

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОГО УЗОРА В ГАЛАКТИКЕ ПО ВЫБОРКЕ КЛАССИЧЕСКИХ ЦЕФЕИД

© 2022 г. В. В. Бобылев^{1*}

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

Поступила в редакцию 24.10.2021 г.

После доработки 24.11.2021 г.; принята к публикации 03.12.2021 г.

Рассмотрена выборка классических цефеид Галактики с высокоточными оценками расстояний до них, взятыми из работы Сковрон и др., где они были определены на основе соотношения период–светимость. Уточнены геометрические характеристики двух отрезков спиральных рукавов — Киля–Стрельца и Внешнего. Для этого были отобраны 269 цефеид, принадлежащих рукаву Киля–Стрельца, с возрастными в интервале 80–120 млн лет. По ним получены оценка угла закрутки спирального узора $i = -11.9 \pm 0.2^\circ$ и положение этого рукава $a_0 = 7.32 \pm 0.05$ кпк для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. Во Внешнем рукаве отобраны 343 цефеиды, имеющие возрасты в интервале 120–300 млн лет. По ним найдены $i = -11.5 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 12.89 \pm 0.06$ кпк. Придерживаясь модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, можем заключить, что значение этого угла близко к -12° .

Ключевые слова: классические цефеиды, спиральный узор, структура Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010822010016

ВВЕДЕНИЕ

Изучению спиральной структуры Галактики с использованием различных объектов и методов посвящено огромное количество публикаций (см., например, Линь, Шу, 1964; Линь и др., 1969; Жоржелин, Жоржелин, 1976; Тэйлор, Кордес, 1993; Руссейль, 2003; Паладини и др., 2004; Попова, Локтин, 2005; Диас, Лепинэ, 2005; Ливайн и др., 2006; Моитиньо и др., 2006; Васкес и др., 2008; Герхард, 2011; Ефремов, 2011; Бобылев, Байкова, 2014а; Хоу, Хан, 2014; 2015; Дамбис и др., 2015; Рид и др., 2019; Сюй и др., 2018а; 2021; Поджио и др., 2021; Хао и др., 2021). В качестве индикаторов спиральной структуры используются различные звезды, звездные скопления и ОВ-ассоциации, водородные облака, облака межзвездной пыли, области звездообразования, источники мазерного излучения и др. Применяются методы, основанные как на анализе пространственного распределения звезд — с использованием измеренных расстояний до них, так и на изучении сгущений объектов, распределенных вдоль галактического экватора.

До сих пор не существует общепринятой модели глобальной (grand design) спиральной структуры Галактики. Теоретики обычно используют простейшую модель логарифмической спирали с дву-

мя рукавами и углом закрутки $5-7^\circ$. Высокоточные современные данные о распределении облаков нейтрального водорода, ионизированного водорода и мазерных источников с измеренными тригонометрическими параллаксами говорят скорее о четырехрукавной модели с углом закрутки $10-14^\circ$. Большая доказательная база в пользу именно четырехрукавного глобального узора собрана в обзорах Валле (1995, 2002, 2008, 2017).

Предпринимались попытки, правда, безуспешные, оценить переменность угла закрутки спирального узора в Галактике (Хоу, Хан, 2014). Предложены и более сложные модели спиральной структуры Галактики. Например, модель, состоящая из наложения 2-х и 4-х рукавной структуры в области Солнца (Лепинэ и др., 2001), или модель с двумя резонансными кругами R_1 и R_2 (Мельник, Раутиайнен, 2011; Мельник, 2019).

Некоторые авторы предпочитают анализировать не глобальную структуру, а близкие к Солнцу отдельные сегменты спиральных рукавов с индивидуальными углами наклона (Никифоров, Веселова, 2018; Веселова, Никифоров, 2020). Оценки углов закрутки, найденные по известным индивидуальным отрезкам спиральных рукавов, заключены в интервале $9-18^\circ$ (см., например, Бобылев, Байкова, 2014а; Грив и др., 2017; Рид и др., 2019; Хао и др., 2021).

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

Наилучшим образом изучены два близких к Солнцу отрезка спиральных рукавов — Персея и Киля—Стрельца, которые обычно относят к глобальной структуре. Хорошо также изучен Местный рукав (Ефремов, 2011; Бобылев, Байкова, 2014б; Лепинэ и др., 2017; Валле, 2018; Хао и др., 2021; Сюй и др., 2021), который расположен между рукавами Персея и Киля—Стрельца. Местный рукав не принадлежит к глобальной структуре, но Солнце в настоящее время находится практически внутри этого локального ответвления (отрога) спиральной структуры.

Предполагается, что спиральный узор вращается твердотельно. Угловая скорость его вращения составляет по различным оценкам 15–30 км/с/кпк (Диас, Лепинэ, 2005; Попова, 2006; Герхард, 2011; Бобылев, Байкова, 2012). Это означает, что радиус коротации (радиус круга, где линейная скорость вращения спирального узора совпадает с линейной скоростью вращения Галактики) находится немного дальше от Солнца в сторону антицентра Галактики, где-то в области спирального рукава Персея, либо совсем близко к Солнцу (Баррос и др., 2021).

Обсуждение современной наблюдаемой картины, связанной со спиральной структурой Галактики, можно найти, например, в обзорах Хоу, Хана (2014), Валле (2017), Сюя и др. (2018б) или Хоу (2021).

Целью настоящей работы является уточнение параметров галактического спирального узора по большой выборке классических цефеид. Высокоточные расстояния до них были вычислены на основе соотношения период—светимость в работе Сковрон и др. (2019) с использованием фотометрии в среднем инфракрасном диапазоне.

МЕТОД

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно описать следующим уравнением:

$$R = a_0 e^{(\theta - \theta_0) \operatorname{tg} i}, \quad (1)$$

где R — расстояние от центра Галактики до звезды, θ — позиционный угол звезды: $\operatorname{tg} \theta = y / (R_0 - x)$, где x, y — гелиоцентрические галактические прямоугольные координаты звезды, причем ось x направлена от Солнца к галактическому центру, а направление оси y совпадает с направлением галактического вращения; θ_0 — некоторый произвольно выбранный начальный угол, который мы здесь задаем равным нулю, $\theta_0 = 0$; $a_0 > 0$ — место пересечения спиралью оси X , направленной из центра Галактики и проходящей через Солнце, i —

угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали), который связан с остальными параметрами следующим образом:

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

где m — количество спиральных рукавов, λ — длина волны, равная расстоянию (в радиальном направлении) между отрезками спиральных рукавов в околосолнечной области, R_0 — расстояние от Солнца до центра Галактики. В настоящей работе значение R_0 принимаем равным 8.1 ± 0.1 кпк, согласно обзору Бобылева, Байковой (2021а), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Зная a_0 в уравнении (1), можем оценить значение угла закрутки i :

$$\operatorname{tg} i = \frac{\ln(R/R_0)}{\theta}. \quad (3)$$

Для этой цели строим диаграмму “позиционный угол—логарифм расстояния”, где отрезки спиральных рукавов следуют линейным зависимостям. Причем для каждого отрезка спирального рукава можем оценить свое значение a_0 , следовательно, и i . Отметим, что в этом методе оценка угла закрутки i не зависит от количества спиральных рукавов m .

ДАННЫЕ

В настоящей работе используются данные о классических цефеидах из работы Сковрон и др. (2019). Наблюдались эти цефеиды в рамках четвертого этапа программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Удальский и др., 2015). В этом каталоге содержатся оценки расстояния, возраста, периода пульсации и фотометрические данные цефеид. Их видимые звездные величины лежат в диапазоне $11^m < I < 18^m$, поэтому имеется небольшой дефицит ярких и хорошо изученных цефеид, известных по более ранним наблюдениям.

Гелиоцентрические расстояния до 2214 цефеид были вычислены Сковрон и др. (2019) на основе соотношения период—светимость. Конкретное соотношение было взято ими из работы Ванга и др. (2018), в которой оно было уточнено по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне, где межзвездное поглощение существенно меньше, по сравнению с оптическим. Оценки возраста цефеид в работе Сковрон и др. (2019) сделаны по методике, разработанной Андерсоном и др. (2016), где учитывались периоды осевого вращения звезд и индексы металличности.

Отметим, что для решения поставленной в настоящей работе задачи необходима выборка звезд,

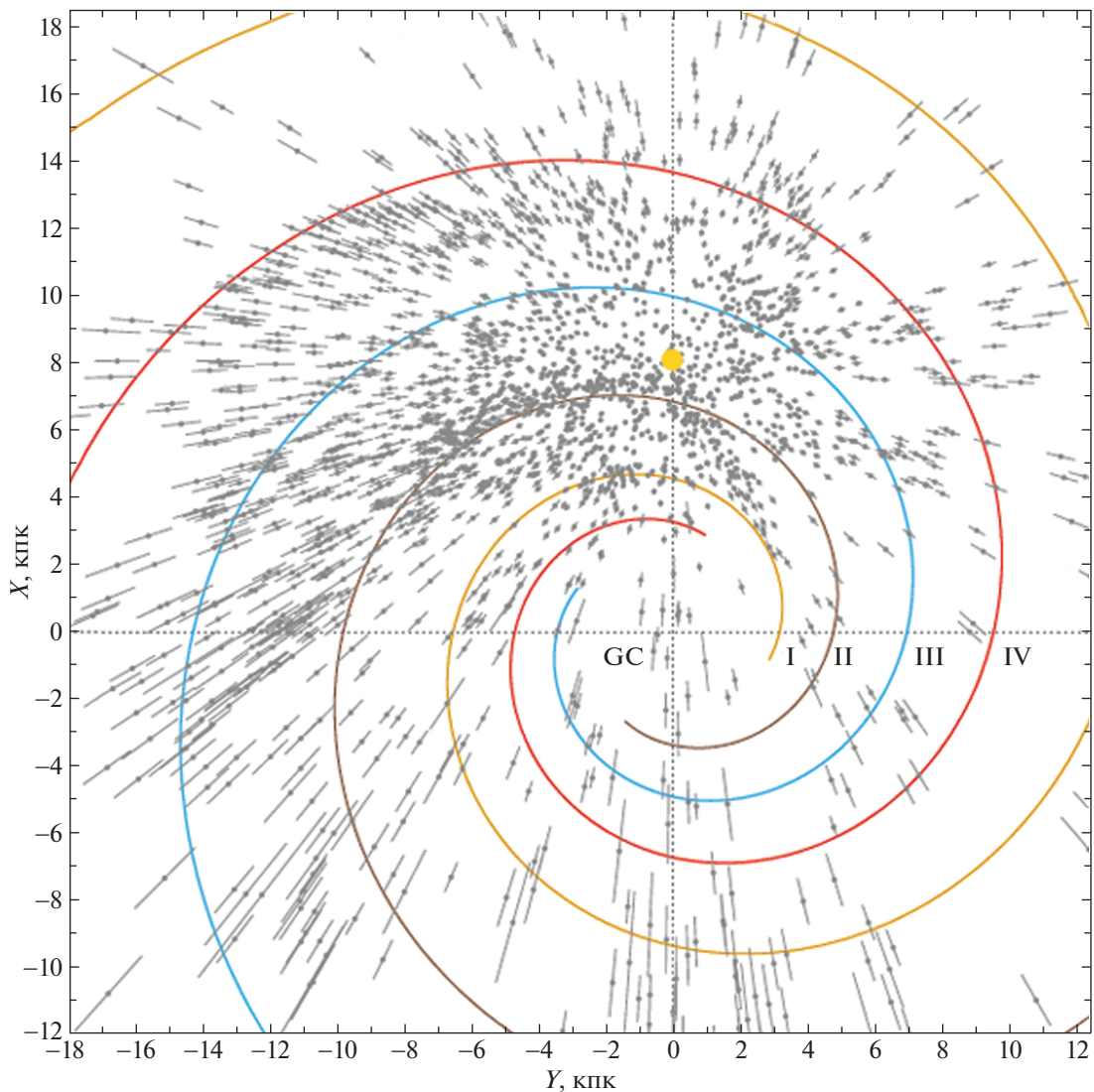


Рис. 1. Распределение цефеид на галактической плоскости XU , положение Солнца отмечено желтым кружком, GC обозначает центр Галактики, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, согласно работе Бобылева, Байковой (2014а), спиральные рукава пронумерованы римскими цифрами.

расстояния до которых определены с использованием одной калибровки по однородным данным. Поэтому мы не добавляем к цефеидам из списка Скворон и др. (2019) данные о других известных цефеидах, расстояния до которых определены другими авторами. Тем более, что такие другие цефеиды неоднократно использовались для определения геометрических характеристик спирального узора Галактики (см., например, Дамбис и др., 2015; Веселова, Никифоров, 2020).

На рис. 1 дано распределение цефеид в проекции на галактическую плоскость XU . На рисунке использована система координат, в которой ось X направлена к Солнцу из центра Галактики, направление оси U совпадает с направлением вращения Галактики. Показан четырехрукавный спиральный

узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ (Бобылев, Байкова, 2014а), построенный 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 осталась за пределами рисунка.

На рис. 1 хорошо видна концентрация значительного количества звезд к отрезку спирального рукава Киля—Стрельца. Можно также заметить концентрацию цефеид в третьем галактическом квадранте в области Внешнего рукава. Спиральный узор нанесен для примера, и задачей настоящей работы является уточнение его параметров. В работе Бобылева, Байковой (2021б) было показано, что распределение цефеид из каталога

Таблица 1. Значения углов закрутки i и параметра a_0 для пяти отрезков спиральных рукавов

Параметр	I	II	III	IV	Local	Ref
i , град.	-11.2 ± 4.0	-9.3 ± 2.2	-14.8 ± 0.8	-11.5 ± 1.9	-10.2 ± 0.3	(1)
i , град.	-10.2 ± 1.0	-10.5 ± 0.4	-7.9 ± 1.2	-10.3 ± 1.2		(2)
i , град.	-13.1 ± 2.0	-9.0 ± 1.9	-9.5 ± 2.0	-6.2 ± 4.2	-11.4 ± 1.9	(3)
i , град.	-21.4 ± 0.8	-9.9 ± 1.3	-10.6 ± 0.5	-18.6 ± 6.9	-16.5 ± 0.5	(4)
i , град. (20–40 млн лет)		-16.3 ± 1.0	-9.3 ± 0.9		-10.8 ± 0.9	(5)
i , град. (60–80 млн лет)		-16.2 ± 1.0	-9.6 ± 0.9		-10.5 ± 0.9	(5)
i , град.	-8	-13.8	-11.9		-8.5	(6)
i , град.	-18.7 ± 0.8	-13.5 ± 0.5	-9.0 ± 0.1		-11.5 ± 0.5	(7)
i , град.	-15.1 ± 0.7	-17.4 ± 0.2	-7.0 ± 0.3		-10.2 ± 0.2	(8)
i , град. (~ 50 млн лет)	-11.7 ± 0.9	-13.1 ± 1.4	-6.2 ± 1.6	-5.2 ± 2.8	-9.9 ± 1.2	(9)
i , град. (~ 100 млн лет)	-8.9 ± 2.1	-8.3 ± 0.8	-7.0 ± 1.2	-9.7 ± 1.1	-7.0 ± 0.6	(9)
a_0 , кпк ($R_0 = 8$ кпк)	4.5 ± 0.2	6.8 ± 0.3	9.9 ± 0.4	13.5 ± 0.5	8.1 ± 0.3	(1)
a_0 , кпк ($R_0 = 8$ кпк)	5.2 ± 0.1	6.4 ± 0.1	8.7 ± 0.1	10.9 ± 0.1		(2)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.44$ кпк)	4.9 ± 0.1	6.0 ± 0.1	8.9 ± 0.1	12.2 ± 0.4	8.3 ± 0.1	(3)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.15$ кпк)	6.5	6.9	9.6		8.5	(6)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.35$ кпк)	5.9 ± 0.1	7.2 ± 0.1	10.6 ± 0.1		8.3 ± 0.1	(7)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.34$ кпк)	5.89 ± 0.02	6.95 ± 0.01	10.35 ± 0.01		8.51 ± 0.01	(8)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.08$ кпк (~ 50 млн лет))	6.07 ± 0.04	6.78 ± 0.05	9.74 ± 0.09	12.02 ± 0.17	8.19 ± 0.05	(9)
a_0 , кпк ($R_0 = 8.08$ кпк (~ 100 млн лет))	6.18 ± 0.06	6.83 ± 0.02	9.62 ± 0.05	11.93 ± 0.07	8.10 ± 0.02	(9)

Примечание. (1) — Бобылев, Байкова (2014а); (2) — Дамбис и др. (2015); (3) — Рид и др. (2019); (4) — Никифоров, Веселова (2018); (5) — Хао и др. (2021); (6) — Хоу и др. (2021); (7) — Сюй и др. (2018б); (8) — Чен и др. (2019); (9) — Веселова, Никифоров (2020); I — рукав Щита, II — рукав Киля–Стрельца, III — рукав Персея, IV — Внешний рукав, Local — Местный рукав (рукав Ориона).

Сковрон и др. (2019) в проекции на галактическую плоскость XU очень сильно различается в зависимости от возраста звезд. Поэтому для анализа необходимо рассматривать выборки цефеид, возрасты которых лежат в узких диапазонах величин. Как можно видеть из рисунка, в широкой окрестности Солнца очень плохо представлен спиральный рукав Персея, также очень слабо представлен Местный рукав.

В табл. 1 даны значения углов закрутки пяти отрезков спиральных рукавов и параметра a_0 , согласно определениям различных авторов.

В работах Бобылева, Байковой (2014а), Рида и др. (2019) и Никифорова, Веселовой (2018) для определения параметров спиральной структуры были использованы данные о мазерных источниках с измеренными тригонометрическими параллаксами. Лишь для определения параметров Внешнего

рукава Бобылев, Байкова (2014а) совместно с мазерами использовали данные о нескольких очень молодых далеких рассеянных звездных скоплениях.

В работе Дамбиса и др. (2015) для этой цели была использована выборка классических цефеид. При этом все вычисления проведены в относительных единицах R/R_0 . Отмечено, что результаты остаются справедливыми при значениях R_0 , лежащих в интервале 7.1–8 кпк. Для анализа были использованы 565 ярких классических цефеид, расположенных в радиусе 5 кпк вокруг Солнца. Для этого были взяты цефеиды из каталога Бердникова и др. (2000). Оценки расстояний до цефеид получены с соотношением период–светимость с применением процедуры Бердникова и др. (1996) в инфракрасной полосе K в сочетании с зависимостью период–нормальный цвет ($B - V$) из работы Дина и др. (1978). Расстояния до цефеид Дамбисом и др. (2015) оценены независимым от Скворон и др. (2019) методом, использованы были более яркие звезды. При этом сильная концентрация звезд выборки к рукаву Киля–Стрельца у них получилась похожей на наш рис. 1.

В работе Сюя и др. (2018б) дан обзор результатов, полученных по различным индикаторам спиральной структуры — облакам нейтрального и молекулярного водорода, рассеянным звездным скоплениям, мазерным источникам с измеренными тригонометрическими параллаксами и O -звездам с тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2. Характеристики спиральной структуры определены Сюем и др. (2018б) из комбинации данных о положениях 102 мазеров и 583 O -звезд, где мазеры были взяты с весами, равными 10, а O -звезды — с единичными весами.

В работе Чена и др. (2019) характеристики спиральной структуры определены из комбинации данных о мазерах и $OB2$ -звездах, где мазеры так же, как и в работе Сюя и др. (2018б), были взяты с весами, равными 10, а $OB2$ -звезды с единичными весами. Причем здесь была использована огромная выборка $OB2$ -звезд, содержащая 14 880 $OB2$ -звезд с параллаксами из каталога Gaia DR2. Для отбора этих звезд из каталога Gaia DR2 были использованы данные о спектрально подтвержденных кандидатах из обзора VPHAS (VST Photometric $H\alpha$ Survey, Дрю и др., 2014). Из-за такого большого количества звезд здесь получились очень маленькие ошибки определения параметра a_0 .

В работе Веселовой, Никифорова (2020) для определения параметров нескольких сегментов спиральных рукавов были использованы данные о 674 цефеидах из работы Мельник и др. (2015). Эта выборка была разделена на две части по

периоду пульсации с границей 4.6^d . Средний возраст относительно молодых цефеид составил около 50 млн лет, относительно старых — около 100 млн лет. В табл. 1 из работы Веселовой, Никифорова (2020) даны параметры для их рукава Киля–Стрельца-1 и Внешнего-1. Значения a_0 , взятые из их табл. 1, нами пересчитаны для $R_0 = 8.08$ кпк.

В работе Хао и др. (2021) использованы данные о 3794 рассеянных звездных скоплениях, для которых средние расстояния были вычислены по тригонометрическим параллаксам из каталога Gaia EDR3. В табл. 1 даны два результата этих авторов, полученные по выборкам скоплений разного возраста.

В работе Хоу и др. (2021) совместно анализировались данные о гигантских молекулярных облаках, мазерных источниках, областях III, O -звездах и молодых рассеянных звездных скоплениях. Отметим, что Хоу и др. (2021) выделили два независимых сегмента в области рукава II (рукава Киля–Стрельца) со слегка различающимися характеристиками. В табл. 1 даны параметры для этого рукава, которые мы усреднили по двум сегментам, согласно данным Хоу и др. (2021).

Оценки параметров, представленные в табл. 1, в основном получены методом анализа диаграммы “позиционный угол–логарифм расстояния”. Различаются, конечно, наборы данных. При этом можно говорить лишь об удовлетворительном согласии между всеми оценками по каждому из отрезков спиральных рукавов.

На рис. 1 было дано распределение всех цефеид, рассматриваемых в настоящей работе. Однако их распределение на плоскости XU сильно зависит от возраста звезд. Это хорошо можно видеть на рис. 2, где дано распределение четырех выборок цефеид различного возраста в проекции на галактическую плоскость XU .

Анализ распределений цефеид на рис. 2 позволяет сделать ряд важных заключений. Цефеиды старше 300 млн лет (рис. 2г) не представляют интереса для решения задачи по уточнению геометрических характеристик спирального узора. В их распределении видно отсутствие концентрации к спиральным рукавам. Всего в этой выборке 126 цефеид.

В распределении цефеид моложе 80 млн лет (рис. 2а) отчетливо видна структура, вытянутая от Солнца вдоль луча зрения под углом около 30 – 40° . По-видимому, эти цефеиды наблюдались в окне прозрачности. Использование этих звезд может привести к значительному искажению геометрических параметров спирального рукава Киля–Стрельца (рукав II). Отметим, что использование подобных звезд в работе Хоу и др. (2021) вынудило

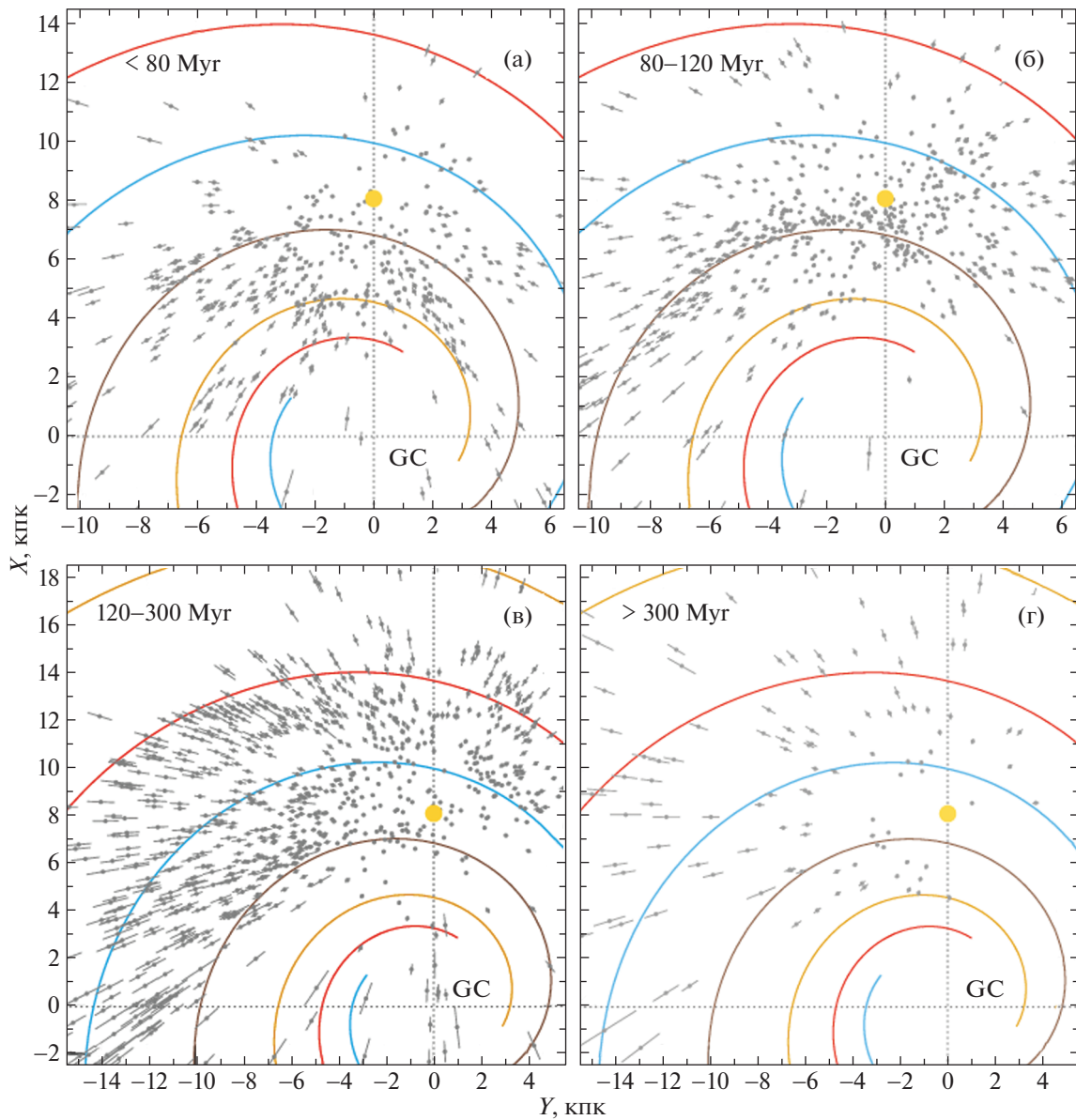


Рис. 2. Распределение на галактической плоскости XU цефеид моложе 80 млн лет (а), с возрастaми в интервале 80–120 млн лет (б), с возрастaми в интервале 120–300 млн лет (в) и старше 300 млн лет (г), положение Солнца отмечено желтым кружком, GC обозначает центр Галактики, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, согласно работе Бобылева, Байковой (2014а).

этих авторов рассматривать два сегмента в отрезке рукава Киля–Стрельца с различающимися характеристиками. Всего имеется 470 цефеид моложе 80 млн лет, в настоящей работе эти звезды мы решили не использовать.

Концентрацию цефеид к спиральному рукаву Киля–Стрельца можно видеть как на рис. 2б, так и на рис. 2в. Поэтому можно анализировать эти выборки как раздельно, так и совместно для уточнения геометрических характеристик спирального рукава Киля–Стрельца. По нашему мнению, выгоднее анализировать раздельно, несмотря на частичную потерю звезд, так как в этом случае

имеем более однородные в отношении возраста звезд выборки.

Концентрацию цефеид к Внешнему спиральному рукаву можно видеть только на рис. 2в. Хорошо заметен просвет — пустое пространство между рукавами Персея и Внешним в третьем галактическом квадранте. При этом видно, что цефеиды не расположены в центре Внешнего рукава, показанного на рисунке и найденного из анализа лазерных источников (Бобылев, Байкова, 2014а). Таких цефеид в выборке с возрастaми 120–300 млн лет, расположенных на рисунке вдоль внутреннего края Внешнего рукава, достаточно много. Их использо-

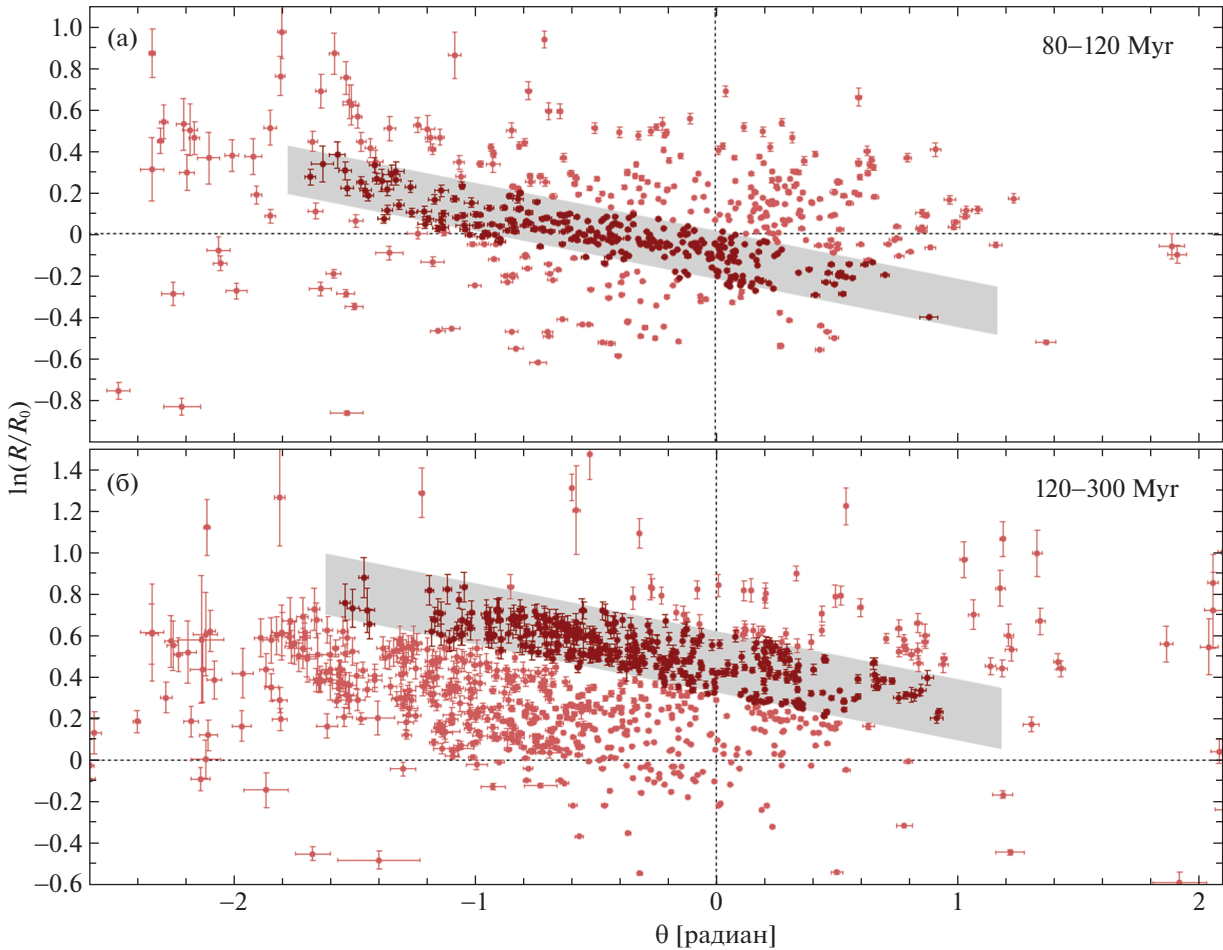


Рис. 3. Диаграмма “позиционный угол—логарифм расстояния” для цефеид с возрастaми в интервале 80–120 млн лет (а) и в интервале 120–300 млн лет (б), заливкой на каждом графике показана область предварительного отбора звезд.

вание может привести к существенному уточнению характеристик этого спирального рукава.

Нет возможности надежно выделить достаточное количество цефеид, принадлежащих отрезкам спиральных рукавов Персея и Щита без дополнительной информации о лучевых скоростях звезд. Поэтому в настоящей работе пытаемся уточнить геометрические характеристики двух спиральных рукавов — Килия—Стрельца и Внешнего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 даны диаграммы “позиционный угол—логарифм расстояния” для двух выборок цефеид. Показаны границы для предварительного отбора звезд цефеид с возрастaми в интервале 80–120 млн лет, где средний возраст составляет 100 млн лет, и в интервале 120–300 млн лет со средним возрастaм 200 млн лет.

При отборе звезд в рукаве Килия—Стрельца были использованы следующие ограничения: $-1.7 <$

$< \theta < 1.1$ рад., а $\ln(R/R_0)$ ограничен двумя линиями сверху и снизу: $\theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.02 < \ln(R/R_0) < \theta \operatorname{tg}(-13^\circ) - 0.25$.

Для отбора звезд во Внешнем рукаве угол θ был взят из интервала $-1.6 < \theta < 1.1$ рад., и использованы следующие ограничения для $\ln(R/R_0)$: $\theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.6208 < \ln(R/R_0) < \theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.3120$. По сравнению с оценкой a_0 , найденной для Внешнего рукава в работе Бобылева, Байковой (2014а) (см. табл. 1), здесь использовано меньшее значение этой величины, т.е. зона отбора смещена ближе к Солнцу.

Ширина зоны, соответствующая ограничениям на $\ln(R/R_0)$, взята с большим запасом — она в 5–6 раз превышает известный поперечный размер рукавов. Например, из анализа распределения относительно небольшого количества мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами Ридом и др. (2019) получена оценка ширины рукава Килия—Стрельца 0.27 кпк, а Внешнего рукава — 0.65 кпк. Как можно видеть из рис. 3а, в зоне

Таблица 2. Параметры линейной зависимости вида $\ln(R/R_0) = a\theta + b$, найденные с единичными весами, даны в верхней части таблицы, а в нижней — с весами вида $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$, n_* — количество использованных цефеид

Рукав	n_*	a	b	i , град.	a_0 , кпк
II (Киля—Стрельца)	269	-0.212 ± 0.008	-0.104 ± 0.005	-11.98 ± 0.45	7.29 ± 0.05
IV (Внешний)	343	-0.206 ± 0.009	$+0.458 \pm 0.005$	-11.66 ± 0.49	12.81 ± 0.06
II (Киля—Стрельца)	269	-0.211 ± 0.004	-0.102 ± 0.002	-11.94 ± 0.22	7.32 ± 0.05
IV (Внешний)	343	-0.203 ± 0.008	$+0.465 \pm 0.005$	-11.46 ± 0.47	12.89 ± 0.06

отбора для рукава Киля—Стрельца тонкой ниточкой протянулась основная часть цефеид и имеется много пространства с относительно низкой звездной плотностью. Таким образом, ширина этой ниточки в рукаве Киля—Стрельца близка к оценке Рида и др. (2019). При этом ширина выбранной нами области отбора здесь в 3–4 раза превышает оценку Рида и др. (2019). Цефеиды Внешнего рукава имеют существенно больший возраст (около 200 млн лет), успели далеко удалиться от места своего рождения. Как видно из рис. 3б, отобранные звезды практически равномерно заполняют зону отбора. Ширина области отбора здесь составляет около 4 кпк, что также существенно превышает оценку Рида и др. (2019).

В табл. 2 даны параметры a и b , найденные в результате МНК-решения системы условных уравнений вида $\ln(R/R_0) = a\theta + b$. Решения были найдены как с единичными весами, так и с весовыми коэффициентами $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$, где $i = 1, 2, \dots, n_*$, а n_* — количество используемых в решении звезд. В таблице даны также значения параметра a_0 , входящего в уравнение спирали (1) и отмечающего галактоцентрическое положение центра рукава на оси X .

Как можно видеть из табл. 2, оба значения угла закрутки i находятся в очень хорошем согласии между собой. Имеется согласие и с результатами, приведенными в табл. 1 в пределах заявленных там случайных ошибок. Отметим, что угол закрутки Внешнего рукава, найденный в настоящей работе, определен очень надежно, так как ошибка определения мала.

Придерживаясь модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, можем заключить, что значение этого угла близко к -12° . В будущем желательно, конечно, определить значение этого угла по большему количеству наблюдаемых отрезков спиральных рукавов. Поэтому здесь мы не вычисляем среднее значение этого угла из результатов анализа только двух отрезков спиральных рукавов.

То же можно сказать и о согласии результатов определения значений a_0 . Можно отметить, что в нашем случае рукав Киля—Стрельца (II) расположен ближе к Солнцу, а Внешний рукав (IV) — дальше по сравнению с результатами анализа других выборок цефеид (Дамбис и др., 2015). Это означает, по-нашему мнению, что дело не в шкалах расстояний, а в особенности распределения цефеид различного возраста.

Для более обстоятельного объяснения этого тезиса подготовлен рис. 4. На нем дана схема расположения молодых и старых звезд в спиральных рукавах в различных относительно области коротационных зонах. Эта известная схема (Мартинес-Гарсия и др., 2009; Хоу, Хан, 2015; Сюй и др., 2018б), отражающая предсказания квазистационарного случая спиральной волны плотности (Робертс, 1969). Она приспособлена нами для более близкого к расположению Внешнего рукава случая.

В работе Бобылева, Байковой (2014а) параметры спирального узора были определены по мазерным источникам, расположенным в областях активного звездообразования. Поэтому спиральный узор, указанный на рис. 1 и рис. 2, отмечает место текущего звездообразования. Цефеиды с возрастными из интервала 80–120 млн лет существенно старше указанных мазеров, возраст которых составляет всего несколько млн лет. Поэтому имеем очень хорошее согласие между положением цефеид с возрастными из интервала 80–120 млн лет на рис. 2б и на схеме рис. 4 внутри круга коротации. Таким образом, найденное по ним значение $a_0 = 7.29 \pm 0.05$ кпк превышает $a_0 = 6.8 \pm 0.3$ кпк, найденное по мазерам в работе Бобылева, Байковой (2014а).

Цефеиды с возрастными из интервала 120–300 млн лет, конечно, успели далеко удалиться от места своего рождения. Несмотря на это, здесь также имеется качественное согласие между их положением относительно Внешнего рукава на рис. 1, рис. 2в и на схеме рис. 4 вне круга коротации.

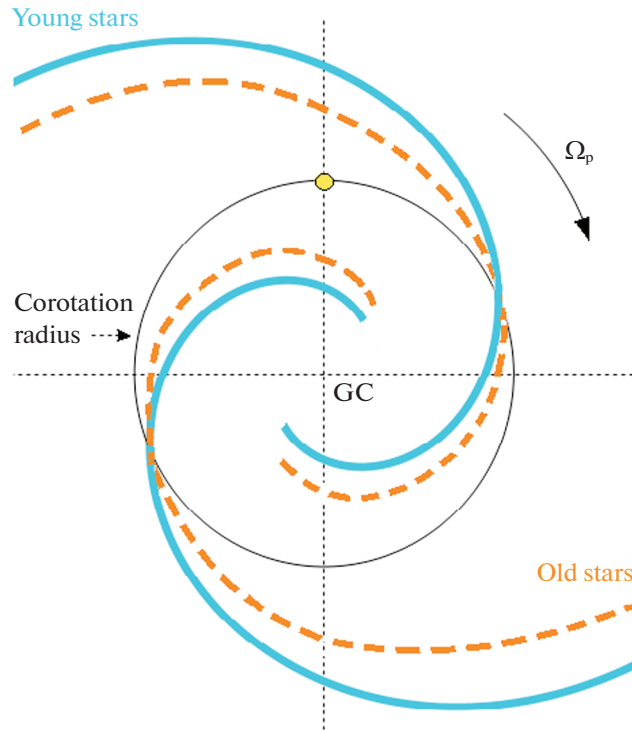


Рис. 4. Схема расположения молодых и старых звезд относительно области коротации; круг коротации показан тонкой сплошной линией, на которой желтым кружком показано место наблюдателя; место текущего звездообразования отмечено голубой жирной линией; расположение более старых звезд дано оранжевой пунктирной линией. Показано направление вращения спирального узора с угловой скоростью Ω_p , GC — центр Галактики.

Можем заключить, что значение угла закрутки i (табл. 2) определено очень хорошо. Значения же a_0 в табл. 2 характеризуют не положения центров спиральных рукавов, а положения областей, где сформировались цефеиды.

Для того чтобы убедиться в воспроизводимости результатов, были вычислены параметры спирального узора с различными весами и при более широких ограничениях на ширину полосы отбора. Новый отбор осуществлялся уже с углом наклона полосы отбора -12° , значение которого найдено в настоящей работе ранее.

Помимо единичных весов, были выбраны веса еще трех следующих видов: $w_i = 1/\sigma_r^2$, $w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$, где $\sigma_0 = 0.01$ кпк, а также $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$. Так как применяем веса, то полоса отбора цефеид из рукава Киля—Стрельца была расширена по позиционному углу $-2.5 < \theta < 1.1$ рад, чтобы в нее вошли звезды с большими ошибками расстояний из третьего и частично четвертого квадрантов (рис. 2б).

Результаты отражены в табл. 3 для рукава Киля—Стрельца и в табл. 4 для Внешнего рукава. В этих таблицах вместо граничных условий, выраженных в логарифмах и занимающих большую ширину в столбце таблицы, указана ширина полосы отбора ΔR в кпк. Из этих таблиц следует, что

значение угла закрутки в обоих случаях находится в интервале $11-12^\circ$. Особенно стабильно этот угол определяется по цефеидам Внешнего рукава с различными весами в верхней части табл. 3. Расширение области отбора ведет к возрастанию дисперсии результатов, особенно значений угла закрутки.

На рис. 5 дано распределение всей выборки цефеид на плоскости XU , где показаны два спиральных рукава, построенные с найденными параметрами (верхняя часть табл. 2). Можно видеть, что оба рукава отлично проходят по данным во втором и третьем галактическом квадранте. При этом необходимо учитывать все то, что было сказано выше при обсуждении схемы рис. 4.

Параметры Внешнего рукава имеют важное значение, так как впервые они получены с высокой точностью по большой выборке звезд с надежными оценками расстояний. Действительно, в работе Бобылева, Байковой (2014а) анализ Внешнего рукава был проведен с использованием трех мазерных источников в комбинации с данными о 12 молодых рассеянных звездных скоплениях. В работе Рида и др. (2019) были использованы 11 мазерных источников в этом рукаве. Никифоров, Веселова (2018) оценивали параметры Внешнего рукава по шести мазерам. В работе Дамбиса и др. (2015)

Таблица 3. Параметры зависимости вида $\ln(R/R_0) = a\theta + b$, найденные при различной ширине ΔR полосы отбора цефеид в рукаве Килия–Стрельца при наклоне полосы -12°

w_i ,	n_*	a	b	i , град.	ΔR , кпк
$w_i = 1$	282	-0.205 ± 0.007	-0.105 ± 0.005	-11.61 ± 0.39	1.95
$w_i = 1/\sigma^2$	282	-0.188 ± 0.008	-0.099 ± 0.005	-10.65 ± 0.48	1.95
$w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$	282	-0.185 ± 0.009	-0.099 ± 0.004	-10.48 ± 0.52	1.95
$w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$	282	-0.207 ± 0.004	-0.102 ± 0.003	-11.69 ± 0.21	1.95
$w_i = 1$	302	-0.203 ± 0.007	-0.102 ± 0.005	-11.46 ± 0.41	2.20
$w_i = 1/\sigma^2$	302	-0.181 ± 0.009	-0.095 ± 0.005	-10.28 ± 0.50	2.20
$w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$	302	-0.177 ± 0.010	-0.095 ± 0.005	-10.05 ± 0.54	2.20
$w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$	302	-0.205 ± 0.004	-0.099 ± 0.003	-11.57 ± 0.22	2.20

Таблица 4. Параметры зависимости вида $\ln(R/R_0) = a\theta + b$, найденные при различной ширине ΔR полосы отбора цефеид во Внешнем рукаве при наклоне полосы -12°

w_i ,	n_*	a	b	i , град.	ΔR , кпк
$w_i = 1$	343	-0.206 ± 0.009	0.458 ± 0.005	-11.66 ± 0.49	4.12
$w_i = 1/\sigma^2$	343	-0.222 ± 0.011	0.413 ± 0.004	-12.52 ± 0.64	4.12
$w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$	343	-0.212 ± 0.011	0.425 ± 0.004	-11.97 ± 0.62	4.12
$w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$	343	-0.203 ± 0.008	0.465 ± 0.005	-11.46 ± 0.47	4.12
$w_i = 1$	372	-0.192 ± 0.009	0.457 ± 0.005	-10.89 ± 0.52	4.63
$w_i = 1/\sigma^2$	372	-0.216 ± 0.012	0.402 ± 0.004	-12.18 ± 0.67	4.63
$w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$	372	-0.203 ± 0.011	0.417 ± 0.005	-11.48 ± 0.64	4.63
$w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$	372	-0.187 ± 0.009	0.466 ± 0.005	-10.59 ± 0.49	4.63
$w_i = 1$	415	-0.181 ± 0.010	0.452 ± 0.006	-10.26 ± 0.55	5.42
$w_i = 1/\sigma^2$	415	-0.237 ± 0.013	0.378 ± 0.005	-13.34 ± 0.73	5.42
$w_i = \sigma_0^2/(\sigma_0^2 + \sigma_r^2)$	415	-0.212 ± 0.012	0.401 ± 0.005	-11.98 ± 0.69	5.42
$w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$	415	-0.171 ± 0.009	0.464 ± 0.006	-9.71 ± 0.52	5.42

во Внешнем рукаве для анализа были отобраны 99 цефеид.

В работе Веселовой, Никифорова (2020) для определения параметров Внешнего рукава были использованы 10 молодых и 89 старых цефеид.

Отметим, что найденное в настоящей работе значение угла закрутки Внешнего рукава лучше всего согласуется как раз с оценками Дамбиса и др. (2015), а также Веселовой, Никифорова (2020), полученными ими по выборке старых цефеид.

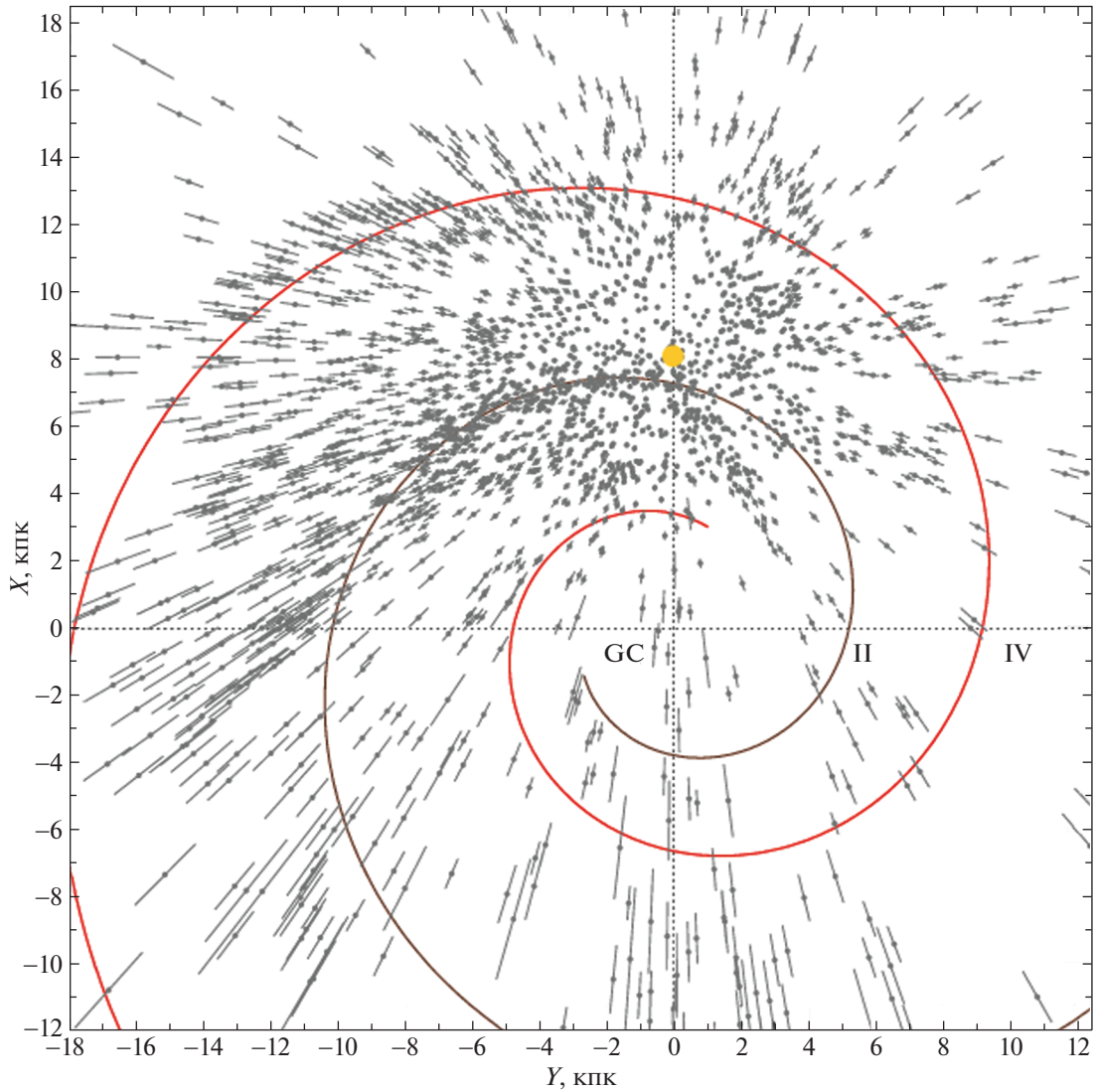


Рис. 5. Распределение цефеид на галактической плоскости XY , положение Солнца отмечено желтым кружком, GC — центр Галактики, показаны два спиральных рукава, построенные с найденными параметрами (верхняя часть табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена выборка классических цефеид Галактики с высокоточными оценками расстояний из работы Сковрон и др. (2019), которые были вычислены этими авторами на основе соотношения период–светимость.

Для уточнения геометрических характеристик отрезков спиральных рукавов Киля–Стрельца и Внешнего в настоящей работе были использованы цефеиды с возрастными в интервале 80–300 млн лет. Для этого были отобраны 269 цефеид, принадлежащих рукаву Киля–Стрельца, с возрастными в интервале 80–120 млн лет. По ним с применением единичных весов получены оценка угла закрутки спирального узора $i = -12.0 \pm 0.5^\circ$ и положение центра этого рукава на оси центр Галактики–Солнце $a_0 = 7.29 \pm 0.05$ кпк для принятого значе-

ния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. По 343 цефеидам Внешнего рукава с возрастными 120–300 млн лет найдены $i = -11.7 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 12.81 \pm 0.06$ кпк.

Вычисления были повторены с применением весов вида $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$. В этом случае для рукава Киля–Стрельца получены следующие оценки: $i = -11.9 \pm 0.2^\circ$ и $a_0 = 7.32 \pm 0.05$ кпк, а для Внешнего рукава $i = -11.5 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 12.89 \pm 0.06$ кпк.

Наибольший интерес представляют параметры Внешнего рукава, так как впервые они получены по такой большой и однородной выборке звезд с надежными оценками расстояний.

Устойчивость найденных параметров спирального узора подтверждена вычислениями, выполненными с различными весами при различных бо-

лее широких ограничениях на полосы отбора цефеид в анализируемых рукавах.

Придерживаясь модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, можем заключить, что значение этого угла близко к -12° . В будущем желательно, конечно, определить значение этого угла по большему количеству наблюдаемых отрезков спиральных рукавов.

Автор благодарен рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон и др. (R.I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, C. Georgy, and G. Meynet), *Astron. Astrophys.* **591**, A8 (2016).
- Баррос и др. (D.A. Barros, A. Perez-Villegas, T.A. Michtchenko, and J.R.D. Lepine), *Front. Astron. Space Sci.* **8**, 48 (2021).
- Бердников (L.N. Berdnikov), *Odessa Astron. Publ.* **18**, 23 (2006).
- Бердников Л.Н., Возякова О.В., Дамбис А.К., Письма в *Астрон. журн.* **22**, 936 (1996) [L.N. Berdnikov et al., *Astron. Lett.* **22**, 839 (1996)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **38**, 715 (2012) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **38**, 638 (2012)].
- Бобылев В.В., Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014a).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **40**, 840 (2014b) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **40**, 783 (2014b)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрон. журн.* **98**, 497 (2021a) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021a)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма *Астрон. журн.* **47**, 557 (2021b) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **47**, 534 (2021b)].
- Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **454**, 119 (1995).
- Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **566**, 261 (2002).
- Валле (J.P. Vallée), *Astron. J.* **135**, 1301 (2008).
- Валле (J.P. Vallée), *New Astron. Rev.* **79**, 49 (2017).
- Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. Space Sci.* **363**, 243 (2018).
- Ванг и др. (S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng), *Astrophys. J.* **852**, 78 (2018).
- Васкес и др. (R.A. Vázquez, J. May, G. Carraro, L. Bronfman, A. Moitinho, and G. Baume), *Astrophys. J.* **672**, 930 (2008).
- Веселова, Никифоров (A.V. Veselova and I.I. Nikiforov), *Res. Astron. Astrophys.* **20**, 209 (2020).
- Герхард (O. Gerhard), *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.* **18**, 185 (2011).
- Грив и др. (E. Griv, I.-G. Jiang, and L.-G. Hou), *Astrophys. J.* **844**, 118 (2017).
- Дамбис А.К., Бердников Л.Н., Ефремов Ю.Н., Князев А.Ю., Расторгуев А.С., Глушкова и др., Письма в *Астрон. журн.* **41**, 533 (2015) [A.K. Dambis, et al., *Astron. Lett.* **41**, 489 (2015)].
- Диас, Лепинэ (W.S. Dias and J.R.D. Lépine), *Astrophys. J.* **629**, 825 (2005).
- Дин и др. (J.F. Dean, P.R. Warren, and A.W.J. Cousins), *MNRAS* **183**, 569 (1978).
- Дрю и др. (J.E. Drew, E. Gonzalez-Solares, R. Greimel, M.J. Irwin, A.K. Yoldas, J. Lewis, G. Barentsen, J. Eisloffel, et al.), *MNRAS* **440**, 2036 (2014).
- Ефремов Ю.Н., *Астрон. журн.* **88**, 127 (2011) [Yu.N. Efremov, *Astron. Rep.* **55**, 105 (2011)].
- Жоржелин, Жоржелин (Y.M. Georgelin and Y.P. Georgelin), *Astron. Astrophys.* **49**, 57 (1976).
- Ливайн и др. (E.S. Levine, L. Blitz, and C. Heiles), *Science* **312**, 1773 (2006).
- Лепинэ и др. (J.R.D. Lépine, Yu.N. Mishurov, and S.Yu. Dedikov), *Astrophys. J.* **546**, 234 (2017).
- Лепинэ и др. (J.R.D. Lépine, T.A. Michtchenko, D.A. Barros, and R.S.S. Vieira), *Astrophys. J.* **843**, 48 (2017).
- Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
- Линь и др. (C.C. Lin, C. Yuan, and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
- Мартинес-Гарсия и др. (E.E. Martinez-Garcia, R.A. González-Lópezlira, and G. Bruzual-A), *Astrophys. J.* **694**, 512 (2009).
- Мельник, Раутиайнен (A.M. Mel'nik and P. Rautiainen), *MNRAS* **418**, 2508 (2011).
- Мельник и др. (A.M. Mel'nik, P. Rautiainen, L.N. Berdnikov, A.K. Dambis, and A.S. Rastorguev), *Astron. Nachr.* **336**, 70 (2015).
- Мельник (A.M. Melnik), *MNRAS* **485**, 2106 (2019).
- Моитиньо и др. (A. Moitinho, R.A. Vázquez, G. Carraro, G. Baume, E.E. Giorgi, and W. Lyra), *MNRAS* **368**, L77 (2006).
- Никифоров И.И., Веселова А.В., Письма в *Астрон. журн.* **44**, 102 (2018) [I.I. Nikiforov, A.V. Veselova, *Astron. Lett.* **44**, 81 (2018)].
- Паладини и др. (R. Paladini, R. Davies and G. DeZotti), *MNRAS* **347**, 237 (2004).
- Поджио и др. (E. Poggio, R. Drimmet, T. Cantat-Gaudin, P. Ramos, V. Ripepi, E. Zari, R. Andrae, R. Blomme, et al.), *Astron. Astrophys.* **651**, 104 (2021).
- Попова М.Э., Локтин А.В., Письма в *Астрон. журн.* **31**, 190 (2005) [M.E. Popova, A.V. Loktin, *Astron. Lett.* **31**, 171 (2005)].
- Попова М.Э., Письма в *Астрон. журн.* **32**, 274 (2006) [M.E. Popova, *Astron. Lett.* **32**, 244 (2006)].
- Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, Y. Wu, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
- Робертс (W.W. Roberts), *Astrophys. J.* **158**, 123 (1969).
- Руссейль (D. Russeil), *Astron. Astrophys.* **397**, 133 (2003).

44. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszyński, M.K. Szymański, R. Poleski, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
45. Сюй и др. (Y. Xu, S. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, B. Zhang, Q.Z. Yan, T.M. Dame, K.M. Menten, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, L15 (2018a).
46. Сюй и др. (Y. Xu, L.-G. Hou, and Y.-W. Wu), *Res. Astron. Astrophys.* **18**, 146 (2018b).
47. Сюй и др. (Y. Xu, L.G. Hou, S. Bian, C.J. Hao, D.J. Liu, J.J. Li, and Y.J. Li), *Astron. Astrophys.* **645**, L8 (2021).
48. Тэйлор, Кордес (J.H. Taylor, and J.M. Cordes), *Astrophys. J.* **411**, 674 (1993).
49. Удальский и др. (A. Udalski, M.K. Szymański, and G. Szymański), *Acta Astron.* **65**, 1 (2015).
50. Хао и др. (Hao C.J., Xu Y., Hou L.G., S.B. Bian, J.J. Li, Z.Y. Wu, Z.H. He, Y.J. Li, and D.J. Liu), *arXiv astro-ph: 2107.06478* (2021).
51. Хоу, Хан (L.G. Hou and J.L. Han), *Astron. Astrophys.* **569**, 125 (2014).
52. Хоу, Хан (L.G. Hou and J.L. Han), *MNRAS* **454**, 626 (2015).
53. Хоу (L.G. Hou), *Front. Astron. Space Sci.* **8**, 103 (2021).