Нью-Мексико, США, в рамках исследования изменчивости Северного неба. В ходе исследования наблюдалось все северное полушарие, а также южные поля вплоть до  $\delta = -38^\circ$  в течение одного полного года. Hoffman, Harrison и McNamara, 2009 выполнили классификацию звезд NSVS и идентифицировали несколько сотен долгопериодических переменных, включая цефеиды.

Проект VVV (VISTA Variables in the Via Lactea, Minniti и др., 2010) представляет собой обзор ESO, проведенный на 4.1-м телескопе VISTA, расположенном в обсерватории Паранал в Чили. Наблюдения в диапазонах ZYJH, полученные в 2010-2019 гг, привели к обнаружению 689 кандидатов в классические цефеиды (Dekany и др., 2019).

Обзор WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Wright и др., 2010) выполнен в результате космической миссии, данные которой были использованы для поиска переменных. В частности, Chen, Wang, Deng, de Grijs и Yang, 2018 сообщили об обнаружении 1312 кандидатов в цефеиды.

В электронной версии списка Pietrukowicz, Soszynski и Udalski, 2021:

<https://www.astrouw.edu.pl/ogle/ogle4/OCVS/allGalCep.listID>

на сентябрь 2022 года содержатся данные о 3666 классических цефеидах.

## 2 Системы координат

Из наблюдений имеем три следующие составляющие скорости звезды: лучевую скорость  $V_r$  и две проекции тангенциальной скорости  $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$  и  $V_b = 4.74r\mu_b$ , направленные вдоль галактической долготы  $l$  и широты  $b$  соответственно. Все три скорости выражены в км/с, 4.74 является коэффициентом размерности, а  $r$  — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$  выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты  $V_r, V_l, V_b$  вычисляются скорости  $U, V, W$ , направленные вдоль прямоугольных

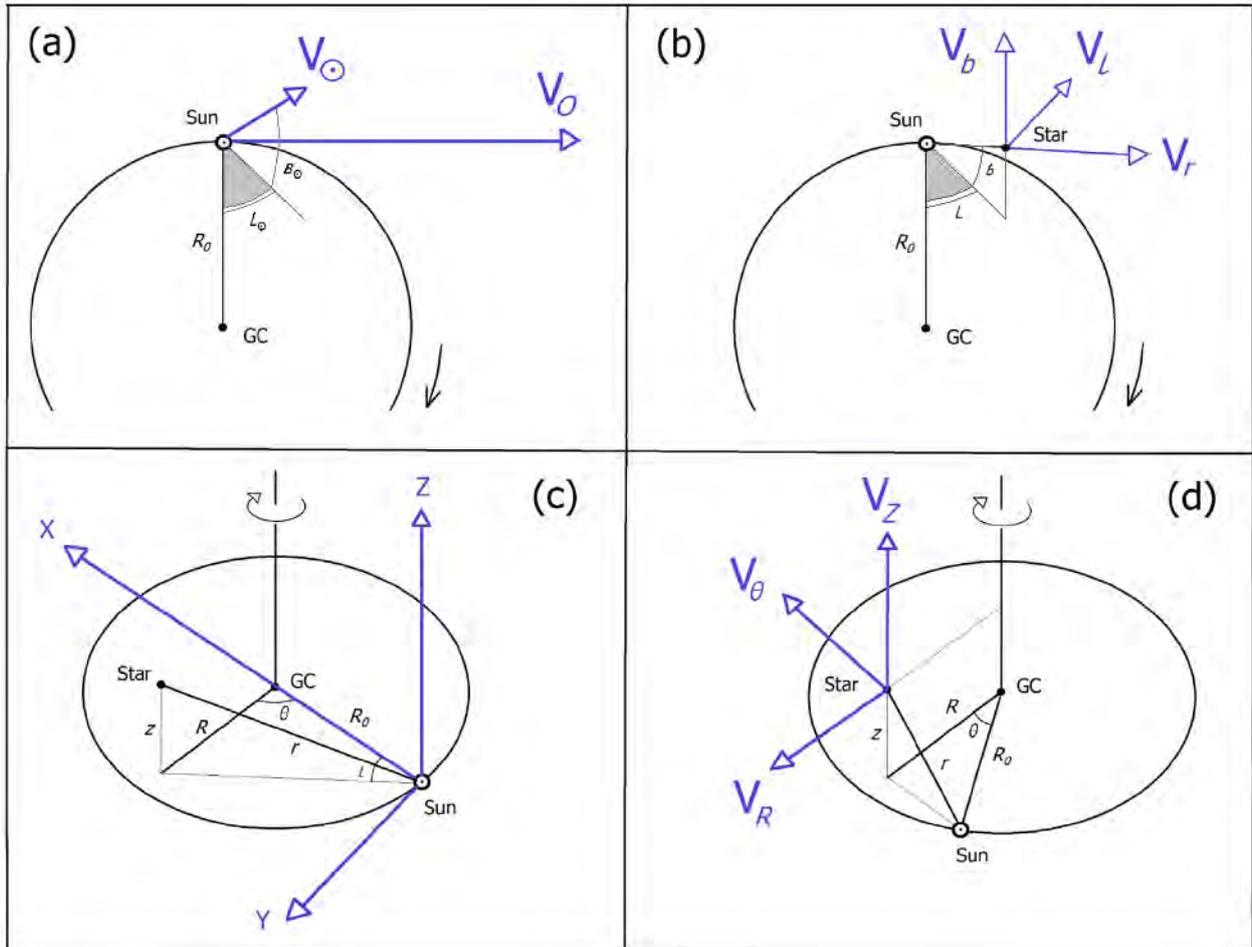


Рис. 2: (а) Круговая скорость вращения Солнца  $V_0$  вокруг центра Галактики (GC) на расстоянии  $R_0$ , пекулярная скорость Солнца  $V_{\odot}$  и его направление  $L_{\odot}$ ,  $B_{\odot}$  (апекс скорости Солнца), (b) скорости  $V_r$ ,  $V_l$  и  $V_b$ , (c) система координат  $x, y$  и  $z$ , а также (d) цилиндрическая система координат  $V_R$ ,  $V_{\theta}$  и  $V_Z$ , где тонкие черные стрелки указывают направление вращения Галактики. Рисунок взят из работы Bobylev, Vajkova и др., 2021.

галактических осей координат  $x, y, z$ :

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x, y, z$  — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды, скорость  $U$  направлена от Солнца к центру Галактики,  $V$  в направлении вращения Галактики и  $W$  на северный галактический полюс. Две скорости:  $V_R$ , направленную радиально от галактического центра и ортогональную ей скорость  $V_{circ}$  (иногда применяем обозначение  $V_{\theta}$ ), направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{circ} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (6)$$

где позиционный угол  $\theta$  удовлетворяет соотношению

$$\tan \theta = y / (R_0 - x), \quad (7)$$

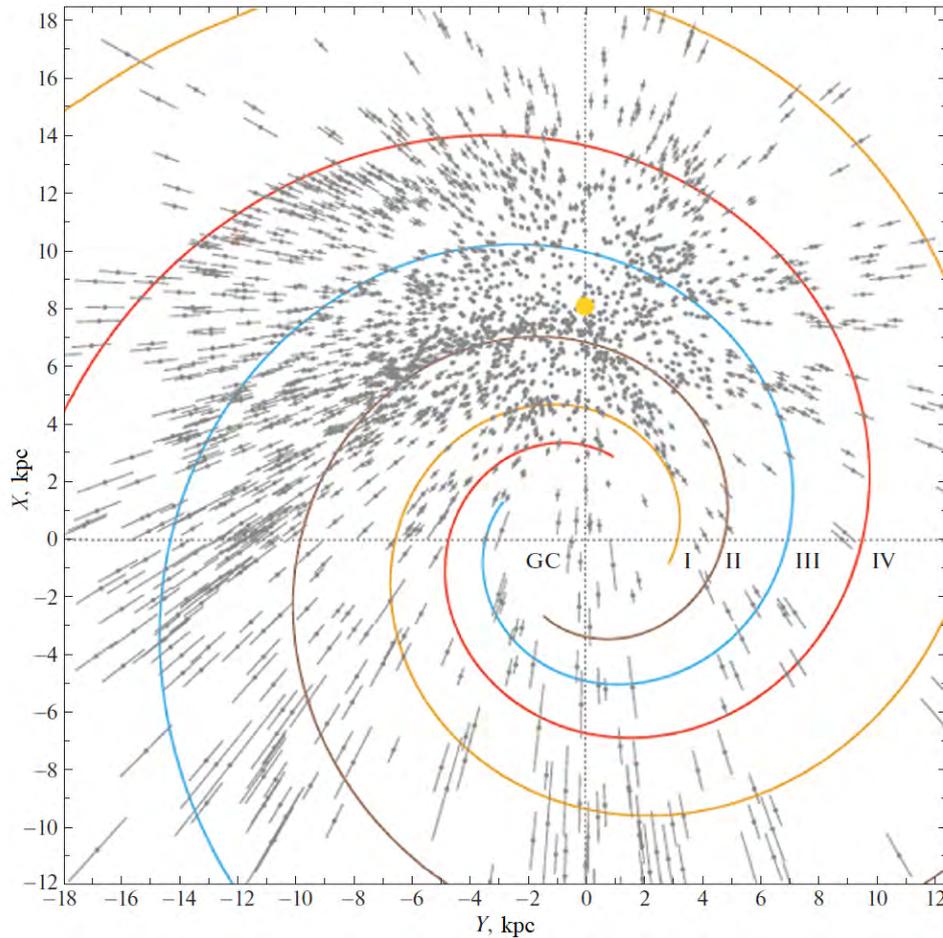


Рис. 3: Распределение цефеид в проекции на галактическую плоскость  $XY$ , положение Солнца отмечено желтым кружком, GC обозначает центр Галактики, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки  $i = -13^\circ$ , спиральные рукава пронумерованы римскими цифрами. Рисунок взят из работы Vobylev и Vajkova, 2022a.

$V_0$  — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии  $R_0$ . Расстояние от звезды до оси вращения Галактики  $R$  вычисляется на основе соотношения

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (8)$$

В настоящей работе значение  $R_0$  принимается равным  $8.1 \pm 0.1$  кпк согласно обзору Vobylev и Vajkova, 2021a, где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

На рис. 2 даны основные системы координат и компоненты скоростей, с которыми мы работаем при изучении структуры и кинематики Галактики. Отметим, что довольно часто используется также прямоугольная система координат  $X, Y, Z$ , в которой ось  $X$  направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси  $Y$  совпадает с направлением вращения Галактики, а ось  $Z$  направлена в северный полюс Галактики.

На рис. 3 дано распределение цефеид из работы Skowron и др., 2019 в проекции на галактическую плоскость  $XY$ . Бары ошибок соответствуют оценкам расстояния там же. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки  $i = -13^\circ$ , значение которого найдено в работе Vobylev и Vajkova, 2014 по выборке мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами. Здесь спиральный узор был построен со значением  $R_0 = 8.1$  кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля-Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав. Выбран такой масштаб, что часть далеких цефеид все же осталась за пределами рисунка.

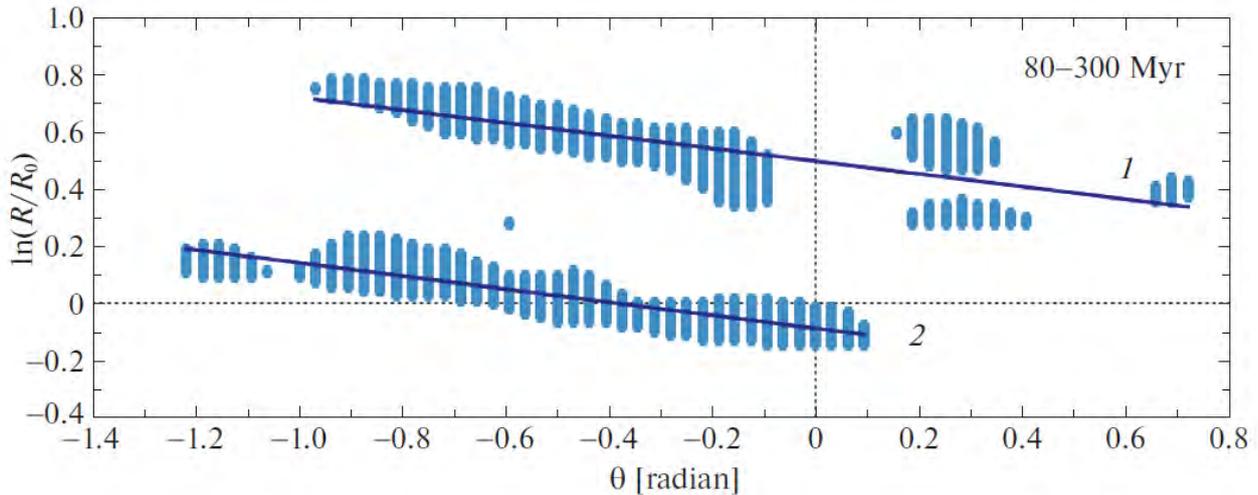


Рис. 4: Вэйвлет-карта на диаграмме “позиционный угол–логарифм расстояния”, построенная по объединенной выборке цефеид с возрастaми в интервале 80–300 млн лет, линия 1 проведена по Внешнему рукаву, а линия 2 по рукаву Киля-Стрельца. Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022a.

На рис. 3 даны цефеиды различного возраста, вплоть до 400 млн лет. Хорошо видна концентрация цефеид только к отрезку рукава Киля-Стрельца, где большинство составляют достаточно молодые (менее 140 млн лет) звезды. Более детальные распределения цефеид различного возраста на плоскости  $XU$  можно найти на рис. 3 работы Skowron и др., 2019. В частности, там показано, что принадлежность к отрезку спирального рукава Киля-Стрельца демонстрируют цефеиды с возрастaми в интервале 90–140 млн лет.

### 3 Цефеиды и свойства Галактики

#### 3.1 Галактический спиральный узор

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно описать следующим уравнением:

$$R = R_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan i}, \quad (9)$$

где  $\theta$  — позиционный угол (7),  $\theta_0$  — некоторый произвольно выбранный начальный угол;  $i$  — угол закрутки спирального узора ( $i < 0$  для закручивающейся спирали).

Так как  $\theta_0$  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 (9) после логарифмирования можно переписать так:  $\ln(R/R_0) = \theta \tan i + \text{const}$ , или в более удобном виде

$$\ln(R/R_0) = a\theta + b. \quad (10)$$

Как можно видеть, соотношение (10) 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  $a_0$  задает радиальное положение центра спирального рукава на оси  $X$ . В этом методе оценка угла закрутки  $i$  не зависит от количества спиральных рукавов.

В работах Bobylev, 2022 и Bobylev и Vajkova, 2022a изучены выборки классических цефеид различного возраста из работы Skowron и др., 2019. На рис. 4 дана вэйвлет-карта на диаграмме

“позиционный угол–логарифм расстояния”, построенная по выборке цефеид с возрастными в интервале 80–300 млн лет. Благодаря особенностям выборки цефеид в каталоге Skowron и др., 2019 охваченными оказались только два отрезка спиральных рукавов — Киля-Стрельца и Внешнего.

По 257 цефеидам, принадлежащим отрезку рукава Киля-Стрельца, с возрастными в интервале 80–120 млн лет найдено значение угла закрутки спирального узора  $i = -12.7 \pm 0.4^\circ$  и положение этого рукава  $a_0 = 7.28 \pm 0.05$  кпк. По 352 цефеидам из Внешнего рукава с возрастными в интервале 120–300 млн лет найдены  $i = -12.0 \pm 0.5^\circ$  и  $a_0 = 13.03 \pm 0.06$  кпк. По выборке из 1618 цефеид с возрастными в интервале 80–300 млн лет построена вэйвлет-карта в плоскости “позиционный угол–логарифм расстояния”. Из анализа этой карты для рукава Киля-Стрельца получены следующие оценки:  $i = -12.9 \pm 0.4^\circ$  и  $a_0 = 7.43 \pm 0.05$  кпк, а для Внешнего рукава  $i = -12.5 \pm 0.5^\circ$  и  $a_0 = 13.33 \pm 0.06$  кпк.

В рамках модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, мы заключили, что значение этого угла близко к  $-12.5^\circ$ . Мы нашли также, что Солнце находится очень близко к радиусу коротации, который расположен между Солнцем и рукавом Персея, и получили оценку угловой скорости вращения спирального узора  $\Omega_p = 27 \pm 1$  км/с/кпк.

Некоторые авторы предпочитают говорить не глобальной структуре спирального узора Галактики, а более осторожно — об отдельных сегментах спиральных рукавов с индивидуальными углами наклона (I. I. Nikiforov и Veselova, 2018; Veselova и I. Nikiforov, 2020). Оценки углов закрутки, найденные по индивидуальным отрезкам спиральных рукавов, заключены в интервале  $9\text{--}18^\circ$  (Griv, Jiang и L.-G. Hou, 2017; Reid, Menten, Brunthaler, Zheng, Dame, Xu, Li и др., 2019; Hao и др., 2021). Обсуждение современной наблюдаемой картины, связанной со спиральной структурой Галактики, можно найти, например, в обзорах L. G. Hou и Han, 2014, Vallée, 2017, Xu, L.-G. Hou и Y.-W. Wu, 2018 или L. G. Hou, 2021.

### 3.2 Радиальное и вертикальное распределение цефеид

В случае экспоненциального распределения плотности материи в радиальном направлении (вдоль расстояния звезды от центра Галактики  $R$ ), наблюдаемая гистограмма распределения объектов описывается выражением следующего вида:

$$N(R) = N_R \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right), \quad (11)$$

где  $N_R$  — нормировочный коэффициент. В вертикальном направлении (вдоль координатной оси  $z$ ) аналогичное выражение имеет похожий вид:

$$N(z) = N_z \exp\left(-\frac{|z - z_\odot|}{h_z}\right), \quad (12)$$

где значение  $z_\odot$  отражает факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики,  $N_z$  — соответствующий нормировочный коэффициент.

В работе Vobylev и Vajkova, 2021b изучено пространственное распределение цефеид в Галактике на основе модели экспоненциального распределения плотности. Использовались цефеиды из каталога Skowron и др., 2019. В итоге были получены новые оценки радиальной шкалы диска  $h_R$ , расстояния Солнца от плоскости симметрии  $z_\odot$  и вертикальной шкалы диска  $h_z$ .

В частности, по 1087 цефеидам моложе 120 млн лет было найдено  $h_R = 2.30 \pm 0.09$  кпк и  $h_R = 1.96 \pm 0.12$  кпк по 1127 цефеидам старше 120 млн лет. Гистограмма радиального распределения выборки цефеид дана на рис. 5. Оказалось, что по общему радиальному распределению цефеид всех возрастов однозначную оценку  $h_R$  получить невозможно (горб на сером контуре рисунка). Однако было построено радиальное распределение 806 цефеид разного возраста на момент их рождения, по которому мы нашли  $h_R = 2.36 \pm 0.24$  кпк.

Показано, что значение  $h_z$  сильно зависит от возраста звезд. По 705 цефеидам моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями  $r < 6$  кпк (при этом условии выборка полна) найдены

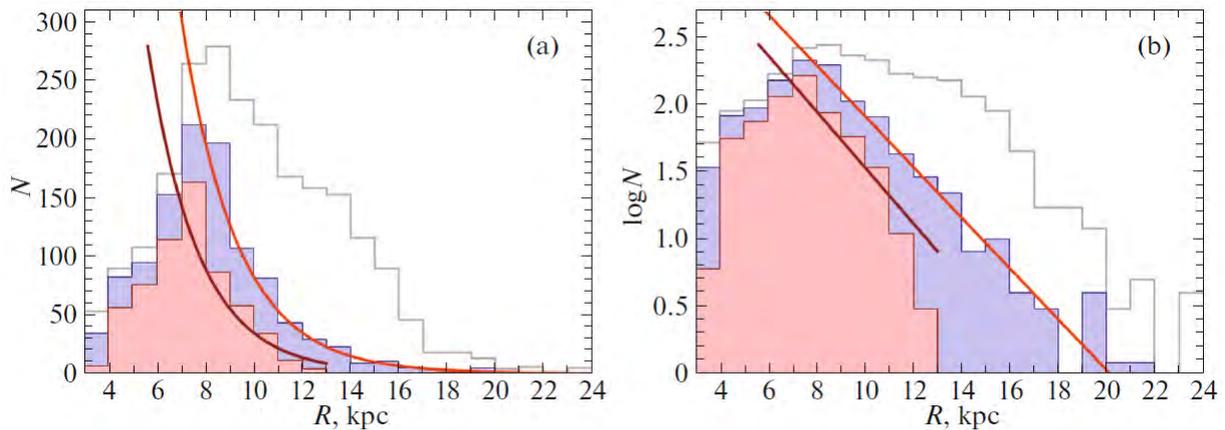


Рис. 5: Гистограммы радиального распределения цефеид в обычном (a) и логарифмическом масштабе (b), серым контуром дана гистограмма, построенная по всем 2214 цефеидам, синей заливкой — по цефеидам моложе 120 млн лет, красной заливкой — по цефеидам моложе 120 млн лет, отобранных в области радиусом 5 кпк от Солнца. Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2021b.

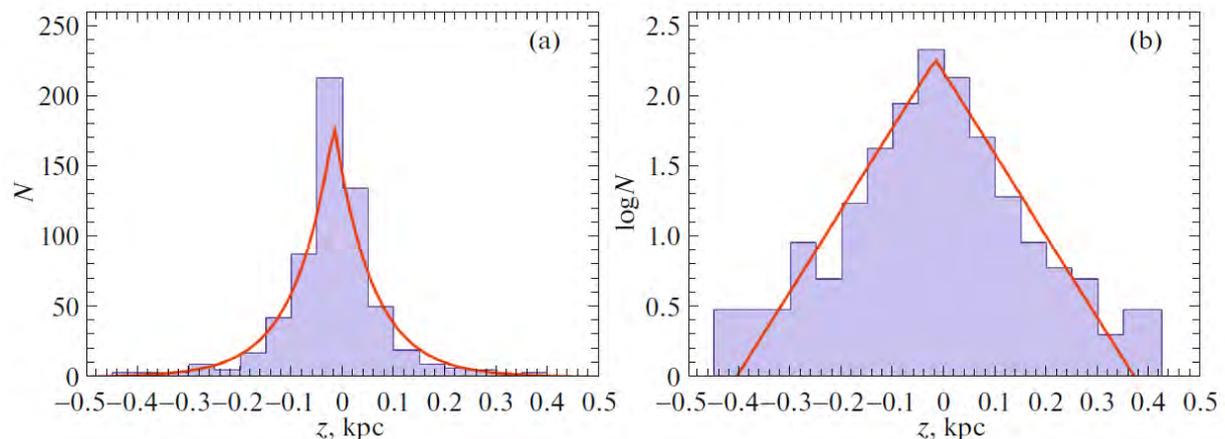


Рис. 6: Гистограмма вертикального распределения 705 цефеид моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями  $r < 6$  кпк в обычном (a) и логарифмическом масштабе (b). Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2021b.

$z_{\odot} = -17 \pm 4$  пк и  $h_z = 75 \pm 5$  пк. Гистограмма вертикального распределения этих цефеид дана на рис. 6. По 393 цефеидам старше 120 млн лет, при  $r < 6$  кпк, найдены  $z_{\odot} = -39 \pm 11$  пк и  $h_z = 131 \pm 10$  пк.

Достаточно давно установлена Berdnikov, 1987 и подтверждена в дальнейшем (например, Bobylev, 2013; Skowron и др., 2019; I. Nikiforov, Usik и Veselova, 2023) тесная связь пространственного распределения цефеид и их кинематики с крупномасштабным искривлением галактического диска (варпом).

В работе Skowron и др., 2019 на основе экспоненциального распределения плотности были найдены следующие значения:  $z_{\odot} = -14 \pm 3$  пк  $h_z = 73.5 \pm 3.2$  пк. Для этого были использованы все цефеиды внутри солнечного круга  $R < 8$  кпк, где можно избежать влияния варпа. Кроме того, этими авторами по всем цефеидам их каталога были уточнены параметры варпа. На рис. 7 дано пространственное распределение цефеид каталога там же и модель варпа.

В недавней работе I. Nikiforov, Usik и Veselova, 2023 был проведен анализ выборки классических цефеид из каталога Berdnikov, Dambis и Vozyakova, 2000 в версии Mel'nik и др., 2015. Каталог содержит данные о 674 цефеидах из Общего каталога переменных звезд Samus' и др.,

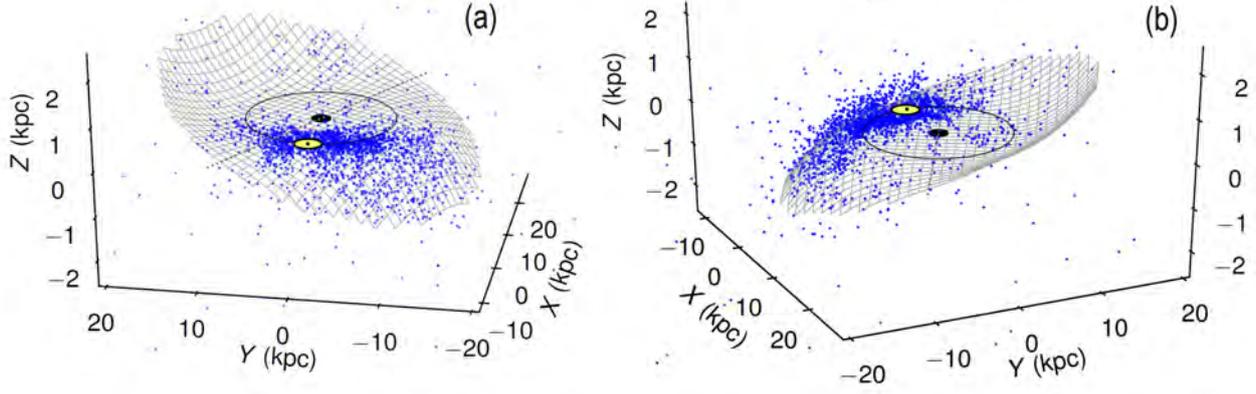


Рис. 7: Пространственное распределение всех цефеид из каталога Skowron и др., 2019 с двух точек зрения — синие точки, сеткой показана уточненная по цефеидам модель искривления галактического диска, желтым эллипсом отмечена околосолнечная окрестность, черным кружком отмечен центр Галактики. Это часть рисунка из работы Skowron и др., 2019.

2017. Т.о., в основном это существенно более яркие цефеиды по сравнению с каталогом Skowron и др., 2019. В прочем, около 200 цефеид являются общими между указанными каталогами (там же).

I. Nikiforov, Usik и Veselova, 2023 установили, что локальная оценка  $z_{\odot} = -28.1 \pm 6.1_{\text{stat.}} \pm 1.3_{\text{calc.}}$  пк близка к нелокальной  $z_{\odot} = -27.1 \pm 8.8_{\text{stat.}} \pm 1.3_{\text{calc.}}$  пк. По мнению этих авторов, это говорит о том, что использованный ими метод анализа устраняет влияние варпа на оценку  $z_{\odot}$ . При этом было показано, что нелокальная оценка вертикального стандартного отклонения цефеид  $\sigma_{\rho} = 132.0 \pm 3.7_{\text{stat.}} \pm 6.1_{\text{calc.}}$  пк значительно отличается от локальной  $\sigma_{\rho} = 76.5 \pm 4.4_{\text{stat.}} \pm 3.5_{\text{calc.}}$  пк, означающая необходимость внедрения сложных моделей за пределами окрестности Солнца.

### 3.3 Параметры вращения Галактики

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

$$\Omega(R) = \Omega(R_0) + \Omega'(R_0)(R - R_0) + \Omega''(R_0)(R - R_0)^2/2! + \dots \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} V_r = & -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l - W_{\odot} \sin b \\ & + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0/2 + \dots \\ & + R_0(R - R_0)^n \sin l \cos b \Omega_0^{(n)}/n!, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} V_l = & U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r \Omega_0 \cos b \\ & + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + (R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0/2 + \dots \\ & + (R - R_0)^n (R_0 \cos l - r \cos b) \Omega_0^{(n)}/n!, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} V_b = & U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b - W_{\odot} \cos b \\ & - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0/2 - \dots \\ & - R_0(R - R_0)^n \sin l \sin b \Omega_0^{(n)}/n!, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\Omega_0^{(i)}$  —  $i$ -я производная угловой скорости на солнечном круге ( $i = 1, \dots, n$ ),  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$  и  $W_{\odot}$  — компоненты групповой скорости (взятые с обратным знаком) анализируемой выборки звезд от-

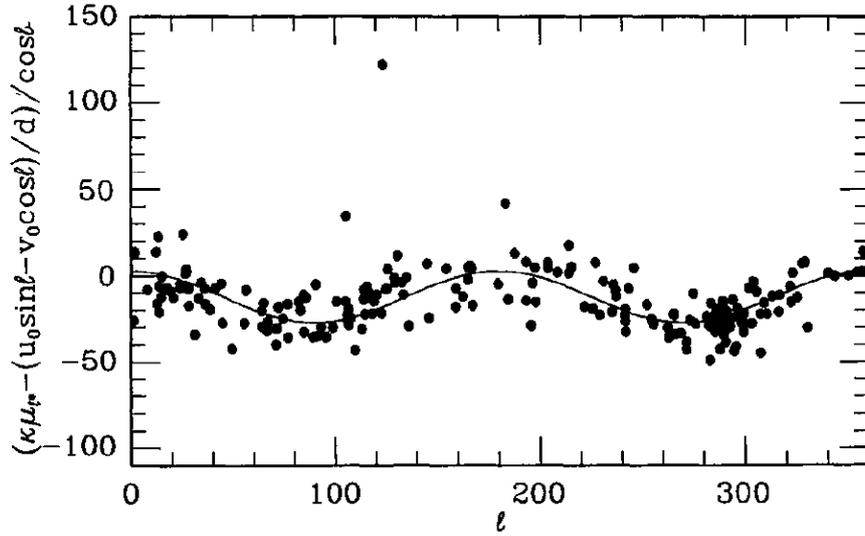


Рис. 8: Собственные движения цефеид из каталога Hipparcos по галактической долготе, скорректированное за локальное движение Солнца, в зависимости от галактической долготы. Кривая вписана с найденными значениями постоянных Оорта. Рисунок взят из работы Feast и Whitelock, 1997.

носителем Местного стандарта покоя — точки, движущейся по круговой орбите вокруг центра Галактики.

Иногда для простоты скорости  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$  называют компонентами пекулярной скорости Солнца. Хотя известно, что компонента скорости  $V_{\odot}$  подвержена влиянию такого эффекта, как асимметричный дрейф (эффект отставания центроидов), что выявляется при изучении движений звезд различного возраста. Кроме того, при анализе самых молодых звезд в скоростях  $U_{\odot}$  и  $V_{\odot}$  проявляется влияние галактической спиральной волны плотности. Искомые параметры  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$  и необходимое количество  $\Omega_0^{(n)}$  находим в результате решения системы условных уравнений вида (14)–(16) методом наименьших квадратов.

Важно отметить работу Feast и Whitelock, 1997, которые проанализировали кинематику 220 цефеид с данными из каталога Hipparcos (Esa, 1997). Эти авторы оценивали значения постоянных Оорта  $A$  и  $B$ , которые являются локальными параметрами и описывают характер кривой галактического вращения в малой околосолнечной окрестности. Можно сказать также, что они являются искомыми параметрами в нашей кинематической модели (14)–(16) с одной производной угловой скорости, т.е., при  $n = 1$ . Значения постоянных Оорта  $A$  и  $B$  можно найти из следующих выражений:

$$A = 0.5\Omega_0' R_0, \quad B = -\Omega_0 + A. \quad (17)$$

Из анализа расстояний и собственных движений цефеид Feast и Whitelock, 1997 подтвердили, что скорости цефеид отлично указывают на вращение Галактики (рис. 8). Эти авторы получили следующие оценки постоянных Оорта:  $A = 14.82 \pm 0.84$  км/с/кпк,  $B = -12.37 \pm 0.64$  км/с/кпк и  $|\Omega_0| = 27.19 \pm 0.87$  км/с/кпк (для принятого  $R_0 = 8.5 \pm 0.5$  кпк).

В работе Mroz и др., 2019 для 773 цефеид из каталога Skowton и др., 2019 были взяты лучевые скорости и собственные движения из каталога Gaia DR2 (Gaia Collaboration и Brown, 2018). По этим данным этими авторами была найдена (в качестве наилучшего решения) линейная скорость  $V_0 = 233.6 \pm 2.8$  км/с ее производная  $\partial V/\partial R = -1.34 \pm 0.21$  км/с/кпк для принятого  $R_0 = 8.122 \pm 0.031$  кпк (GRAVITY Collaboration и Abuter, 2018). Построена кривая вращения Галактики в интервале  $R : 4 - 20$  кпк, которая показана на рис. 9. На этом рисунке даны две кривые вращения Галактики, соответствующие линейной (сплошная линия) и универсальной (пунктирная линия) моделям соответственно. Универсальная кривые вращения построена согласно методу, предложенному в работе Persic, Salucci и Stel, 1996.

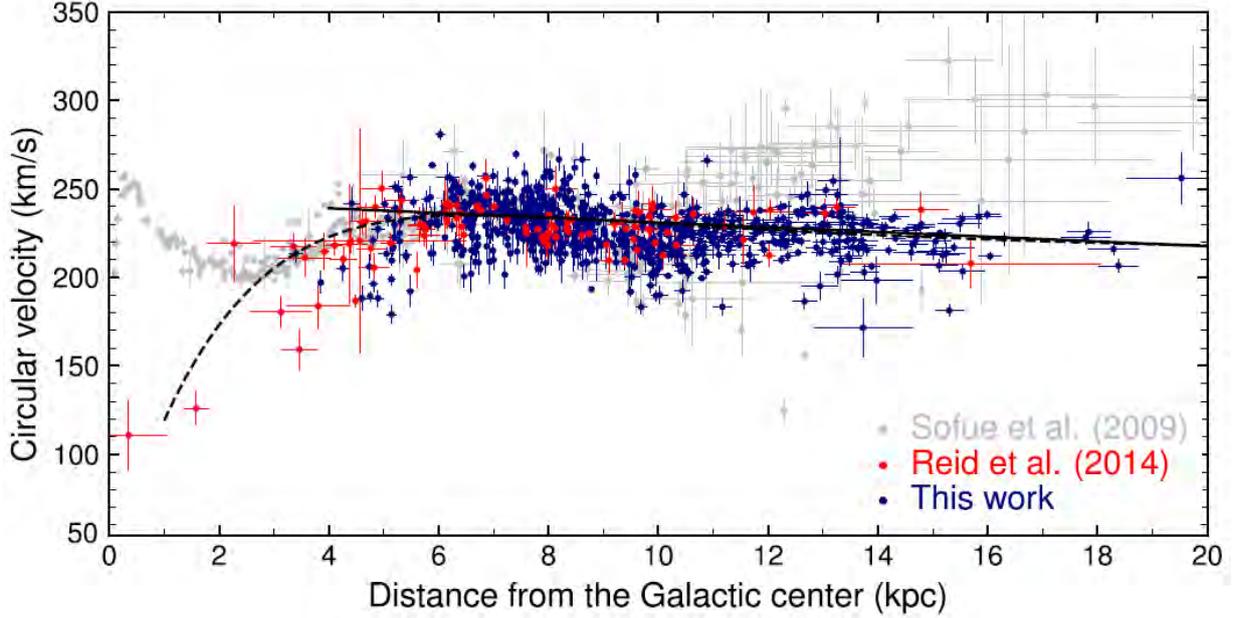


Рис. 9: Жирными синими кружками даны скорости вращения  $V_{circ}$  773 цефеид в зависимости от  $R$ , полученные в работе Mroz и др., 2019; даны также скорости мазеров из работы Reid, Menten, Brunthaler, Zheng, Dame, Xu, Y. Wu и др., 2014 и скорости звезд из работы Sofue, Honma и Omodaka, 2009. Рисунок взят из работы Mroz и др., 2019.

В работе Ablimit и др., 2020 данные о цефеидах из работ Skowron и др., 2019 и Mroz и др., 2019 были включены в общую выборку из 3500 классических цефеид. Для всех этих цефеид были собраны фотометрические данные в инфракрасном диапазоне и получены оценки расстояния с использованием соотношения период-Весенхейт согласно калибровкам Wang и др., 2018. Для кинематического анализа, правда, было отобрано 1078 цефеид с измеренными лучевыми скоростями. В итоге были уточнены параметры гравитационного потенциала Галактики и получена новая вириальная оценка массы Галактики,  $M_{vir} = (0.822 \pm 0.052) \times 10^{12} M_{\odot}$ , где значение вириального радиуса Галактики найдено равным  $R_{vir} = 191.84 \pm 4.12$  кпк. Значение линейной скорости вращения Галактики и ее производная оказались равными  $V_0 = 232.5 \pm 0.83$  км/с и  $\partial V/\partial R = -1.33 \pm 0.10$  км/с/кпк (для принятого  $R_0 = 8.122 \pm 0.031$  кпк).

В работе Bobylev и Vajkova, 2023 проведен кинематический анализ цефеид из каталога Skowron и др., 2019. При этом значения собственных движений цефеид нами были взяты из каталога Gaia EDR3 (Gaia Collaboration и Brown, 2021). В итоге были определены компоненты пекулярной скорости Солнца  $(U, V, W)_{\odot} = (9.39, 15.96, 6.88) \pm (0.40, 0.55, 0.30)$  км/с, а также следующие параметры угловой скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии  $R_0$ :

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= -27.87 \pm 0.09 \text{ км/с}, \\ \Omega'_0 &= 3.461 \pm 0.033 \text{ км/с}^2, \\ \Omega''_0 &= -0.651 \pm 0.024 \text{ км/с}^3, \\ \Omega'''_0 &= 0.105 \pm 0.011 \text{ км/с}^4, \\ \Omega_0^{IV} &= -0.009 \pm 0.002 \text{ км/с}^5,\end{aligned}\tag{18}$$

где значение линейной скорости вращения Галактики составляет  $V_0 = 225.7 \pm 2.9$  км/с для принятого значения  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк. При получении этого решения было использовано 1848 цефеид с расстояниями  $R$  из интервала 3–24 кпк. Совместно использовались компоненты собственного движения 1848 цефеид и меньшее количество лучевых скоростей. Кривую вращения с этими параметрами удобно применять в широком интервале  $R : 3 - 24$  кпк для выполнения различных задач. В частности, для получения остаточных скоростей звезд в этом интервале. При построении рисунков используем уже только 733 звезд, для которых одновременно имеется пол-

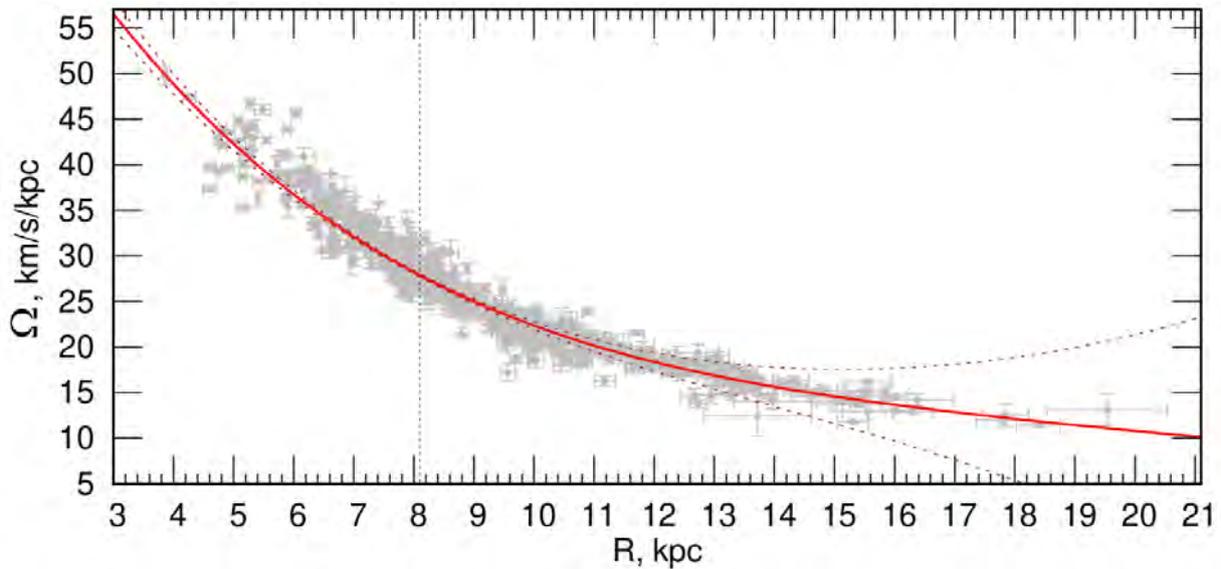


Рис. 10: Угловые скорости вращения  $\Omega$  цефеид в зависимости от расстояния  $R$ , вертикальной линией отмечено положение Солнца, жирной линией дана найденная кривая вращения Галактики, построенная нами с параметрами (18), отмечены границы доверительной области, соответствующие ошибкам  $2\sigma$ .

ная информация — расстояния, компоненты собственного движения и лучевые скорости (чтобы иметь возможность вычисления пространственных скоростей).

Отметим, что в решении (18) значения постоянных Оорта являются следующими:  $A = 14.03 \pm 0.13$  км/с/кпк и  $B = -13.83 \pm 0.16$  км/с/кпк ( $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк). Они найдены с существенно меньшими ошибками по сравнению со значениями, найденными в работе Feast и Whitelock, 1997. В целом, найденные значения постоянных Оорта показывают, что линейная скорость вращения Галактики уменьшается за пределами солнечного круга (при  $R > R_0$ ).

На рис. 10 дана кривая вращения Галактики, построенная с параметрами (18). На рис. 11 дана эта же кривая вращения Галактики для линейных скоростей вращения,  $V_{circ} = R\Omega$ . Для сравнения дана также кривая вращения Галактики из работы Eilers и др., 2019, где она была определена по большому количеству (около 25 000) красных гигантов, лежащих в интервале расстояний  $R : 5 - 25$  кпк.

Отметим, что оригинальными, найденными нами в результате решения системы условных уравнений вида (14)–(16), являются параметры угловой скорости вращения Галактики. Поэтому на рис. 10 достаточно логично поведение доверительной области — она расширяется в обе стороны от  $R_0$  (на рисунке эта область дана пошире, с ошибкам  $2\sigma$ ). На рис. 11 границы доверительной области вычисляются путем умножения угловых скоростей на соответствующие расстояния  $R$ , поэтому здесь доверительная область расширяется с возрастанием  $R$ .

Представляют также интерес параметры вращения Галактики, полученные по более близким цефеидам. По цефеидам из области с гелиоцентрическим радиусом  $r = 5$  кпк (эта выборка цефеид удовлетворяет условию полноты), круговая линейная скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики была найдена  $V_0 = 236 \pm 3$  км/с (для  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк) в хорошем согласии с оценками других авторов.

### 3.4 Скорости возмущения $f_R$ и $f_\theta$

Влияние спиральной волны плотности в радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных скоростях  $\Delta V_{circ}$  является периодическим с амплитудой около 10–15 км/с. Согласно линейной теории волн

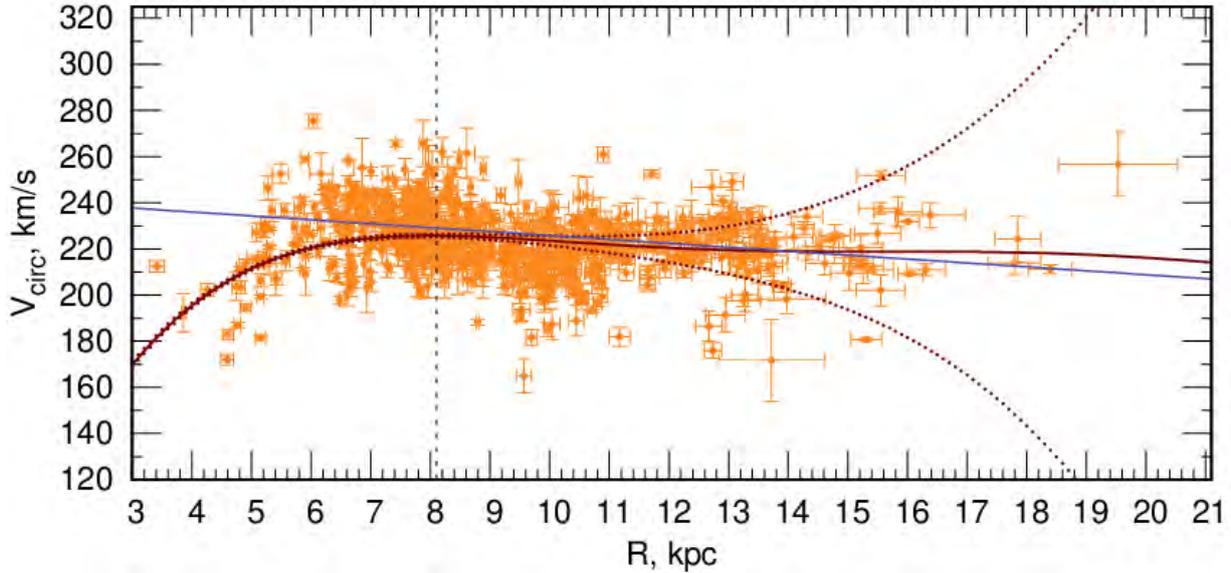


Рис. 11: Линейные скорости вращения  $V_{circ}$  цефеид в зависимости от расстояния  $R$ , вертикальной линией отмечено положение Солнца, жирной коричневой линией дана кривая вращения Галактики, построенная с параметрами (18), для нее отмечены границы доверительной области, соответствующие ошибкам  $1\sigma$ , голубой линией показана кривая вращения Галактики из работы Eilers и др., 2019.

плотности (Lin и Shu, 1964) скорости возмущений удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} V_R &= -f_R \cos \chi, \\ \Delta V_{circ} &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\chi = m[\cot(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot \quad (20)$$

фаза спиральной волны ( $m$  — количество спиральных рукавов,  $i$  — угол закрутки спирального узора ( $i < 0$  для закручивающейся спирали),  $\chi_\odot$  — радиальная фаза Солнца в спиральной волне);  $f_R$  и  $f_\theta$  — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей, которые считаются положительными. Длина волны  $\lambda$  (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$2\pi R_0/\lambda = m \cot(|i|). \quad (21)$$

Для изучения периодических отклонений звезд от кривой вращения Галактики в работе Vajkova и 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 и Vajkova, 2012 этот метод был использован при анализе выборки около 200 классических цефеид из каталога Hipparcos (Esa, 1997).

Пусть имеется ряд измеренных скоростей  $V_{R_n}$  (это могут быть как радиальные  $V_R$ , так и тангенциальные  $\Delta V_{circ}$ ) скорости,  $n = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число объектов. Задачей спектрального анализа является выделение периодичности из ряда данных в соответствии с принятой моделью, описывающей спиральную волну плотности с параметрами  $f$ ,  $\lambda$  (или  $i$ ) и  $\chi_\odot$ . В результате учета логарифмического характера спиральной волны, а также позиционных углов объектов  $\theta_n$ , наш спектральный (периодограммный) анализ рядов возмущений скоростей сводится к вычислению

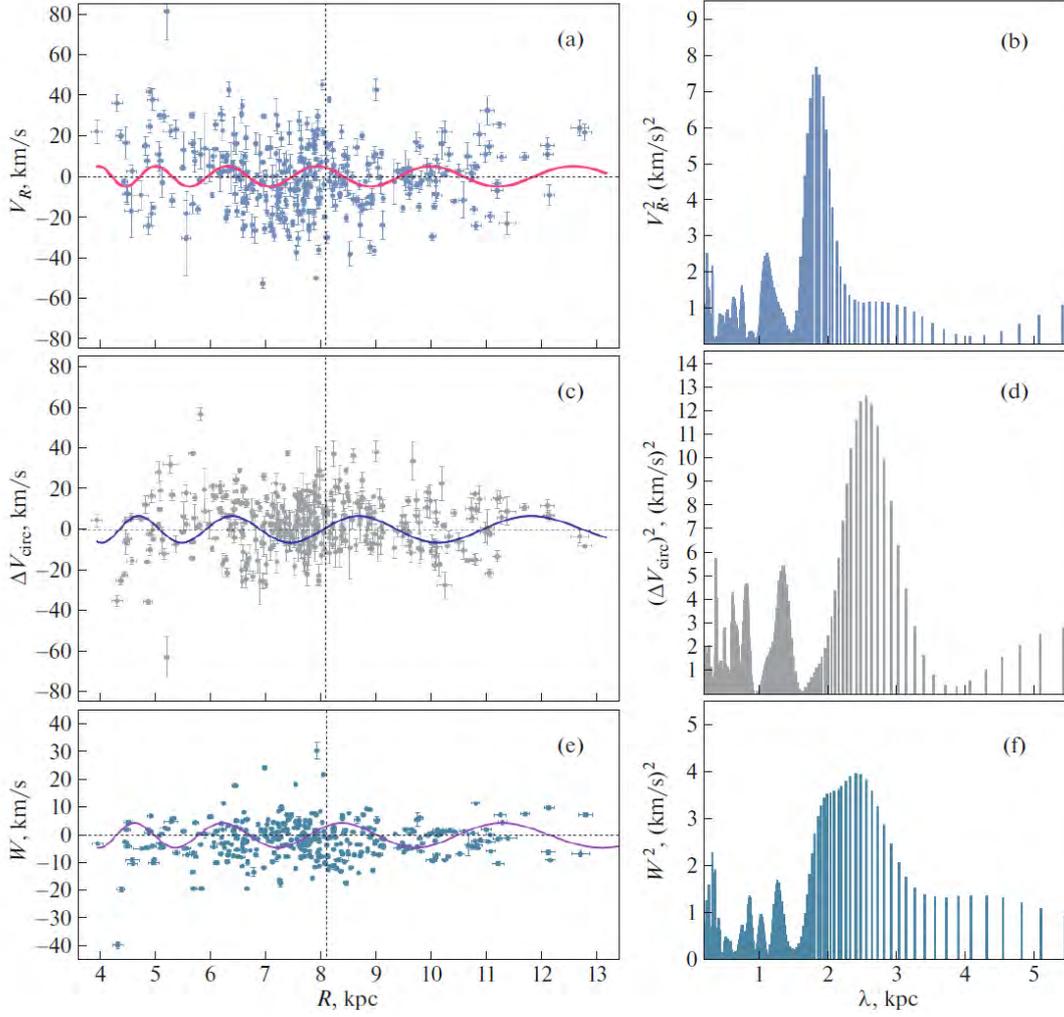


Рис. 12: Радиальные скорости  $V_R$  в зависимости от расстояния  $R$  анализируемой выборки цефеид (a), спектр мощности этой выборки (b), остаточные скорости вращения  $\Delta V_{circ}$  цефеид (c) и их спектр мощности (d), вертикальные скорости  $W$  цефеид (e) и их спектр мощности (d). Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2022b.

квадрата амплитуды (спектра мощности) стандартного преобразования Фурье:

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (22)$$

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

$$\begin{aligned} R'_n &= R_0 \ln(R_n/R_0), \\ V'_n(R'_n) &= V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n). \end{aligned} \quad (23)$$

В работе Bobylev, Vajkova и др., 2021 с использованием спектрального анализа радиальных и тангенциальных скоростей цефеид моложе 120 млн лет получены оценки скоростей возмущения  $f_R$  и  $f_\theta$ . Было найдено, что значение длины волны  $\lambda$  лежит в диапазоне 2.4–3.0 кпк, значение угла закрутки  $i$  заключено в диапазоне  $[-10^\circ, -13^\circ]$  для модели четырехрукавного спирального узора, амплитуда радиальных возмущений составляет  $f_R \sim 12$  км/с, а тангенциальные возмущения составляют  $f_\theta \sim 9$  км/с.

В работе Bobylev и Vajkova, 2022b был проведен кинематический анализ 363 молодых (моложе 120 млн лет) цефеид из работы Skowron и др., 2019. В результате было показано, что шкалу там же необходимо удлинить примерно на 10%.

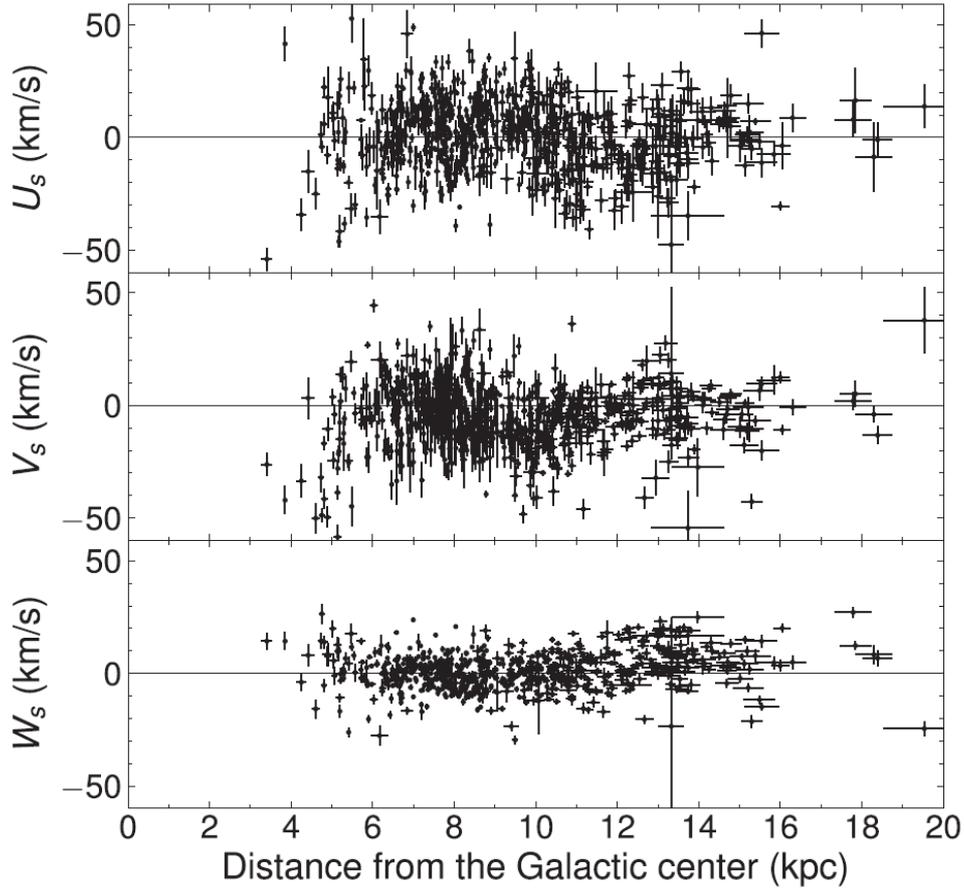


Рис. 13: Пекулярные (некруговые) скорости цефеид, найденные после вычитания вращения Галактики (линейная кривая вращения).  $U_s$  — составляющая скорости по направлению к центру Галактики,  $V_s$  — вдоль галактического вращения, а  $W_s$  — к северному галактическому полюсу. Рисунок взят из работы Mroz и др., 2019.

С использованием скорректированной шкалой расстояний были получены новые оценки групповой скорости Солнца и параметров вращения Галактики. Проведен также спектральный анализ скоростей  $V_R$ ,  $\Delta V_{circ}$  и  $W$  с целью оценки параметров галактической спиральной волны плотности.

При совместном решении кинематических уравнений вида (14)–(16) мы нашли:  $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (9.03, 11.58, 8.01) \pm (0.65, 0.81, 0.62)$  км/с, а также:  $\Omega_0 = 28.87 \pm 0.23$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -3.894 \pm 0.063$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.602 \pm 0.044$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где  $V_0 = 233.9 \pm 3.4$  км/с (для принятого значения  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк). Используемая выборка на 85% состояла из цефеид с фундаментальной модой пульсаций.

На основе отдельного спектрального анализа — радиальных  $V_R$ , остаточных тангенциальных  $\Delta V_{circ}$  и вертикальных скоростей  $W$  получены следующие оценки:  $f_R = 5.5 \pm 2.0$  км/с,  $f_{\theta} = 7.1 \pm 2.0$  км/с,  $f_W = 3.9 \pm 2.0$  км/с,  $\lambda_R = 1.9 \pm 0.5$  кпк ( $i_R = -8.3 \pm 2.5^\circ$  для  $m = 4$ ),  $\lambda_{\theta} = 2.6 \pm 0.5$  кпк ( $i_{\theta} = -11.4 \pm 2.8^\circ$  для  $m = 4$ ),  $\lambda_W = 2.4 \pm 0.5$  кпк ( $i_W = -10.7 \pm 2.7^\circ$  для  $m = 4$ ),  $(\chi_{\odot})_R = -208 \pm 16^\circ$ ,  $(\chi_{\odot})_{\theta} = -185 \pm 18^\circ$  и  $(\chi_{\odot})_W = -138 \pm 18^\circ$ . При этом анализе также расстояния до цефеид из работы Skowron и др., 2019 были умножены на коэффициент 1.1, согласно работе Vobylev и Vajkova, 2022b. На рис. 12 даны радиальные, остаточные скорости вращения и вертикальные скорости цефеид с соответствующими спектрами мощности.

Интересно сравнить рис. 12 с рис. 13, на котором даны некруговые скорости цефеид, полученные в работе Mroz и др., 2019 отличным от нашего методом. На всех трех панелях рис. 13 отчетливо видна волнообразная структура остаточных скоростей цефеид.

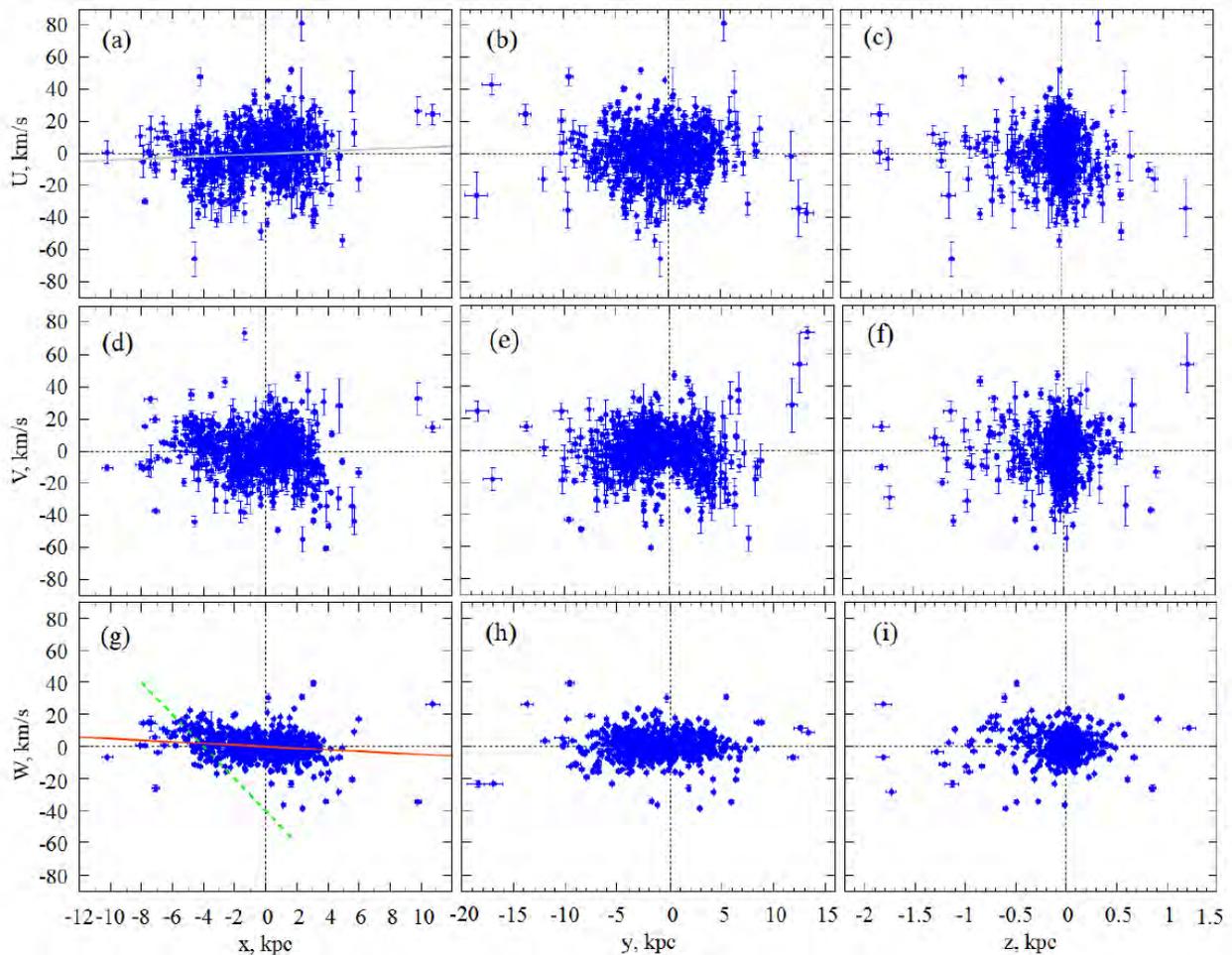


Рис. 14: Скорости цефеид  $U, V, W$  (исправленные за вращение Галактики с использованием найденных в решении (18) параметров) в зависимости от координат  $x, y, z$ . На панели (a) серая линия показывает зависимость  $U = M_{11} \cdot x$ , где  $M_{11} = \partial U / \partial x = 0.40 \pm 0.14$  км/с/кпк, красная линия на панели (g) показывает зависимость  $W = M_{31} \cdot x$ , где  $M_{31} = \partial W / \partial x = -0.49 \pm 0.08$  км/с/кпк. Рисунок взят из работы Bobylev и Vajkova, 2023.

### 3.5 Возмущения вертикальных скоростей цефеид

В работах Bobylev и Vajkova, 2023, 2021c применялась линейная модель Огородникова-Милна для анализа остаточных скоростей цефеид из каталога Skowron и др., 2019. Причем в работе Bobylev и Vajkova, 2021c собственные движения звезд были взяты из версии Gaia DR2 (Gaia Collab. 2018), а в работе Bobylev и Vajkova, 2023 более точные значения собственных движений цефеид были взяты уже из версии каталога Gaia EDR3.

Цефеиды показали наличие отличных от нуля градиентов  $\partial U / \partial x$ ,  $\partial U / \partial z$ ,  $\partial V / \partial x$ ,  $\partial V / \partial z$  и  $\partial W / \partial x$ . Эти градиенты ведут себя по-разному в зависимости от радиуса выборки  $r$ , а также ограничений на радиус  $R$ . На рис. 14 даны девять зависимостей скоростей  $U, V, W$  от соответствующих координат  $x, y, z$ .

Наиболее интересным является градиент  $\partial W / \partial x$ , поскольку вертикальные скорости  $W$  свободны от галактического вращения. Его значение составляет  $\sim -0.5 \pm 0.1$  км/с/кпк, что можно интерпретировать как положительное вращение этой звездной системы вокруг галактической оси  $y$ , т.е. вращение с угловой скоростью  $\Omega_y$ . Была также получена более точная оценка  $\Omega_y = 0.51 \pm 0.07$  км/с/кпк на основе модели твердотельного вращения.

Интересно отметить работу Poggio и др., 2020, в которой по данным об около 12 миллионов гигантов из каталога Gaia DR2 была получена оценка скорости прецессии варпа  $10.86 \pm 0.03$

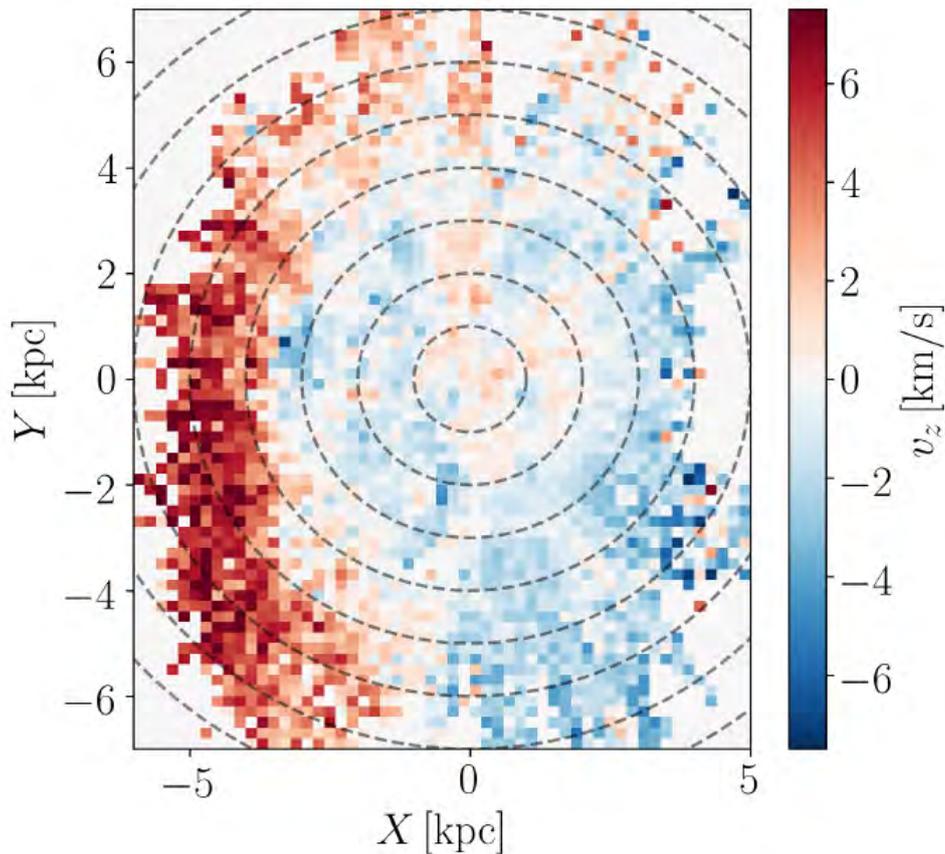


Рис. 15: Распределение усредненных вертикальных скоростей горячих звезд  $v_z$  на галактической плоскости. Плоскость  $XY$  разделена на ячейки шириной 200 пк, причем показаны только те ячейки, которые содержат более десяти звезд. Пунктирные круги вокруг Солнца имеют радиусы от 1 до 9 кпк с шагом в 1 кпк. Галактический варп виден при  $R > 4$  кпк в направлении галактического антицентра. Центр Галактики справа. Рисунок взят из работы Zagi и др., 2021.

(стат.) $\pm 3.20$  (сист.) км/с/кпк. Причем такое большое значение было найдено по далеким звездам, расположенным при  $R$  далее 10–12 кпк. На панели (g) рис. 14 зеленой пунктирной линией показана линейная зависимость  $W = -10x - 40$ , где коэффициент при  $x$ , равный 10 км/с/кпк, мы взяли близким к определению Roggio и др., 2020. Этим хотим показать, что если бы мы пытались определить значение градиента  $\partial W/\partial x$  по цефеидам, расположенным при  $x \leq -4$  кпк, то могли бы получить огромное его значение.

Отличной иллюстрацией эффекта наблюдаемого искривления галактического диска является рис. 15, взятый из работы Zagi и др., 2021. На этом рисунке представлена карта распределения вертикальных скоростей, построенная по молодым горячим массивным звездам высокой светимости из каталога Gaia EDR3.

В итоге мы заключили, что найденное вращение вокруг оси  $y$  отражает косвенное влияние какого-то крупномасштабного процесса, который возмущает вертикальные скорости цефеид. Известны различные процессы, приводящие к крупномасштабным возмущениям вертикальных скоростей звезд. Например, взаимодействие с карликовыми галактиками-спутниками или шаровыми скоплениями, падение массивного тела на галактический диск, собственные колебания диска и другие процессы (например, Wang и др., 2018; Laporte и др., 2018).

Показано, что на рассматриваемых масштабах ( $r > 12$  кпк) вращение вокруг галактической оси  $x$  не отличается значимо от нуля. Установлено также отсутствие объемного расширения/сжатия системы цефеид.

## Заключение

Выделим наиболее важные результаты, полученные нами из анализа различных выборок классических цефеид.

1) Изучено пространственное распределение цефеид в Галактике с использованием большой выборки звезд из работы Skowron и др., 2019. Проанализировано распределение цефеид как вблизи экваториальной плоскости Галактики, так и в вертикальном направлении. Использовался экспоненциальный закон распределения звездной плотности. По цефеидам моложе 120 млн лет в области  $r < 6$  кпк, где выборка полна, в хорошем согласии с результатами анализа других авторов, найдено значение возвышения Солнца над плоскостью Галактики  $17 \pm 4$  пк и значение вертикальной шкалы диска  $h_z = 75 \pm 5$  пк. По цефеидам моложе 120 млн лет было также найдено значение радиальной шкалы диска  $h_R = 2.30 \pm 0.09$  кпк, а по цефеидам старше 120 млн лет значение этой величины составило  $h_R = 1.96 \pm 0.12$  кпк.

2) Уточнены параметры спирального узора Галактики с использованием цефеид различного возраста из работы там же. Причем рассматривались как оригинальные расстояния до цефеид, так и удлиненные на 10%. В рамках модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, мы заключили, что значение этого угла близко к  $-12.5^\circ$ . Кроме того, была получена новая оценка угловой скорости вращения спирального узора  $\Omega_p = 27 \pm 1$  км/с/кпк.

3) По выборке цефеид из работы там же уточнены важные кинематические параметры. В частности, по выборке цефеид из области с гелиоцентрическим радиусом  $r = 5$  кпк, где выборка удовлетворяет условию полноты, значение круговой линейной скорости вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики найдена равной  $V_0 = 236 \pm 3$  км/с для принятого  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк. Это значение находится в хорошем согласии с оценками других авторов.

Как показано различными авторами, которые анализировали большие выборки цефеид (до 3500 звезд) с современными оценками расстояний до них, кривая вращения Галактики близка к линейной на интервале  $R : 5-20$  кпк. Отклонения от этой кривой имеют волнообразный характер, что отражает влияние галактической спиральной волны плотности.

4) На основе спектрального анализа радиальных, тангенциальных и вертикальных скоростей цефеид моложе 120 млн лет получены новые оценки скоростей возмущения, которые вызваны влиянием галактической спиральной волны плотности. Показано, что значение длины волны  $\lambda$  лежит в диапазоне 2.4–3.0 кпк, значение угла закрутки  $i$  заключено в диапазоне  $[-10^\circ, -13^\circ]$  для модели четырехрукавного спирального узора, амплитуда радиальных возмущений составляет  $f_R : 6 - 12$  км/с, а тангенциальные возмущения составляют  $f_\theta : 4 - 9$  км/с, имеются также малоамплитудные периодические возмущения вертикальных скоростей.

5) В остаточных скоростях цефеид из широкого интервала расстояний  $R$  обнаружен градиент  $\partial W/\partial x \sim -0.5 \pm 0.1$  км/с (положительное вращение вокруг оси  $y$ ), который мы связываем с влиянием различных эффектов, приводящих к крупномасштабному возмущению вертикальных скоростей звезд галактического диска. В частности, это может быть косвенное кинематическое воздействие галактического варпа.

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

## Список литературы

- Leavitt, H. S. (1908). *1777 variables in the Magellanic Clouds*. Annals of Harvard College Observatory 60, с. 87–108.3.
- Leavitt, H. S. и E. C. Pickering (1912). *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*. Harvard College Observatory Circular 173, с. 1–3.
- Hubble, E. (1929). *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*. Proceedings of the National Academy of Science 15.3, с. 168–173.
- Mishurov, Y. N., I. A. Zenina, A. K. Dambis, A. M. Mel'Nik и A. S. Rastorguev (1997). *Is the Sun located near the corotation circle?* A&A 323, с. 775–780.
- Bobylev, V. V. (2013). *Cepheid kinematics and the Galactic warp*. Astronomy Letters 39.12, с. 819–825.
- Groenewegen, M. A. T. (2018). *The Cepheid period-luminosity-metallicity relation based on Gaia DR2 data*. A&A 619, A8.
- Skowron, D. M., J. Skowron, P. Mroz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszynski, M. K. Szymanski, R. Poleski, S. Kozłowski, K. Ulaczyk, K. Rybicki и P. Iwanek (2019). *A three-dimensional map of the Milky Way using classical Cepheid variable stars*. Science 365.6452, с. 478–482.
- Mroz, P., A. Udalski, D. M. Skowron, J. Skowron, I. Soszynski, P. Pietrukowicz, M. K. Szymanski, R. Poleski, S. Kozłowski и K. Ulaczyk (2019). *Rotation Curve of the Milky Way from Classical Cepheids*. ApJ 870.1, с. L10.
- Lazovik, Y. A. и A. S. Rastorguev (2020). *Calibrating the Galactic Cepheid Period-Luminosity Relation from the Maximum-likelihood Technique*. AJ 160.3, с. 136.
- Ablimit, I., G. Zhao, C. Flynn и S. A. Bird (2020). *The Rotation Curve, Mass Distribution, and Dark Matter Content of the Milky Way from Classical Cepheids*. ApJ 895.1, с. L12.
- Nikiforov, O., G. Levkin и R. Simak (2023). *Digital transformation of logistics processes in the transport system - basic trend of the modern world economy*. B: E3S Web of Conferences. T. 381. E3S Web of Conferences, с. 02007.
- Feast, M. и P. Whitelock (1997). *Galactic kinematics of Cepheids from HIPPARCOS proper motions*. MNRAS 291.4, с. 683–693.
- Mel'Nik, A. M., A. K. Dambis и A. S. Rastorguev (1999). *Periodic pattern in the Cepheid space velocity field and the spiral arms of our Galaxy*. Astronomy Letters 25.8, с. 518–525.
- Caputo, F., M. Marconi и I. Musella (2000). *Theoretical models for classical Cepheids. V. Multiwavelength relations*. A&A 354, с. 610–620.
- Berdnikov, L. N., A. K. Dambis и O. V. Vozyakova (2000). *Galactic Cepheids. Catalogue of light-curve parameters and distances*. A&AS 143, с. 211–213.
- Rastorguev, A. S. и A. K. Dambis (2011). *Classical Cepheids: a New version of the Baade-Becker-Wesselink method*. Astrophysical Bulletin 66.1, с. 47–53.
- Zabolotskikh, M. V., A. S. Rastorguev и A. K. Dambis (2002). *Kinematic Parameters of Young Subsystems and the Galactic Rotation Curve*. Astronomy Letters 28.7, с. 454–464.
- Efremov, Y. N. (2003). *Cepheids in LMC Clusters and the Period-Age Relation*. Astronomy Reports 47.12, с. 1000–1012.
- Pietrukowicz, P., I. Soszynski и A. Udalski (2021). *Classical Cepheids in the Milky Way*. Acta Astron. 71.3, с. 205–222.
- Riess, A. G., L. M. Macri, S. L. Hoffmann, D. Scolnic, S. Casertano, A. V. Filippenko, B. E. Tucker, M. J. Reid, D. O. Jones, J. M. Silverman, R. Chornock, P. Challis, W. Yuan, P. J. Brown и R. J. Foley (2016). *A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant*. ApJ 826.1, с. 56.
- Riess, A. G., S. Casertano, W. Yuan, J. B. Bowers, L. Macri, J. C. Zinn и D. Scolnic (2021). *Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 Parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids Confirm Tension with  $\Lambda$ CDM*. ApJ 908.1, с. L6.
- Planck Collaboration и N. Aghanim (2020). *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*. A&A 641, A6.

- López-Corredoira, M. (2022). *Hubble tensions: a historical statistical analysis*. MNRAS 517.4, с. 5805—5809.
- Engle, S. G., E. F. Guinan, G. M. Harper, M. Cuntz, N. Ramage Evans, H. R. Neilson и D. E. Fawzy (2017). *The Secret Lives of Cepheids:  $\delta$  Cep—The Prototype of a New Class of Pulsating X-Ray Variable Stars*. ApJ 838.1, с. 67.
- Engle, S. (2015). *The Secret Lives of Cepheids: A Multi-Wavelength Study of the Atmospheres and Real-Time Evolution of Classical Cepheids*. Дис. ... док. James Cook University, Australia.
- Kiss, L. L. (1998). *A photometric and spectroscopic study of the brightest northern Cepheids - I. Observations*. MNRAS 297.3, с. 825—838.
- Mérand, A., P. Kervella, J. Breitfelder, A. Gallenne, V. Coudé du Foresto, T. A. ten Brummelaar, H. A. McAlister, S. Ridgway, L. Sturmann, J. Sturmann и N. H. Turner (2015). *Cepheid distances from the SpectroPhoto-Interferometry of Pulsating Stars (SPIPS). Application to the prototypes  $\delta$  Cephei and  $\eta$  Aquilae*. A&A 584, A80.
- Fouqué, P., P. Arriagada, J. Storm, T. G. Barnes, N. Nardetto, A. Mérand, P. Kervella, W. Gieren, D. Bersier, G. F. Benedict и B. E. McArthur (2007). *A new calibration of Galactic Cepheid period-luminosity relations from B to K bands, and a comparison to LMC relations*. A&A 476.1, с. 73—81.
- Berdnikov, L. N. (1987). *The Galactic Distribution of Cepheids*. Soviet Astronomy Letters 13, с. 45.
- Sandage, A. и G. A. Tammann (2006). *Absolute Magnitude Calibrations of Population I and II Cepheids and Other Pulsating Variables in the Instability Strip of the Hertzsprung-Russell Diagram*. ARA&A 44.1, с. 93—140.
- Wang, S., X. Chen, R. de Grijs и L. Deng (2018). *The Near-infrared Optimal Distances Method Applied to Galactic Classical Cepheids Tightly Constrains Mid-infrared Period-Luminosity Relations*. ApJ 852.2, с. 78.
- Esa, I. (1997). *VizieR Online Data Catalog: The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997)*. VizieR Online Data Catalog, с. I/239.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2016). *Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties*. A&A 595, A2.
- Benedict, G. F., B. E. McArthur, M. W. Feast, T. G. Barnes, T. E. Harrison, R. J. Patterson, J. W. Menzies, J. L. Bean и W. L. Freedman (2007). *Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor Parallaxes of Galactic Cepheid Variable Stars: Period-Luminosity Relations*. AJ 133.4, с. 1810—1827.
- Udalski, A., M. K. Szymanski и G. Szymanski (2015). *OGLE-IV: Fourth Phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment*. Acta Astron. 65.1, с. 1—38.
- Madore, B. F. (1982). *The period-luminosity relation. IV. Intrinsic relations and reddenings for the Large Magellanic Cloud Cepheids*. ApJ 253, с. 575—579.
- Wielgórski, P., G. Pietrzyński, B. Pilecki, W. Gieren, B. Zgirski, M. Górski, G. Hajdu, W. Narloch, P. Karczmarek, R. Smolec, P. Kervella, J. Storm, A. Gallenne, L. Breuval, M. Lewis, M. Kałużyski, D. Graczyk, W. Pych, K. Suchomska, M. Taormina, G. Rojas Garcia, A. Kotek, R. Chini, F. Pozo Núñez, S. Noroozi, C. Sobrino Figaredo, M. Haas, K. Hodapp, P. Mikołajczyk, K. Kotysz, D. Moździerski и P. Kołaczek-Szymański (2022). *An Absolute Calibration of the Near-infrared Period-Luminosity Relations of Type II Cepheids in the Milky Way and in the Large Magellanic Cloud*. ApJ 927.1, с. 89.
- lin, Z., Y. Xu, C. Hao, D. Liu, Y. Li и S. Bian (2022). *Calibrating the Cepheid Period-Wesenheit Relation in the Gaia Bands Using Galactic Open-cluster Cepheids*. ApJ 938.1, с. 33.
- Ripepi, V., R. Molinaro, I. Musella, M. Marconi, S. Leccia и L. Eyser (2019). *Reclassification of Cepheids in the Gaia Data Release 2. Period-luminosity and period-Wesenheit relations in the Gaia passbands*. A&A 625, A14.
- Ripepi, V., G. Catanzaro, G. Clementini, G. De Somma, R. Drimmel, S. Leccia, M. Marconi, R. Molinaro, I. Musella и E. Poggio (2022). *Classical Cepheid period-Wesenheit-metallicity relation in the Gaia bands*. A&A 659, A167.

- Baade, W. (1926). *Über eine Möglichkeit, die Pulsationstheorie der  $\delta$  Cephei-Veränderlichen zu prüfen*. *Astronomische Nachrichten* 228.20, с. 359.
- Becker, W. (1940). *Spektralphotometrische Untersuchungen an  $\delta$  Cephei-Sternen. X. Ein Beitrag zur Prüfung der Pulsationstheorie der  $\delta$  Cephei-Veränderlichen durch die Beobachtung und eine unabhängige Ableitung der Perioden-Helligkeitsbeziehung. (Mitteilungen des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam, Nr. 4. ) Mit 5 Abbildungen*. *ZAp* 19, с. 289.
- Wesselink, A. J. (1946). *The observations of brightness, colour and radial velocity of  $\delta$  Cephei and the pulsation hypothesis (Errata: 10 258, 310)*. *Bull. Astron. Inst. Netherlands* 10, с. 91.
- Bono, G., M. Marconi, S. Cassisi, F. Caputo, W. Gieren и G. Pietrzynski (2005). *Classical Cepheid Pulsation Models. X. The Period-Age Relation*. *ApJ* 621.2, с. 966—977.
- Anderson, R. I., H. Saio, S. Ekstrom, C. Georgy и G. Meynet (2016). *On the effect of rotation on populations of classical Cepheids. II. Pulsation analysis for metallicities 0.014, 0.006, and 0.002*. *A&A* 591, A8.
- Samus', N. N., E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva и E. N. Pastukhova (2017). *General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1*. *Astronomy Reports* 61.1, с. 80—88.
- Chen, X., S. Wang, L. Deng, R. de Grijs и M. Yang (2018). *Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) Catalog of Periodic Variable Stars*. *ApJS* 237.2, с. 28.
- Kochanek, C. S., B. J. Shappee, K. Z. Stanek, T. W. -. Holoiien, T. A. Thompson, J. L. Prieto, S. Dong, J. V. Shields, D. Will, C. Britt, D. Perzanowski и G. Pojmanski (2017). *The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) Light Curve Server v1.0*. *PASP* 129.980, с. 104502.
- Tonry, J. L., L. Denneau, A. N. Heinze, B. Stalder, K. W. Smith, S. J. Smartt, C. W. Stubbs, H. J. Weiland и A. Rest (2018). *ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System*. *PASP* 130.988, с. 064505.
- Hoffman, D. I., T. E. Harrison и B. J. McNamara (2009). *Automated Variable Star Classification Using the Northern Sky Variability Survey*. *AJ* 138.2, с. 466—477.
- Dekany, I., G. Hajdu, E. K. Grebel и M. Catelan (2019). *Into the Darkness: Classical and Type II Cepheids in the Zona Galactica Incognita*. *ApJ* 883.1, с. 58.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2018). *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*. *A&A* 616, A1.
- Chen, X., S. Wang, L. Deng, R. de Grijs, M. Yang и H. Tian (2020). *The Zwicky Transient Facility Catalog of Periodic Variable Stars*. *ApJS* 249.1, с. 18.
- Woźniak, P. R., W. T. Vestrand, C. W. Akerlof, R. Balsano, J. Bloch, D. Casperson, S. Fletcher, G. Gisler, R. Kehoe, K. Kinemuchi, B. C. Lee, S. Marshall, K. E. McGowan, T. A. McKay, E. S. Rykoff, D. A. Smith, J. Szymanski и J. Wren (2004). *Northern Sky Variability Survey: Public Data Release*. *AJ* 127.4, с. 2436—2449.
- Minniti, D., P. W. Lucas, J. P. Emerson, R. K. Saito, M. Hempel, P. Pietrukowicz, A. V. Ahumada, M. V. Alonso, J. Alonso-Garcia, J. I. Arias, R. M. Bandyopadhyay, R. H. Barba, B. Barbuy, L. R. Bedin, E. Bica, J. Borissova, L. Bronfman, G. Carraro, M. Catelan, J. J. Claria, N. Cross, R. de Grijs, I. Dekany, J. E. Drew, C. Farina, C. Feinstein, E. Fernandez Lajus, R. C. Gamen, D. Geisler, W. Gieren, B. Goldman, O. A. Gonzalez, G. Gunthardt, S. Gurovich, N. C. Hambly, M. J. Irwin, V. D. Ivanov, A. Jordan, E. Kerins, K. Kinemuchi, R. Kurtev, M. Lopez-Corredoira, T. Maccarone, N. Masetti, D. Merlo, M. Messineo, I. F. Mirabel, L. Monaco, L. Morelli, N. Padilla, T. Palma, M. C. Parisi, G. Pignata, M. Rejkuba, A. Roman-Lopes, S. E. Sale, M. R. Schreiber, A. C. Schroer, Smith, M. Soto, M. Tamura, C. Tappert, M. A. Thompson, I. Toledo, M. Zoccali и G. Pietrzynski (2010). *VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way*. *New A* 15.5, с. 433—443.
- Wright, E. L., P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, R. M. Cutri, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, D. Padgett, R. S. McMillan, M. Skrutskie, S. A. Stanford, M. Cohen, R. G. Walker, J. C. Mather, D. Leisawitz, I. Gautier Thomas N., I. McLean, D. Benford, C. J. Lonsdale, A. Blain, B. Mendez, W. R. Irace, V. Duval, F. Liu, D. Royer, I. Heinrichsen, J. Howard, M. Shannon, M. Kendall, A. L. Walsh, M. Larsen, J. G. Cardon, S. Schick, M. Schwalm, M. Abid, B. Fabinsky, L.

- Naes и С.-W. Tsai (2010). *The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance*. AJ 140.6, с. 1868—1881.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova, A. S. Rastorguev и M. V. Zabolotskikh (2021). *Analysis of galaxy kinematics based on Cepheids from the Gaia DR2 Catalogue*. MNRAS 502.3, с. 4377—4391.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2021a). *A New Estimate of the Best Value for the Solar Galactocentric Distance*. Astronomy Reports 65.6, с. 498—506.
- (2022a). *Redetermination of the Parameters of the Galactic Spiral Pattern from Classical Cepheids*. Astronomy Letters 48.10, с. 568—577.
- (2014). *The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters*. MNRAS 437.2, с. 1549—1553.
- Bobylev, V. V. (2022). *Estimation of the Parameters of the Spiral Pattern in the Galaxy Based on a Sample of Classical Cepheids*. Astronomy Letters 48.2, с. 126—137.
- Nikiforov, I. I. и A. V. Veselova (2018). *Geometric Aspects and Testing of the Galactic Center Distance Determination from Spiral Arm Segments*. Astronomy Letters 44.2, с. 81—102.
- Veselova, A. V. и I. Nikiforov (2020). *Segments of spiral arms of the Galaxy traced by classical Cepheids: effects of age heterogeneity*. Research in Astronomy and Astrophysics 20.12, с. 209.
- Griv, E., I.-G. Jiang и L.-G. Hou (2017). *The Spiral Arm Segments of the Galaxy within 3 kpc from the Sun: A Statistical Approach*. ApJ 844.2, с. 118.
- Reid, M. J., K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, Y. Wu, K. Immer, B. Zhang, A. Sanna, L. Moscadelli, K. L. J. Rygl, A. Bartkiewicz, B. Hu, L. H. Quiroga-Nuñez и H. J. van Langevelde (2019). *Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way*. ApJ 885.2, с. 131.
- Hao, C. J., Y. Xu, L. G. Hou, S. B. Bian, J. J. Li, Z. Y. Wu, Z. H. He, Y. J. Li и D. J. Liu (2021). *Evolution of the local spiral structure of the Milky Way revealed by open clusters*. A&A 652, A102.
- Hou, L. G. и J. L. Han (2014). *The observed spiral structure of the Milky Way*. A&A 569, A125.
- Vallée, J. P. (2017). *Constraining the pitch angle of the galactic spiral arms in the Milky Way*. New A Rev. 79, с. 49—58.
- Xu, Y., L.-G. Hou и Y.-W. Wu (2018). *The spiral structure of the Milky Way*. Research in Astronomy and Astrophysics 18.12, с. 146.
- Hou, L. G. (2021). *The spiral structure in the Solar neighbourhood*. Frontiers in Astronomy and Space Sciences 8, с. 103.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2021b). *Estimation of the Radial Scale Length and Vertical Scale Height of the Galactic Thin Disk from Cepheids*. Astronomy Letters 47.8, с. 534—543.
- Nikiforov, I., V. A. Usik и A. V. Veselova (2023). *Modeling the Vertical Distribution of the Milky Way's Flat Subsystem Objects*. Research in Astronomy and Astrophysics 23.1, с. 015021.
- Mel'nik, A. M., P. Rautiainen, L. N. Berdnikov, A. K. Dambis и A. S. Rastorguev (2015). *Classical Cepheids in the Galactic outer ring R<sub>1R\_2</sub>'*. Astronomische Nachrichten 336.1, с. 70.
- GRAVITY Collaboration и R. Abuter (2018). *Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*. A&A 615, с. L15.
- Persic, M., P. Salucci и F. Stel (1996). *The universal rotation curve of spiral galaxies — I. The dark matter connection*. MNRAS 281.1, с. 27—47.
- Reid, M. J., K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, Y. Wu, B. Zhang, A. Sanna, M. Sato, K. Hachisuka, Y. K. Choi, K. Immer, L. Moscadelli, K. L. J. Rygl и A. Bartkiewicz (2014). *Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way*. ApJ 783.2, с. 130.
- Sofue, Y., M. Honma и T. Omodaka (2009). *Unified Rotation Curve of the Galaxy – Decomposition into de Vaucouleurs Bulge, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip –*. PASJ 61, с. 227.
- Eilers, A.-C., D. W. Hogg, H.-W. Rix и M. K. Ness (2019). *The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc*. ApJ 871.1, с. 120.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2023). *3D Kinematics of Classical Cepheids According to Gaia EDR3 Catalog*. Research in Astronomy and Astrophysics 23.4, с. 045001.

- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2021). *Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties*. A&A 649, A1.
- Lin, C. C. и F. H. Shu (1964). *On the Spiral Structure of Disk Galaxies*. ApJ 140, с. 646.
- Bajkova, A. T. и V. V. Bobylev (2012). *Redetermination of galactic spiral density wave parameters based on spectral analysis of masers radial velocities*. Astronomy Letters 38.9, с. 549–561.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2012). *Estimation of the galactic spiral pattern speed from Cepheids*. Astronomy Letters 38.10, с. 638–648.
- (2022b). *Analysis of the Distance Scales by Cepheids from the Gaia EDR3 Catalogue Data*. Astronomy Reports 66.7, с. 545–554.
- (2021c). *Three-Dimensional Kinematics of Classical Cepheids*. Astronomy Letters 47.9, с. 607–617.
- Poggio, E., R. Drimmel, R. Andrae, C. A. L. Bailer-Jones, M. Fouesneau, M. G. Lattanzi, R. L. Smart и A. Spagna (2020). *Evidence of a dynamically evolving Galactic warp*. Nature Astronomy 4, с. 590–596.
- Zari, E., H. -. Rix, N. Frankel, M. Xiang, E. Poggio, R. Drimmel и A. Tkachenko (2021). *Mapping luminous hot stars in the Galaxy*. A&A 650, A112.
- Laporte, C. F. P., K. V. Johnston, F. A. Gomez, N. Garavito-Camargo и G. Besla (2018). *The influence of Sagittarius and the Large Magellanic Cloud on the stellar disc of the Milky Way Galaxy*. MNRAS 481.1, с. 286–306.

Study of the structure and kinematics of the Galaxy  
based on data on classical Cepheids

V.V. Bobylev, A.T. Bajkova

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

Classical Cepheids are important for studying the properties of the galactic disk, the spiral structure of the Galaxy, its rotation, evolution, etc. 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 classical Cepheids. The main attention is paid to the results of studying the Galaxy obtained by the authors of this work. The following issues are considered: a) the nature of the spatial distribution of Cepheids in the Galaxy, both near the equatorial plane of the Galaxy and in the vertical direction; in particular, the relationship of Cepheids with the large-scale Warp of the galactic disk is considered; b) the use of young Cepheids to refine the parameters of the spiral pattern of the Galaxy; c) the use of young Cepheids to refine the rotation parameters Galaxies and perturbation velocities caused by the influence of the galactic spiral density wave.