

Построение зависимости «период–светимость» для классических цефеид Галактики на основе фотометрических и спектральных данных

Я. А. Лазовик^{1,2,*}, А. С. Расторгуев^{1,2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра астрофизики и звездной астрономии Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13

(Статья поступила 28.09.2020; подписана в печать 13.10.2020)

Настоящая работа посвящена изучению выборки из 44 цефеид Галактики в контексте калибровки зависимости «период–светимость» и последующего построения шкалы расстояний. Впервые продемонстрированы возможности метода максимального правдоподобия, являющегося модификацией метода Бааде–Беккера–Весселинка. Данный подход позволяет определить основные характеристики цефеиды и межзвездной среды, а также рассчитать расстояние, используя мультифазовые измерения эффективной температуры. Была проведена корректировка наблюдательных данных, соответствующих цефеидам в двойных и кратных системах. Изучено и учтено влияние ударных волн, присутствие которых в атмосферах пульсирующих звезд ведет к искажению фотометрических и спектральных данных. В результате исследования было получено следующее выражение для зависимости «период–светимость»: $M_v = -(2.67 \pm 0.16) \cdot (\lg P - 1) - (4.14 \pm 0.05)$. Несмотря на то, что итоговая калибровка, в целом, неплохо согласуется с результатами других работ, её нуль–пункт оказался больше (по модулю), чем у зависимостей, рассчитанных при помощи метода тригонометрического параллакса. Этот результат указывает на то, что шкала расстояний в ближней Вселенной должна иметь больший масштаб, чем было принято до этого, что ведет к меньшему значению постоянной Хаббла.

PACS: 97.30.Gj, 97.10.Vm, 97.10.Ri, 97.10.Pg

УДК: 524.333.3, 52-323.33.

Ключевые слова: звезды, переменные звезды, цефеиды, расстояние, светимость, шкала расстояний.

ВВЕДЕНИЕ

В современной астрономии цефеиды играют особую роль — роль «стандартных свечей». С момента открытия зависимости «период–светимость» в 1912 г. [1] эти звезды стали ключевыми объектами в контексте калибровки шкалы расстояний и оценки постоянной Хаббла. Десятилетия работы привели к значительному прогрессу в этой области. Развитие технологий обеспечило повышение качества наблюдательных данных, в то время как фундаментальные исследования подготовили теоретическую основу для дальнейших работ. Однако и сейчас калибровка зависимости «период–светимость» остается одной из приоритетных целей в звездной астрономии.

На сегодняшний день известны несколько способов решения данной задачи, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения. Одним из наиболее известных методов является метод тригонометрического параллакса, который в настоящее время неразрывно связан с работой миссии Gaia [2]. Однако последняя на данный момент версия каталога Gaia (Gaia DR2) не внушает оптимизма по целому ряду причин. Наиболее тесные из двойных и кратных систем звезд

были интерпретированы как одиночные звезды, в результате чего были допущены существенные ошибки в определении величины их параллаксов [3]. Возможности метода существенно ограничены, поскольку астрометрическая точность очень быстро падает с увеличением расстояния до исследуемых объектов, и очевидные сложности возникают уже на этапе определения расстояний цефеид Большого и Малого Магеллановых Облаков (БМО и ММО). Кроме того, итоговое выражение «период–светимость» зависит от принятого значения нуль–пункта параллаксов [4], которое известно лишь приближенно.

Намного более точными являются расстояния, вычисленные для цефеид в рассеянных скоплениях методом группового параллакса. Однако существует лишь малая выборка цефеид, для которых удалось с уверенностью установить членство в скоплении. Недостаток объектов сказывается на итоговой точности калибровки зависимости «период–светимость», построенной при помощи метода группового параллакса.

Чуть менее известным в широких кругах является метод Бааде–Беккера–Весселинка [5, 6, 7], основная общепринятая модификация которого называется методом поверхностной яркости [8]. Метод Бааде–Беккера–Весселинка использует фотометрические и спектральные данные для вычисления параметров цефеид. Точность данного подхода в гораздо меньшей степени зависит от расстояния, чем точность тригонометрических параллаксов, что позволяет его ис-

*E-mail: yaroslav.lazovik@gmail.com

†E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

пользовать при исследовании внегалактических объектов. В настоящем исследовании мы также работаем в рамках метода Бааде–Беккера–Весселинка, однако мы предлагаем другую его модификацию, а именно метод максимального правдоподобия. Его основы были описаны в [9], наиболее свежая версия представлена в работе [10]. Особенностью нашего подхода является использование мультифазных температурных данных для вычисления главных характеристик цефеиды, а также параметров межзвездной среды. Данный метод был применен к 44 цефеидам Млечного пути, на основании чего нами была получена новая калибровка зависимости «период–светимость».

Структура настоящей работы следующая. В разделе 1 мы остановимся на теоретических основах метода максимального правдоподобия. В разделе 2 перечислены источники наблюдательных данных, используемых в исследовании, а также указаны алгоритмы их обработки. Результаты работы описаны в разделе 3. Обсуждение итоговых результатов приводится в разделе 4.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Основным уравнением метода максимального правдоподобия является следующее выражение для звездной величины цефеиды m , выведенное из закона Стефана–Больцмана:

$$m = Y - 5 \cdot \lg \frac{R}{R_{\odot}} + \Psi, \quad (1)$$

где постоянная Y определяется видимым модулем расстояния звезды $(m - M)_{app}$:

$$Y = (m - M)_{app} + M_{bol\odot} + 10 \cdot \lg T_{eff\odot}, \quad (2)$$

а Ψ является функцией эффективной температуры $\lg T_{eff}$ и болометрической поправки BC :

$$\Psi((B - V)_0) = BC + 10 \cdot \lg T_{eff}. \quad (3)$$

Суть подхода заключается в том, что логарифм эффективной температуры $\lg T_{eff}$, болометрическая поправка BC , а значит, и функция F могут быть представлены в виде степенного ряда по нормальному показателю цвета $(B - V)_0$. Постоянные коэффициенты этого ряда определяют калибровку, с которой мы работаем в настоящем исследовании.

$$BC = a_0 + \sum_{k=1}^{N_1} a_k (B - V)_0^k. \quad (4)$$

$$\lg T_{eff} = b_0 + \sum_{k=1}^{N_2} b_k (B - V)_0^k. \quad (5)$$

Для того чтобы из наблюдаемого показателя цвета $(B - V)$ получить нормальный $(B - V)_0$, нужно определить избыток цвета $E(B - V)$. Избыток цвета вычисляется путем минимизации отклонения между наблюдаемыми значениями эффективной температуры и модельной кривой, построенной по калибровке. В качестве калибровки $BC((B - V)_0)$ мы использовали выражение из исследования [11], калибровка $\lg T_{eff}((B - V)_0)$ построена на основе данных из работы [12], её итоговый вид указан в работе [13].

Изменение радиуса $\Delta R(\varphi)$ можно получить, интегрируя кривую лучевых скоростей с учетом проекционного фактора pf , определяющего отношение между скоростью пульсации цефеиды и лучевой скоростью:

$$\Delta R(\varphi) = -pf \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi} (V_r(\varphi) - V_{\gamma}) \frac{P}{2\pi} d\varphi, \quad (6)$$

где φ — фаза пульсации цефеиды, P — пульсационный период, V_{γ} — постоянная компонента лучевой скорости.

На сегодняшний день нет общего мнения по поводу того, считать ли проекционный фактор величиной, зависящей от периода, или же принять его равным постоянному значению. В настоящем исследовании мы используем выражение из работы [14]:

$$pf = 1.376 - 0.064 \cdot \lg P \quad (7)$$

Среднее значение радиуса R_0 можно оценить из основного уравнения Балона, которое связывает наблюдаемые характеристики цефеиды: звездную величину, показатель цвета, лучевую скорость:

$$m = c_0 + \sum_{k=1}^{N_3} c_k (B - V)^k - 5 \cdot \lg(R_0 + \Delta R(\varphi)), \quad (8)$$

Итак, единственным неизвестным в уравнении (1) остается видимый модуль расстояния $(m - M)_{app}$. Его мы находим, минимизируя отклонения между наблюдаемой кривой блеска и кривой блеска, полученной при помощи этой формулы. Последним шагом является вычисление абсолютного модуля расстояния $(m - M)_0$:

$$(m - M)_0 = (m - M)_{app} - A, \quad (9)$$

где величина межзвездного поглощения A определяется с использованием полученного ранее показателя цвета: $A_v = R_v \cdot E(B - V)$ (в настоящей работе $R_v = 3.3$)

Таким образом, данный алгоритм позволяет вычислить следующие параметры: избыток цвета, радиус, абсолютную звездную величину (болометрическую и в полосе V) цефеиды, и, наконец, её расстояние.

На рис. 1 показана фазовая кривая изменения эффективной температуры на примере цефеиды CD Sgr. Путем совмещения наблюдаемых значений с кривой, построенной по калибровке $\lg T_{eff}((B - V)_0)$, мы определяем величину избытка цвета $E(B - V)$. Аналогично, путем совмещения наблюдаемых значений блеска

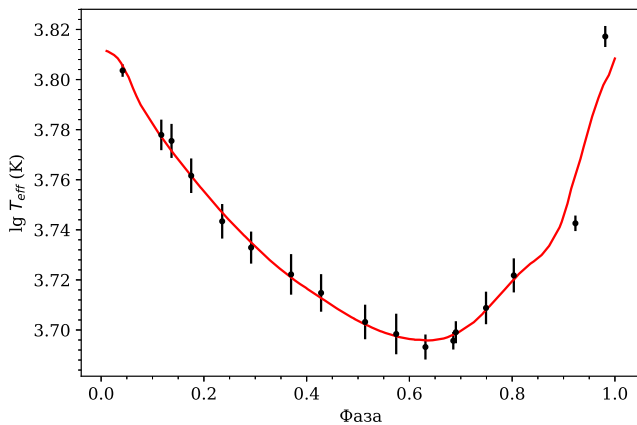


Рис. 1: Кривая изменения эффективной температуры цефеиды CD Sgr. Точки: наблюдаемые значения эффективной температуры. Красная линия: модельная кривая

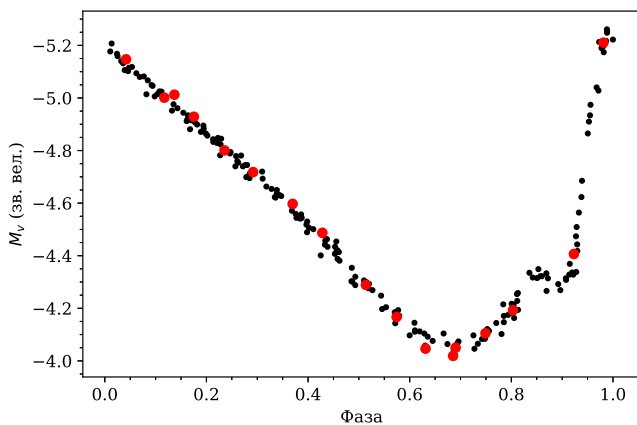


Рис. 2: Кривая блеска цефеиды CD Sgr. Красные точки: значения, вычисленные из уравнения (1). Черные точки: наблюдаемые значения, смещенные на величину видимого модуля расстояния

с модельной кривой, построенной по формуле (1) можно оценить видимый модуль расстояния $(m - M)_{app}$. Это продемонстрировано на рис. 2.

Метод максимального правдоподобия обладает преимуществами по сравнению с другими модификациями метода Бааде–Беккера–Весселинка. Во-первых, он позволяет получить независимые оценки избытка цвета $E(B - V)$. Во-вторых, все наблюдаемые характеристики, используемые в описанном выше алгоритме, относятся к схожему спектральному диапазону. Как известно, радиус звезды существенно зависит от того, на какой длине волны мы её наблюдаем. Использование в одном выражении фотометрических и спектральных данных, соответствующих разным диапазонам длин волн, неизбежно будет приводить к дополнительным неточностям, от которых наш метод застрахован. В-третьих, калибровки болометрической поправки и логарифма эффективной температуры имеют более

высокий порядок разложения, чем калибровки из метода поверхностной яркости, они учитывают влияние металличности и зависят от величины ускорения свободного падения на поверхности звезды.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В рамках настоящей работы были исследованы 44 цефеид Галактики. Мы работали с фотометрическими данными Бердникова [15], а также с лучевыми скоростями из каталога [16]. Использовались значения эффективных температур и показателей металличности из каталога [17].

Перед началом работы был произведен отбор данных. При достаточном количестве исходных наблюдений были исключены наиболее ранние наблюдения (проведенные до 1970–1975 гг.) во избежание систематических ошибок, связанных с эволюционным изменением периода пульсации. Для каждой цефеиды по кривой блеска и кривой лучевых скоростей были вычислены периоды, после чего были исключены ряды наблюдений, данные которых недостаточно хорошо согласуются с принятым периодом, а период был заново пересчитан.

В списке исследуемых цефеид есть объекты в кратных системах. С такими цефеидами была проведена дополнительная работа по исправлению наблюдательных данных. Во-первых, из кривой лучевых скоростей был вычтен вклад орбитального движения. Параметры орбиты подбирались для достижения минимального разброса остаточных значений лучевой скорости относительно усредненной кривой. Во-вторых, из кривой блеска и кривой показателя цвета был исключен вклад компоненты. Для этого мы обратились к данным о спектральных классах компонентов из статьи [18]. Зная спектральный класс, мы воспользовались модельными значениями блеска и цвета для звезд-карликов из работы [19]. Заметим, что в нашем списке цефеид есть не только двойные системы, но и системы с большим числом объектов. В настоящей работе был вычтен вклад предположительно самого яркого из компонентов.

Наиболее показательным является пример цефеиды AW Peg, для которой исправление данных привело к существенному улучшению согласованности между наблюдаемыми значениями эффективной температуры и модельной кривой (см. рис. 3).

Все исследуемые цефеиды были распределены по трем выборкам, в зависимости от предполагаемой точности вычисляемых параметров. В частности, номер выборки цефеиды определяли следующие показатели:

- Общее количество исходных данных и равномерность заполнения ими соответствующих фазовых кривых.
- Изменение итоговых параметров при исключении рядов фотометрических данных, соответствующую

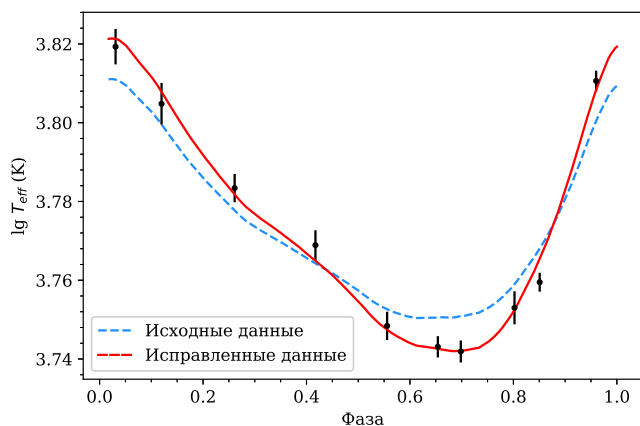


Рис. 3: Кривая изменения эффективной температуры цефеиды AW Reg. Точки: наблюдаемые значения эффективной температуры. Синяя пунктирная линия: модельная кривая, построенная с исходными значениями показателя цвета. Красная сплошная линия: модельная кривая, построенная с исправленными значениями показателя цвета

щих наиболее ранним наблюдениям цефеиды. Как правило, этот показатель определяет темпы изменения периода цефеиды.

- Разброс исходных данных относительно усредненных фазовых кривых.
- Близость эпох фотометрических и спектральных наблюдений, используемых в расчетах.
- (Для двойных цефеид) Изменение итоговых параметров цефеид при учете наличия компоненты и зависимость этих параметров от принятого спектрального класса компоненты.
- Положение цефеиды на полосе неустойчивости (на краю или по центру).
- Характер пульсации цефеиды (цефеида основного тона или обертоновая цефеида).

Первая выборка (23 цефеиды) содержит объекты с наиболее точными вычисленными параметрами. В основном, это цефеиды, у которых не заподозрено наличие спектральной компоненты, однако в эту выборку также включены те двойные цефеиды, у которых присутствие компоненты практически не влияет на итоговые характеристики. Вторая выборка (10 цефеид) содержит звезды с большими, чем у первой выборки, возможными ошибками. В третью выборку (11 цефеид) включены все оставшиеся цефеиды, для которых итоговая точность оказалась существенно ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Построение зависимости «период–радиус» позволяет выявить цефеиды, пульсирующие в первом обертоне:

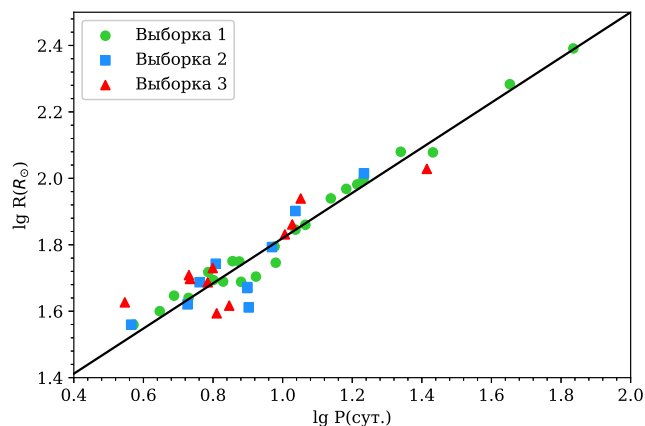


Рис. 4: Зависимость «период–радиус». Зеленые круги: цефеиды первой выборки. Синие квадраты: цефеиды второй выборки. Красные треугольники: цефеиды третьей выборки

они смещены относительно других цефеид в сторону меньших периодов. Выявлено 6 подобных объектов: DL Cas, DT Cyg, FF Aql, RS Ori, SU Cyg и Y Lac. Для получения фундаментального периода период пульсации этих цефеид был умножен на постоянный коэффициент, равный 1.4. Поскольку у нас нет дополнительных аргументов в пользу обертонового характера пульсации вышеперечисленных звезд, все заподозренные обертоновые цефеиды были включены в третью выборку объектов.

На рис. 4 изображена зависимость «период–радиус». Отметим, что для большинства объектов номер выборки определяет характерный разброс вычисленных значений радиуса относительно линейной аппроксимации.

Как известно, в моменты времени, соответствующие максимальному сжатию цефеиды, в её атмосфере распространяются ударные волны. Присутствие ударных волн нарушает условия локального термодинамического равновесия, приводит к перемешиванию вещества и понижает градиенты плотности, давления и температуры. Изменение условий в атмосфере приводит к тому, что меняется профиль распределения яркости по диску звезды. Это означает, что проекционный фактор в эти моменты уже не может считаться постоянной величиной. Очевидно, что и используемые калибровки температуры и болометрической поправки в момент прохождения и диссипации ударных волн не работают. Эффект присутствия ударных волн продемонстрирован на рис. 5. Наблюдаются расхождения между значениями радиуса, вычисленными из уравнения (8), и величинами, полученными путем интегрирования кривой лучевых скоростей.

Для повышения точности работы метода необходимо ограничить фазовый диапазон используемых данных. В ряде работ (например, в [20]) исключались наблюдения, соответствующие интервалу фаз [0.8; 1.0], но такое ограничение не было обосновано. Мы построили зависимости «период–светимость» для цефеид пер-

Таблица 1: Итоговые параметры цефеид

Название	Выборка	Фунд.период	$E(B - V)$	\bar{R}	\bar{M}_v	$(m - M)_0$
		(сут.)	(зв. вел.)	(R_\odot)	(зв. вел.)	(зв. вел.)
AW Per	3	6.463	0.59 ± 0.01	39.2 ± 2.1	-3.34 ± 0.12	8.96 ± 0.17
BB Her	1	7.508	0.41 ± 0.02	56.2 ± 3.0	-3.85 ± 0.06	12.60 ± 0.06
BG Lac	2	5.332	0.29 ± 0.01	41.8 ± 2.1	-3.24 ± 0.07	11.18 ± 0.09
CD Cyg	1	17.074	0.59 ± 0.01	99.2 ± 2.0	-4.85 ± 0.04	11.87 ± 0.13
CF Cas	1	4.875	0.54 ± 0.02	44.3 ± 1.2	-3.34 ± 0.04	12.71 ± 0.12
CV Mon	3	5.379	0.69 ± 0.02	51.1 ± 2.7	-3.77 ± 0.12	11.79 ± 0.12
Delta Cep	1	5.366	0.09 ± 0.02	43.7 ± 2.3	-3.51 ± 0.06	7.17 ± 0.06
DL Cas	3	11.268	0.65 ± 0.02	87.0 ± 4.8	-4.82 ± 0.12	11.70 ± 0.18
DT Cyg	3	3.520	0.04 ± 0.01	42.3 ± 4.7	-3.63 ± 0.15	9.28 ± 0.15
Eta Aql	1	7.177	0.16 ± 0.01	56.3 ± 2.5	-3.92 ± 0.06	7.29 ± 0.07
FF Aql	3	6.297	0.27 ± 0.01	53.7 ± 7.6	-4.16 ± 0.18	8.64 ± 0.17
FM Aql	1	6.114	0.69 ± 0.02	52.2 ± 1.7	-3.79 ± 0.05	9.80 ± 0.15
FN Aql	1	9.482	0.48 ± 0.02	62.3 ± 1.4	-3.87 ± 0.04	10.67 ± 0.11
RS Ori	3	10.658	0.37 ± 0.01	72.7 ± 4.2	-4.60 ± 0.12	11.78 ± 0.14
RT Aur	1	3.728	0.06 ± 0.01	36.3 ± 1.6	-3.19 ± 0.06	8.44 ± 0.06
RX Aur	1	11.624	0.34 ± 0.01	72.5 ± 2.4	-4.50 ± 0.05	11.03 ± 0.09
RX Cam	2	7.912	0.55 ± 0.01	46.8 ± 2.7	-3.52 ± 0.08	9.39 ± 0.14
S Sge	1	8.382	0.17 ± 0.01	50.6 ± 1.2	-3.68 ± 0.04	8.74 ± 0.05
S Vul	1	68.438	1.15 ± 0.03	246.0 ± 8.1	-6.89 ± 0.08	12.06 ± 0.25
SS Sct	2	3.671	0.38 ± 0.03	36.3 ± 0.9	-3.13 ± 0.08	10.08 ± 0.11
SU Cyg	3	5.417	0.10 ± 0.02	49.8 ± 5.8	-3.98 ± 0.16	10.55 ± 0.16
SV Mon	1	15.235	0.29 ± 0.02	93.0 ± 1.7	-4.63 ± 0.06	11.93 ± 0.08
SV Vul	1	44.969	0.62 ± 0.03	192.0 ± 3.3	-6.08 ± 0.06	11.24 ± 0.14
T Mon	1	27.033	0.30 ± 0.05	119.7 ± 1.8	-4.95 ± 0.05	10.09 ± 0.08
T Vul	1	4.435	0.07 ± 0.02	39.8 ± 1.5	-3.33 ± 0.05	8.88 ± 0.05
TT Aql	1	13.755	0.59 ± 0.02	87.0 ± 1.9	-4.58 ± 0.06	9.77 ± 0.14
U Aql	3	7.024	0.44 ± 0.02	41.4 ± 1.7	-3.36 ± 0.14	8.33 ± 0.17
U Sgr	1	6.745	0.46 ± 0.01	48.9 ± 2.2	-3.62 ± 0.06	8.81 ± 0.11
U Vul	2	7.990	0.72 ± 0.02	40.9 ± 1.2	-3.35 ± 0.05	8.10 ± 0.15
V500 Sco	2	9.317	0.62 ± 0.03	62.1 ± 3.9	-4.05 ± 0.11	10.75 ± 0.17
VX Per	2	10.885	0.53 ± 0.02	79.7 ± 3.2	-4.60 ± 0.07	12.14 ± 0.13
W Gem	2	7.914	0.30 ± 0.03	47.1 ± 1.6	-3.60 ± 0.08	9.56 ± 0.10
W Sgr	1	7.595	0.13 ± 0.01	48.8 ± 1.5	-3.66 ± 0.06	7.92 ± 0.06
WZ Sgr	1	21.850	0.59 ± 0.03	120.2 ± 2.1	-5.03 ± 0.06	11.12 ± 0.14
X Cyg	1	16.386	0.35 ± 0.02	95.9 ± 2.5	-4.59 ± 0.07	9.84 ± 0.10
X Pup	3	25.965	0.53 ± 0.03	106.8 ± 2.8	-5.14 ± 0.12	11.93 ± 0.16
X Vul	1	6.320	0.85 ± 0.02	49.4 ± 2.0	-3.71 ± 0.05	9.73 ± 0.18
XX Sgr	2	6.424	0.58 ± 0.02	55.3 ± 2.7	-4.07 ± 0.07	11.02 ± 0.14
Y Lac	3	6.090	0.15 ± 0.02	48.7 ± 2.3	-3.77 ± 0.11	12.42 ± 0.12
Y Oph	2	17.128	0.78 ± 0.01	103.5 ± 3.0	-5.29 ± 0.06	8.87 ± 0.17
Y Sgr	2	5.773	0.23 ± 0.02	48.7 ± 1.1	-3.66 ± 0.04	8.62 ± 0.06
YZ Sgr	1	9.554	0.36 ± 0.01	55.7 ± 1.5	-3.81 ± 0.04	9.97 ± 0.08
Z Lac	1	10.886	0.49 ± 0.02	70.1 ± 1.1	-4.29 ± 0.06	11.10 ± 0.12
Zet Gem	3	10.150	0.07 ± 0.01	67.8 ± 3.3	-4.08 ± 0.12	7.71 ± 0.12

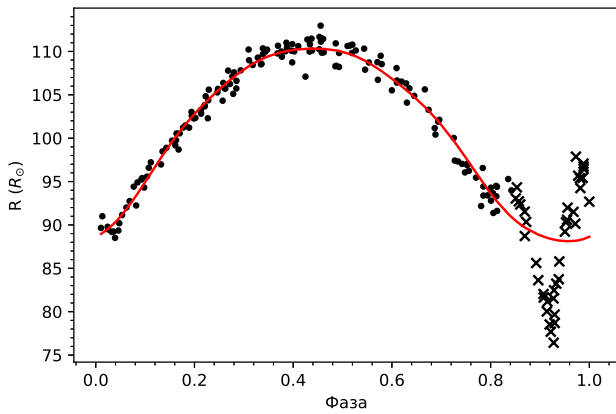


Рис. 5: Пульсационная кривая цефеиды CD Sgr. Точки и кресты: значения, вычисленные из уравнения (8). Точки принадлежат фазовому интервалу [0.00; 0.85], кресты принадлежат фазовому интервалу [0.85; 1.00]. Красная линия построена в результате интегрирования кривой лучевых скоростей

вой выборки с набором ограничений (верхних границ используемого интервала фаз) от 0.80 до 1.00 с шагом 0.01 для того, чтобы определить, при каком ограничении минимален разброс цефеид относительно линейной аппроксимации. Оптимальным оказался следующий диапазон используемого интервала фаз: [0.00; 0.85] (см. рис. 6)

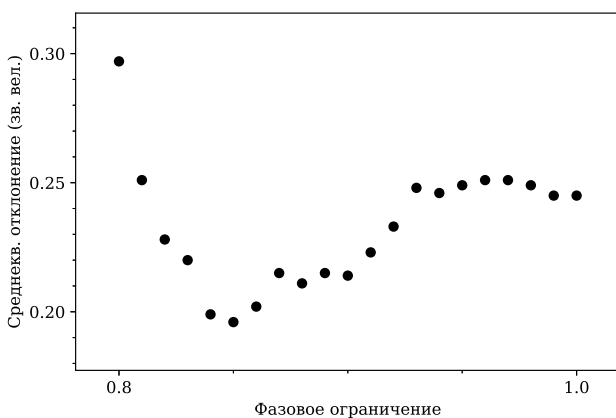


Рис. 6: Зависимость среднеквадратичного отклонения цефеид первой выборки относительно линейной аппроксимации зависимости «период–светимость» от верхней границы используемого интервала фаз

Отклонения цефеид третьей выборки относительно итоговой зависимости оказались существенно выше, чем у оставшихся объектов. В связи с этим было решено рекомендовать зависимости, полученные для комбинации из первых двух выборок. Итоговые выражения для зависимостей «период–радиус» и «период–светимость» при оптимальном ограничении имеют следующий вид: $lg R = (0.68 \pm 0.03) \cdot lg P + (1.14 \pm 0.03)$; $M_v = -(2.67 \pm 0.16) \cdot (lg P - 1) - (4.14 \pm 0.05)$. За-

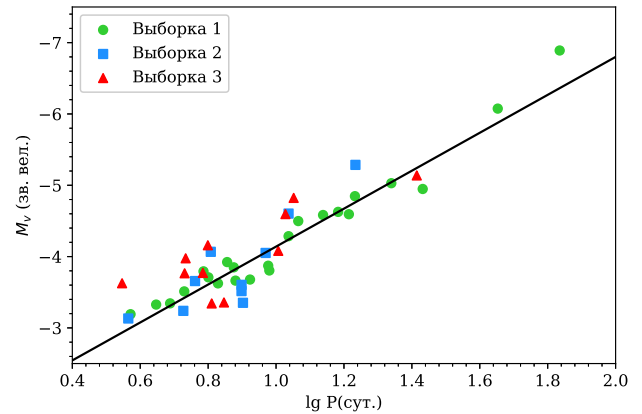


Рис. 7: Зависимость «период–светимость». Обозначения те же, что на рис. 4

висимость «период–светимость» изображена на рис. 7. Итоговые параметры цефеид указаны в табл. 1.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученная нами зависимость «период–радиус» хорошо согласуется с результатами других работ, как теоретических [22, 23], так и связанных с обработкой наблюдательных данных [24, 25]. Сравнение итоговых зависимостей приведено в табл. 2. Отметим наличие зависимостей с большим значением угла наклона. Одной из причин подобных расхождений может быть проекционный фактор. В работах, где указывается на большее значение угла наклона, использовались значения проекционного фактора из других источников, в то время как исследования [24] и [25], в результате которых получились выражения, схожие с нашими результатами, включали в себя алгоритмы для независимой оценки проекционного фактора.

Выражения для зависимости «период–светимость», взятые из разных источников, сильно отличаются (см. табл. 3). Одной из характерных особенностей является малое значение угла наклона зависимостей, полученных при помощи метода тригонометрического параллакса [4, 30]. В диапазоне малых периодов пульсаций вычисленная нами калибровка хорошо согласуется с результатами астрометрических исследований. С увеличением периода расхождения возрастают, при этом наша зависимость предполагает существование более ярких цефеид при заданном периоде пульсаций. Вероятно, имеет место эффект селекции. Возможности метода тригонометрического параллакса неуклонно падают при увеличении расстояния до исследуемых звезд. Среди наблюдаемых далеких цефеид преобладают объекты с большими периодами пульсаций (поскольку такие объекты ярче, их легче наблюдать). Таким образом, астрометрические расстояния для долгопериодических цефеид в среднем менее точны.

Таблица 2: Выражения для зависимости «период–радиус» в виде $lg(R) = a_r \cdot lg(P) + b_r$

Источник	a_r	b_r
Сачков и др. (1998) [21]	0.62 ± 0.03	1.23 ± 0.03
Боно и др. (1998) [22]	0.655 ± 0.006	1.188 ± 0.008
Петрони и др. (2003) [23]	0.676 ± 0.006	1.173 ± 0.008
Настоящая работа	0.68 ± 0.03	1.14 ± 0.03
Галлен и др. (2017) [24]	0.684 ± 0.007	1.135 ± 0.002
Гроеневаген (2007) [25]	0.686 ± 0.036	1.134 ± 0.034
Тернер и Бурке (2002) [26]	0.747 ± 0.028	1.071 ± 0.025
Молинаро и др. (2011) [27]	0.75 ± 0.03	1.10 ± 0.03
Кервелла и др. (2004) [28]	0.767 ± 0.009	1.091 ± 0.011
Сторм и др. (2004) [29]	0.77 ± 0.02	1.05 ± 0.03

Таблица 3: Выражения для зависимости «период–светимость» в виде $M_v = a_v \cdot (lg(P) - 1) + b_v$

Источник	a_r	b_r	Метод
Гроеневаген (2018) [4]	-2.243 ± 0.137	-4.083 ± 0.118	Тригонометрический параллакс
Бенедикт и др. (2007) [30]	-2.43 ± 0.12	-4.05 ± 0.02	Тригонометрический параллакс
Настоящая работа	-2.67 ± 0.16	-4.14 ± 0.05	Метод макс. правдоподобия
Сторм и др. (2011) [20]	-2.67 ± 0.10	-3.96 ± 0.03	Метод поверхностной яркости
Фуке и др. (2007) [31]	-2.678 ± 0.076	-3.953 ± 0.023	Метод поверхностной яркости
Гирен и др. (2018) [32]	-2.690 ± 0.100	-3.981 ± 0.033	Метод поверхностной яркости
Кервелла и др. (2004) [28]	-2.769 ± 0.073	-4.209 ± 0.075	Метод поверхностной яркости
Молинаро и др. (2011) [27]	-2.78 ± 0.11	-4.20 ± 0.11	CORS
Тернер (2010) [33]	-2.78 ± 0.12	-4.07 ± 0.10	Цефеиды в скоплениях
Андерсон и др. (2013) [34]	-2.88 ± 0.18	-3.90 ± 0.16	Цефеиды в скоплениях

Нуль–пункт полученной нами зависимости «период–светимость» по модулю выше, чем у большинства зависимостей из литературы. Данный результат имеет существенное космологическое значение. Обратим внимание на зависимость из работы Бенедикта [30], полученную при помощи астрометрических данных телескопа Хаббл. Эта зависимость использовалась при оценке постоянной Хаббла в ближней Вселенной, которая в итоге получилась равной $H_0 = 74$ (км/с)/мпк [35]. Предположим, что все цефеиды оказались ярче на величину разности нуль–пунктов зависимости из настоящей работы и зависимости из работы Бенедикта ($\Delta M = -0.09$ зв. вел.). Большая яркость цефеид по сути означает увеличение их модулей расстояния, в результате чего значение постоянной Хаббла уменьшится до $H_0 = 71$ (км/с)/мпк. Безусловно, наше допущение относительно большей яркости всех цефеид является упрощением и не реализуется в действительности. Однако такое допущение помогает понять главное: использование вычисленной нами зависимости «период–светимость» приведет к меньшему значению локальной постоянной Хаббла.

Необходимы дальнейшие исследования для более детального изучения данного вопроса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цефеиды являются одними из главных «стандартных свечей», с помощью которых устанавливается шкала расстояний во Вселенной. Впервые были продемонстрированы на практике возможности нового метода максимального правдоподобия, использующего спектроскопические измерения эффективных температур цефеид в разных фазах пульсаций. Вычислены расстояния до 44 цефеид Млечного Пути, проведена калибровка зависимости «период–светимость». В диапазоне малых периодов пульсаций итоговая калибровка хорошо согласуется с результатами, полученными астрометрическими исследованиями. В диапазоне долгопериодических цефеид наблюдаются расхождения. Использование уточненной нами зависимости «период–светимость» в среднем приводит к большим расстояниям по сравнению с теми зависимостями, что были получены в результате работы астрометрических миссий.

Существует уверенность, что возможности метода максимального правдоподобия не ограничиваются тем, что описано в настоящей работе (а также в работе [36], где проведен более подробный анализ итоговых результатов). При расширении выборки цефеид и повышении качества и объема фотометрических и спектроскопических данных есть возможность выйти на более высокий уровень точности, позволяющий использовать различные модели проекционного фактора, в том числе и те модели, в которых проекционный фактор меняется в зависимости от фазы. Наш подход позволяет осуществлять проверку данных, полученных миссией Gaia, на значительной выборке объектов. В дальней-

шей перспективе — аналогичная работа с пульсирующими звездами других типов, с цефеидами Большого и Малого Магеллановых Облаков. Таким образом, есть основания полагать, что метод максимального правдоподобия в будущем может стать одним из основных в контексте построения шкалы расстояний.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 18-02-00890 и 19-02-00611).

-
- [1] *Leavitt H. S., Pickering E. C.* // Harvard College Observatory Circular 1912. **173**. P. 1.
- [2] *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A.* et al. // A&A. 2018. **616**. A1.
- [3] *Ziegler C., Law N. M., Baranec C.* et al. // AJ 2018. **156**. P. 259.
- [4] *Groenewegen M. A. T.* // A&A. 2018. **619**. A8.
- [5] *Baade W.* // AN. 1926. **228**. P. 359.
- [6] *Becker W.* // ZA. 1940. **19**. P. 289.
- [7] *Wesselink A. J.* // BAN. 1946. **10**. P. 91.
- [8] *Barnes T. G., Evans D. S.* // MNRAS. 1976. **174**. P. 489.
- [9] *Balona L. A.* // MNRAS. 1976. **178**. P. 231.
- [10] *Rastorguev A. S., Dambis A. K.* // AB. 2011. **66**. P. 47.
- [11] *Flower P. J.* // ApJ. 1996. **469**. P. 355.
- [12] *Bessell M. S., Castelli, F., Plez B.* // A&A. 1998. **333**. P. 231.
- [13] *Rastorguev A. S., Lazovik Y. A., Zabolotskikh M. V., Berdnikov L. N., Gorynya N. A.* // arXiv e-prints, arXiv:1911.10413. 2019.
- [14] *Nardetto N., Mourard D., Mathias Ph., Fokin A., Gillet D.* // A&A. 2007. **471**. P. 661
- [15] *Berdnikov L. N.* // VizieR Online Data Catalog. 2008. II/285.
- [16] *Gorynya N. A., Samus N. N., Sachkov M. E.* et al. // VizieR Online Data Catalog. 2002. III/229.
- [17] *Luck R. E.* // AJ. 2018. **156**. P. 171.
- [18] *Evans N. E., Bond H. E., Schaefer G. H.* et al. AJ. 2013. **146**. P. 93.
- [19] *Pecaut M. J., Mamajek E. E.* // ApJS. 2013. **208**. P. 9.
- [20] *Storm J., Gieren W., Fouque P.* et al. // A&A. 2011. **534**. A94.
- [21] *Sachkov M. E., Rastorguev A. S., Samus N. N., Gorynya N. A.* // Astron. Lett. 1998. **24**. P. 377.
- [22] *Bono G., Caputo F., Marconi M.* // ApJL. 1998. **497**. L43.
- [23] *Petroni S., Bono G., Marconi M., Stellingwerf R. F.* // ApJ. 2003. **599**. P. 522.
- [24] *Gallenne A., Kervella P., M ?erand, A.* et al. // A&A. 2017. **608**. A18.
- [25] *Groenewegen M. A. T.* // A&A. 2007. **474**. P. 975.
- [26] *Turner D. G., Burke J. F.* // AJ. 2002. **124**. P. 2931.
- [27] *Molinaro R., Ripepi V., Marconi M.* et al. // MNRAS. 2011. **413**. P. 942.
- [28] *Kervella P., Bersier D., Mourard D., Nardetto N., Coudé du Foresto, V.* // A&A. 2004. **423**. P. 327.
- [29] *Storm J., Carney B. W., Gieren W. P.* et al. // A&A. 2004. **415**. P. 531.
- [30] *Benedict G. F., McArthur B. E., Feast M. W.* et al. // AJ. 2007. **133**. P. 1810.
- [31] *Fouque P., Arriagada P., Storm J.* et al. // A&A. 2007. **476**. P. 73.
- [32] *Gieren W., Storm J., Konorski P.,* et al. // A&A. 2018. **620**. A99.
- [33] *Turner D. G.* // Ap&SS. 2010. **326**. P. 219.
- [34] *Anderson, R. I., Eyer, L., Mowlavi, N.* // MNRAS. 2013. **434**. P. 2238.
- [35] *Riess A. G., Casertano S., Yuan W., Macri L. M., Scolnic D.* // ApJ. 2019. **876**. P. 85.
- [36] *Lazovik Y. A., Rastorguev A. S.* // AJ. 2020. **160**, N3. P. 136.

Calibrating the Galactic Classical Cepheid period-luminosity relation based on photometric and spectroscopic data

Y. A. Lazovik^{1,2,a}, A. S. Rastorguev^{1,2,b}

¹Department of astrophysics and stellar astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

²Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University. Moscow 119191, Russia
E-mail: ^ayaroslav.lazovik@gmail.com, ^balex.rastorguev@gmail.com

We present a realization of the maximum-likelihood technique, which is one of the latest modifications of the Baade–Becker–Wesselink method. It allows one to estimate the key Cepheid parameters, the distance modulus, and the interstellar reddening,

combining photometric and spectroscopic data (including the effective temperature data). This method is applied to the sample of 44 Galactic Cepheids, for which multiphase temperature measurements are available. The additional data correction is performed to subtract the impact of the component in binary/multiple systems. We also study the effect of shock waves, whose presence in the stellar atmosphere distorts the observational data and leads to systematic errors in the obtained parameters. As a result, we obtain the following period-luminosity relation: $M_v = -(2.67 \pm 0.16) \cdot (\log P - 1) - (4.14 \pm 0.05)$. Despite the fact that the final calibration is in reasonable agreement with the relations calculated using trigonometric parallaxes, a slight zero-point offset is found, indicating the brighter Cepheids and therefore the longer distance scale. Thus, the Hubble constant estimate based on our period-luminosity relation has to be lower.

PACS: 97.30.Gj, 97.10.Vm, 97.10.Ri, 97.10.Pg.

Keywords: stars, variables, Cepheids, distance, luminosity, distance scale.

Received 28 September 2020.

Сведения об авторах

1. Лазовик Ярослав Александрович — аспирант; e-mail: yaroslav.lazovik@gmail.com.
2. Расторгуев Алексей Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: alex.rastorguev@gmail.com.