

УДК 524.333:[521.31+52-332]

ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, РАДИУС И КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНОЙ ЦЕФЕИДЫ TX DEL ПО ДАННЫМ GAIA DR3

© 2025 А. С. Расторгуев^{1,2*}, М. В. Заболотских², Н. Н. Самусь^{3,2}, Н. А. Горыня^{3,2}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия³Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2025 года; после доработки 26 февраля 2025 года; принята к публикации 3 марта 2025 года

Проведена ревизия орбитальных параметров спектрально-двойной цефеиды TX Del, часто относимой к подклассу VL Her переменных T2. Пульсационный радиус определен по двум рядам фотометрических наблюдений, в том числе Gaia DR3: $\langle R \rangle \approx 22.4 \pm 0.8 R_{\odot}$ для полос B, V и $\langle R \rangle \approx 20.6 \pm 0.6 R_{\odot}$ для полос BP, RP соответственно. Амплитуда изменений радиуса составляет около $2 R_{\odot}$. Новые оценки радиуса существенно меньше прежних, заключенных в интервале от $37 R_{\odot}$ до $60 R_{\odot}$. По байесовскому расстоянию $\langle D \rangle \approx 1064 \pm 25$ пк оценены абсолютные величины TX Del, составляющие соответственно $\langle M_V \rangle_I \approx -1^m31 \pm 0^m04$ и $\langle M_G \rangle_I \approx -1^m40 \pm 0^m03$. Абсолютная величина и средний радиус TX Del прекрасно согласуются с предсказаниями зависимостей «период – светимость» и «период – радиус» для цефеид T2 с периодом $P_{\text{pls}} \approx 6^d1662$; TX Del примерно на 2^m2 слабее классических цефеид с тем же периодом. Показано, что для углов наклона плоскости орбиты $20^\circ < i < 30^\circ - 35^\circ$ спутник может быть массивнее главного компонента, что приводит к эволюционному сценарию с обменом масс. Современная степень заполнения сферы Роша составляет 37–55%. Рассчитанная на основе астрометрических данных Gaia DR3 и лучевой скорости орбита двойной системы TX Del ограничена тором $|z| < 0.42$ кпк с внутренним и внешним радиусами, равными соответственно 7.2 и 8.3 кпк, в то время как вертикальная скорость $|V_z| \leq 38$ км с⁻¹; период галактовертикальных колебаний составляет около 77 млн лет. Тангенциальная скорость составляет 220–255 км с⁻¹. Высокая металличность и кинематические характеристики позволяют отнести TX Del к населению старого диска Галактики с вертикальной шкалой $H_z \approx 0.3$ кпк или толстого диска с $H_z \approx 0.85$ кпк. В то же время по пульсационным характеристикам (периоду, светимости и положению в полосе неустойчивости) TX Del близка к цефеидам сферической составляющей с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ (в том числе цефеидам шаровых скоплений), находящимся на стадии эволюции после горизонтальной ветви. Для окончательного прояснения эволюционного статуса таких переменных требуются дополнительные эволюционные и пульсационные расчеты в более широком диапазоне периодов и светимостей.

Ключевые слова: *звезды: двойные (включая кратные): тесные — звезды: эволюция — звезды: фундаментальные параметры — звезды: отдельные: TX Del — звезды: переменные: цефеиды*

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектрально-двойные цефеиды представляют собой природную лабораторию для изучения физических свойств звезд и их двойственности. Ряды многоцветных фотометрических измерений и спектроскопических оценок лучевых скоростей позволяют разделить вклады орбитального движения и пульсаций в лучевую скорость, определить параметры относительной орбиты цефеиды и спутника, найти нижнюю оценку массы спутника, оценить

радиус и светимость цефеиды и прояснить эволюционный статус. Прецизионные астрометрические данные, полученные миссией Gaia (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2018, 2021; Gaia Collab., 2022; Vallenari et al., 2023), служат хорошей основой для дополнительного определения свойств галактической орбиты двойной системы. Данная работа, посвященная цефеиде TX Del, продолжает наши исследования спектрально-двойных цефеид (Rastorguev et al., 2024a; b) на основе оригинальных рядов лучевых скоростей, полученных ранее (Gorunya et al., 1992; 1996; 1998) и в данной работе

*E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

с помощью корреляционного спектрографа — Измерителя лучевых скоростей (ИЛС) конструкции А. А. Токовинина (Tokovinin, 1987), с привлечением как имеющихся старых фотометрических наблюдений, так и фотометрических и астрометрических измерений Gaia DR3.

Переменность блеска TX Del (BD +03° 4437, HIP 102853, Gaia DR3 1734124248699204096) была открыта Hoffmeister (1935), который отнес ее к короткопериодическим переменным. Guthnick and Prager (1936), изучив ее фотометрическое поведение, определили пульсационный период и форму кривой блеска и отнесли к типу классических цефеид. В рамках масштабного фотометрического изучения 184 цефеид в двух цветовых полосах Walraven et al. (1958) отметили возможную принадлежность TX Del к цефеидам II типа (T2), а Petit (1960), исходя из положения в Галактике, с определенностью отнес ее к населению T2. TX Del была включена в каталог цефеид II типа Haggis (1985). Bohm-Vitense and Proffitt (1985) с помощью космической обсерватории IUE в спектральном диапазоне 100–200 нм провели поиск горячих спутников 21 спектрально-двойной цефеиды, в том числе TX Del. Видимый спутник обнаружен не был, но по уровню потоков в УФ-диапазоне были приведены верхние пределы его температуры и массы: $T_{\text{eff}} < 8200\text{--}8500$ К, $M < 2.1\text{--}2.2 M_{\odot}$. Harris and Welch (1988) сообщили об обнаружении спектральной двойственности TX Del, а позднее по лучевым скоростям рассчитали параметры орбиты TX Del и оценили орбитальный период в 133 дня (Harris and Welch, 1989).

TX Del, вторая после AU Peg спектрально-двойная цефеида по величине орбитального периода, обычно классифицируемая как цефеида сферической составляющей (T2) подтипа VL Her, обладает не совсем типичными свойствами для звезд этого класса. Во-первых, химический состав характерен скорее для звезд тонкого или старого диска. Во-вторых, Vinko et al. (1998) отметили, что оценки ее радиуса слишком велики для цефеид T2 (Balona (1977) оценил его в $R \approx 38.8 R_{\odot}$; Laney (1995) по ИК-фотометрии ($K, J-K$) — $R \approx 47.6 \pm 5.4 R_{\odot}$; Balog et al. (1997) — $R \approx 43 \pm 7 R_{\odot}$). Заметим также, что в работе Arellano Ferro and Rosenzweig (2000) выведено значение радиуса $R \approx 35.6 \pm 2.8 R_{\odot}$ и приведен ряд оценок других авторов в интервале $R \approx 42.0\text{--}59.7 R_{\odot}$. Очевидно, что столь большие радиусы характерны скорее для классических цефеид. Haggis and Welch (1989) отметили, что радиус цефеиды T2 с периодом около шести суток должен составлять примерно $16 R_{\odot}$. Galazutdinov (1995) по спектральным характеристикам отнес звезду к классическим цефеидам, и Andrievsky

et al. (2002) также не исключил возможность того, что TX Del — пульсирующая в первом оберitone классическая цефеида. В-третьих, кинематика TX Del, судя по сравнительно небольшой гелиоцентрической скорости, вычисленной на основе данных каталога Gaia DR2, скорее соответствует старому диску (Wallerstein and Farrell, 2018).

Целью настоящей работы является ревизия данных о параметрах орбиты, радиусе, светимости, кинематике и эволюционном статусе TX Del на основе собственных измерений лучевых скоростей и широкого использования астрометрических и фотометрических данных миссии Gaia.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Фотометрическая переменность TX Del изучалась неоднократно. Ее пульсационный период составляет около $P_{\text{pls}} \approx 6^{\text{d}}.166$ и показывает небольшое эволюционное уменьшение (Percy and Hoss, 2000), однако на интервале дат JD 2436000–2448000, как видно из рис. 2 из цитируемой работы, он практически не меняется. Примерное постоянство периода отмечено также Szabados (1991). Наблюдения ASAS-SN (Hart et al., 2023) в интервале дат JD 2457100–2458400 хорошо описываются периодом $P_{\text{pls}} \approx 6^{\text{d}}.166 \pm 0^{\text{d}}.001$. Для последующего определения пульсационного радиуса TX Del мы использовали фотометрические наблюдения в полосах B, V , проведенные Dean et al. (1977), Szabados (1980, 1991), Moffett and Barnes (1984), Diethelm (1986), Berdnikov and Vozyakova (1995) на интервале JD 2441882–2449634, в общей сложности 90 измерений. Кроме того, мы использовали 69 измерений блеска в полосах BP, RP , выполненных в интервале JD 2456958–2457887 (Gaia Collab., 2022). Для определения параметров орбиты и последующего вычисления пульсационных радиусов мы использовали наши опубликованные измерения (Goryunov et al., 1992; 1996; 1998), выполненные на интервале времени JD 2447738–2450285, к которым были добавлены пять новых измерений, проведенных в JD 2455504–2456543 (таблица 1); в общей сложности массив включает 152 равнооточных измерения в однородной системе. Краткое описание рядов фотометрических и спектральных измерений дано в таблице 2.

Строго говоря, для вывода надежных оценок пульсационных радиусов требуется квазиодновременность фотометрических и спектральных наблюдений (как показали Sachkov et al. (1998), расхождение фаз между рядами фотометрических и спектральных измерений, вызванное, например,

Таблица 1. Новые измерения лучевой скорости TX Del

JD, 2400000+	V_r , км с ⁻¹	σ_{V_r} , км с ⁻¹
55504.277	31.98	0.29
55809.422	-2.89	0.39
55810.429	-3.44	0.28
55811.431	3.02	0.29
56543.446	4.93	0.82

эволюционным изменением периода, может внести весьма значительные систематические ошибки в рассчитанные радиусы цефеид). Как видно из описания использованных наблюдательных данных, оба ряда фотометрических наблюдений и ряд лучевых скоростей не являются квазисовременными, но анализ рядов наблюдений показал, что все они, в том числе ряд наблюдений ASAS-SN, хорошо описываются единым значением пульсационного периода $P_{pls} \approx 6^d.1662$, что свидетельствует о пренебрежимо малой эволюционной изменемости периода на протяжении почти 16 000 суток (около 44 лет, или 2595 циклов пульсаций). Следовательно, можно надеяться, что систематический сдвиг фаз между фотометрическими и спектральными рядами незначителен и не привел к большим систематическим ошибкам определения радиуса. На рис. 1 хорошо видно, что фазы минимального и максимального блеска в разделенных довольно большим интервалом времени наблюдениях в полосах B , V и RP , BP практически совпадают, что позволяет описывать эти ряды, как и ряды измерений лучевой скорости, единым значением периода $P_{pls} = 6^d.1662$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Параметры орбиты TX Del

Определение параметров орбиты основывается на хорошо известном описании движения компонентов двойной системы вокруг центра масс по относительным эллиптическим орбитам. Пульсационный вклад в лучевые скорости представляется тригонометрическим полиномом

$$V_{pls}(i) = \sum_{k=1}^N \left[A_k \sin \left(2\pi k \frac{t_i - t_0}{P_{pls}} \right) + B_k \cos \left(2\pi k \frac{t_i - t_0}{P_{pls}} \right) \right], \quad (1)$$

где A_k , B_k — амплитуды гармоник, P_{pls} — период пульсаций, t_i — момент времени наблюдений, t_0 —

Таблица 2. Источники фотометрических и спектральных данных цефеиды TX Del. Приведены число наблюдений N , интервалы юлианских дат и ссылки на литературные источники

Вид данных	N	JD, 2400000+	Источник данных
V , $B - V$	90	41882–49634	[2, 3, 4, 9, 10, 11]
RP , $BP - RP$	69	56958–57887	[5]
Лучевые скорости	152	47738–50285	[6, 7, 8]
	5	55504–56543	[1]

[1] — таблица 1 в данной работе, [2] — Berdnikov and Vozyakova (1995), [3] — Dean et al. (1977), [4] — Diethelm (1986), [5] — Gaia Collab. (2022), [6] — Gorynya et al. (1992), [7] — Gorynya et al. (1996), [8] — Gorynya et al. (1998), [9] — Moffett and Barnes (1984), [10] — Szabados (1980), [11] — Szabados (1991).

момент времени, для удобства визуального представления пульсационной кривой лучевых скоростей выбран так, чтобы в фазе $\Phi_{pls} = 0$ пульсационная скорость $V_{pls} = 0$. Коэффициенты разложения пульсационного вклада приводятся в таблице 3. Детали алгоритма и использованные приемы расчетов подробно описаны в работе Rastorguev et al. (2024b).

Результаты вычислений параметров орбиты и их ошибок приведены в таблице 4: T_0 — момент прохождения перицентра орбиты; P_{orb} — найденное значение орбитального периода; e — эксцентриситет орбиты; Ω — долгота восходящего узла; K — амплитуда изменения орбитальной лучевой скорости; V_γ — лучевая скорость центра масс системы; $f(M)$ — функция масс; $a_1 \sin i$ — проекция большой полуоси орбиты главного компонента на луч зрения. Отметим, что T_0 и Ω плохо определены из-за нулевого эксцентриситета орбиты, но это не играет роли в последующих вычислениях. В последней строке таблицы приводится среднеквадратическое отклонение RMS от общего решения.

Декомпозиция лучевой скорости на вклады орбитального движения и пульсаций, а также кривая изменения скорости пульсаций фотосферы (в качестве примера для значения проекционного фактора $PF = 1.30$) и кривая изменений радиуса $\Delta R(t)/R_\odot$, вычисленных путем интегрирования кривой скорости пульсаций фотосферы dR/dt , показаны на рис. 2.

3.2. Пульсационный радиус и светимость TX Del

В работе Rastorguev et al. (2024b) для определения пульсационного радиуса цефеиды V350 Sgr

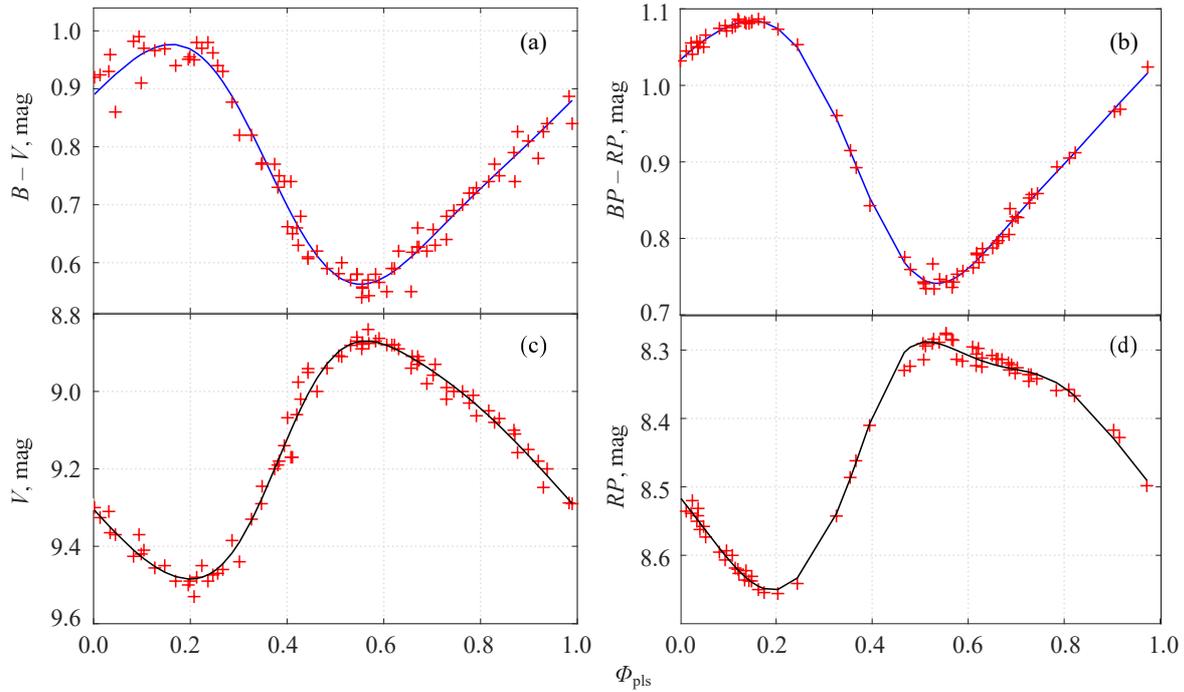


Рис. 1. Кривые блеска и изменения показателей цвета TX Del. На панелях (a), (c) — для полос V , $B - V$, на панелях (b), (d) — для полос Gaia DR3 RP , $BP - RP$. Красные кресты — наблюдения, синие линии — результаты представления тригонометрическими полиномами вида (1), черные линии — смоделированные обобщенным методом Balona (1977) кривые блеска с разложением вида (2) четвертого порядка по показателям цвета для значения $PF = 1.30$. Пульсационные фазы отсчитываются от момента $t_0 = \text{JD } 2450003.80$ для периода $P_{\text{pls}} = 6^{\text{d}}.1662$.

Таблица 3. Коэффициенты тригонометрического разложения (1) пульсационной кривой ($t_0 = \text{JD } 2450003.80$ и период пульсаций $P_{\text{pls}} = 6^{\text{d}}.1662$)

Гармоника k	A_k	B_k
1	+11.6417	-2.5633
2	-3.9017	+2.9676
3	+1.0903	-1.4823
4	-0.1242	+1.1187

мы использовали разработанный ранее «температурный» алгоритм с моделированием многофазных изменений T_{eff} при помощи выведенной нами для классических цефеид цветовой калибровки эффективной температуры (Rastorguev et al., 2022). Однако в данном случае нет уверенности в применимости этой калибровки к цефеиде TX Del, не принадлежащей к типу классических цефеид. Для оценки среднего радиуса и его пульсационных изменений мы использовали обобщение метода Balona (1977), предложенное Rastorguev and Dambis (2011), состоящее в представлении наблюдаемой кривой блеска полиномом в самом общем виде, пригодном для любой пары фотометриче-

Таблица 4. Параметры орбиты TX Del

Параметр	Значение
P_{pls} , сут.	6.1662
T_0 , 2400000+	—
P_{orb} , сут.	133.474 ± 0.037
e	0.0 ± 0.037
Ω , рад.	—
K , км с $^{-1}$	13.78 ± 0.25
V_γ км с $^{-1}$	14.06 ± 0.16
$f(M)$, M_\odot	0.036 ± 0.002
$a_1 \sin i$, a.e.	0.169 ± 0.003
RMS, км с $^{-1}$	1.45

ских полос, разность блеска в которых (то есть показатель цвета) является хорошим индикатором эффективной температуры:

$$\text{Magn} = -5 \lg[\langle R \rangle + \Delta R(t)] + \sum_{k=1}^K a_k CI^k + C, \quad (2)$$

где Magn — видимый блеск звезды, CI — наблюдаемый показатель цвета, a_k , C — постоянные

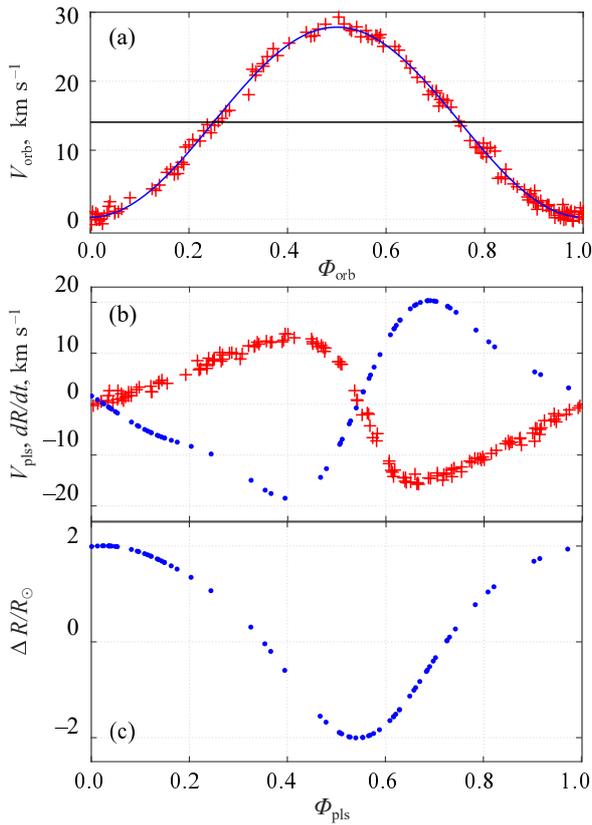


Рис. 2. Панель (а): вклад орбитального движения в лучевую скорость TX Del. Красные кресты — наблюдения, синяя линия — точное решение для кеплеровской орбиты; черная горизонтальная линия — скорость центра масс системы. Панель (б): вклады пульсаций в лучевую скорость (красные кресты) и сглаженная кривая скорости пульсаций фотосферы $dR/dt = -PF \times V_{\text{pls}}$ для проекционного фактора $PF = 1.30$ (синие точки). Панель (с): изменение радиуса TX Del $\Delta R(t)/R_{\odot}$. Орбитальные и пульсационные фазы отсчитываются от единого момента $t_0 = \text{JD } 2450003.80$; $P_{\text{pls}} = 6^{\text{d}}1662$.

коэффициенты, $\langle R \rangle$ — средний радиус, $\Delta R(t)$ — изменение радиуса с фазой пульсаций. Несомненным преимуществом этого метода, по сравнению с широко используемым методом поверхностной яркости Barnes and Evans (1976), является тот факт, что для определения среднего радиуса используются неисправленные за поглощение кривые изменения блеска и показатели цвета (Sachkov et al., 1998). Как было показано Rastorguev and Dambis (2011), вся информация о поглощении в выражении (2) включена в константу C , а полиномиальный вид (2) по показателю цвета отражает нелинейность цветовых калибровок $\lg T_{\text{eff}}$ и болометрических поправок BC .

Мы определяли величину среднего радиуса путем моделирования кривых блеска TX Del в соответствии с выражением (2) в полосах V и RP с использованием показателей цвета $CI = (B - V)$ и

Таблица 5. Результаты определения среднего пульсационного радиуса TX Del $\langle R \rangle$ (выраженного в R_{\odot}) и соответствующие ошибки для кривых блеска и цвета ($V, B - V$) и ($RP, BP - RP$). Для каждого варианта амплитуда изменений радиуса составляет примерно $2 R_{\odot}$

PF	$(V, B - V)$	$(RP, BP - RP)$
1.24	21.4 ± 1.5	19.7 ± 1.1
1.28	22.1 ± 1.5	20.3 ± 1.0
1.30	22.4 ± 1.6	20.6 ± 1.1
1.32	22.8 ± 1.6	21.0 ± 1.1
1.34	23.1 ± 1.6	21.2 ± 1.1
Среднее	22.4 ± 0.8	20.6 ± 0.6

$CI = (BP - RP)$ соответственно, представленных разложением в тригонометрические полиномы вида (1), а также изменений радиуса $\Delta R(t)$, рассчитанных для ряда значений проекционного фактора PF в интервале 1.24–1.34. Результаты определения пульсационного радиуса этим методом для кривых блеска и цвета ($V, B - V$) и ($RP, BP - RP$) и разных значений проекционного фактора приведены в таблице 5. На панелях (с) и (d) рис. 1 показаны примеры сравнения наблюдаемых (красные кресты) и смоделированных согласно выражению (2) кривых блеска (черные сплошные линии) соответственно для значения $PF = 1.30$ в полосах V, RP .

Дискуссии о величине проекционного фактора PF и его возможных зависимостях от периода, спектрального класса и других параметров звезд ведутся давно (см. обсуждение проблемы в Разделе 3.2 нашей работы Rastorguev et al., 2024b), поэтому мы выполнили расчеты радиуса TX Del для ряда значений PF , которые считаются наиболее вероятными. Как видно из таблицы 5, оценки радиуса меняются не более чем на 10%. Мы уверенно можем констатировать, что наши оценки радиуса TX Del ($21\text{--}22 R_{\odot}$) существенно (примерно вдвое – втрое) меньше всех имеющихся оценок (см., например, сводку в работе Arellano Ferro and Rosenzweig, 2000), и намного лучше согласуются с предсказаниями зависимостей «период – радиус» для цефеид T2 (в том числе для переменных типа BL Her) (Balog et al., 1997; Arellano Ferro and Rosenzweig, 2000). В частности, наши оценки радиуса TX Del в точности соответствуют зависимости «период – радиус» для пульсаций цефеид T2 в основной моде, выведенной Groenewegen and Jurkovic (2017) (формула (1) в цитируемой работе). По величине радиуса TX Del никак не может быть отнесена к классическим цефеидам, у которых радиусы для периода около шести дней составляют примерно $50 R_{\odot}$.

В каталоге Gaia DR3 для TX Del приведено значение параметра $RUWE = 1.940$. Оно несколько превышает рекомендованное граничное значение $RUWE = 1.40$ для одиночных источников и заставляет относиться к точности приведенных астрометрических данных с некоторой долей осторожности; однако из всех имеющихся данных о расстоянии до TX Del данные Gaia DR3, безусловно, являются самыми надежными. В пользу надежности расстояния свидетельствует также сравнительно малое каталожное значение фотометрического параметра $E(BP/RP) = 1.236$, находящееся в пределах 1.0–1.35, характерных для одиночных звезд Gaia DR3. Для примерной оценки светимости TX Del мы используем байесовские оценки расстояния, выведенные Bailer-Jones et al. (2021) по данным каталога Gaia eDR3, «геометрического» ($rgeo$) и «фотогеометрического» ($rpgeo$). Они приведены в первых строках таблицы 6. Различия между ними меньше формальных ошибок определения, и мы можем принять для истинного модуля расстояния значение $(m - M)_0 \approx 10^m 13 \pm 0^m 03$.

Для TX Del в литературе можно найти ряд оценок избытков цвета. Ivanov et al. (1983) привели значение поглощения $A_V \approx 0^m 38$, Harris (1985) в каталоге цефеид T2 галактического поля — $E(B - V) \approx 0^m 10$, Meakes et al. (1991) — $E(B - V) \approx 0^m 12$, Wielgórski et al. (2022) — $E(B - V) \approx 0^m 085$, Groenewegen (2020) из анализа спектрального распределения энергии — $E(B - V) \approx 0^m 22 \pm 0^m 02$, 3D-карта поглощения GALExtin (Amôres et al., 2021) для расстояния 1 кпк дает значение $E(B - V) \approx 0^m 11 \pm 0^m 01$, а 3D-карта Argonaut (Green et al., 2019) — значение избытка цвета $E(g - r) \approx 0^m 10 \pm 0^m 02$; его перевод по калибровкам Wang and Chen (2019) приводит к величинам $E(B - V) \approx 0^m 10$ и $E(BP - RP) \approx 0^m 13$. Все оценки (кроме Groenewegen, 2020) близки между собой, и мы для оценки светимости TX Del уверенно можем принять $E(B - V) \approx 0^m 10$, $E(BP - RP) \approx 0^m 13$. Оценки абсолютных величин и нормальных цветов TX Del также приведены в таблице 6.

Согласно нашей оценке, TX Del примерно на $2^m 2$ слабее, чем указано в работах Balog and Vinko (1995), Balog et al. (1997), Andrievsky et al. (2002), где высказывались подозрения, что TX Del является классической цефеидой (главной причиной было сильное завышение расстояния до TX Del). Зависимости «период–светимость» для цефеид T2, выведенные Clementini et al. (2016) и Riperi et al. (2019) по переменным Большого Магелланова Облака, предсказывают для TX Del $M_G \approx -1^m 44$ и $-1^m 23$ соответственно, что находится в общем согласии с нашей оценкой, сделанной на основании каталога Gaia DR3 $\langle M_G \rangle_I \approx -1^m 40$.

Таблица 6. Расстояние, видимый блеск, показатели цвета, абсолютные величины, нормальные показатели цвета TX Del для фотометрических полос (B , V) и (G , RP , RP). Нижний индекс I обозначает звездные величины, соответствующие средним по циклу пульсаций потокам

Величина	Значение
$rgeo$, кпк	1.072 ± 0.030
$rpgeo$, кпк	1.057 ± 0.030
$(m - M)_0$, mag	10.13 ± 0.03
$E(B - V)$, mag	0.10 ± 0.01
$E(BP - RP)$, mag	0.13 ± 0.01
$\langle V \rangle_I$, mag	9.15 ± 0.05
$\langle B - V \rangle_I$, mag	0.71 ± 0.03
$\langle G \rangle_I$, mag	8.98 ± 0.01
$\langle RP \rangle_I$, mag	8.44 ± 0.01
$\langle BP - RP \rangle_I$, mag	0.89 ± 0.01
$\langle M_V \rangle_I$, mag	-1.31 ± 0.05
$\langle B - V \rangle_{I,0}$, mag	0.61 ± 0.05
$\langle M_G \rangle_I$, mag	-1.40 ± 0.03
$\langle M_{RP} \rangle_I$, mag	-1.88 ± 0.03
$\langle BP - RP \rangle_{I,0}$, mag	0.75 ± 0.01
$\lg(L_{bol}/L_\odot)$	2.40 ± 0.02

Наша оценка светимости $\langle M_V \rangle_I \approx -1^m 31$ столь же хорошо соответствует зависимости «период–светимость» для переменных типа BL Her в шаровых скоплениях с периодами $P_{pls} < 10^d$ (формула (11) в McNamara, 1995) и зависимости «период–светимость» из работы Demers and Harris (1974). Согласно этой зависимости для TX Del должно быть $M_V \approx -1^m 33$.

Суммируя полученные результаты только о пульсационном радиусе и светимости, можно было бы отнести TX Del к подтипу переменных BL Her.

3.3. Орбита системы TX Del в Галактике

В каталогах Gaia eDR3/DR3 для TX Del приводятся значения компонентов собственного движения $pmRA \approx -2.622 \pm 0.034$ мсд год⁻¹, $pmDE \approx -7.426 \pm 0.028$ мсд год⁻¹ (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2021; Vallenari et al., 2023). Используя оценку расстояния и найденную лучевую скорость центра масс системы V_γ , мы рассчитали параметры галактической орбиты TX Del для безансонской модели гравитационного потенциала

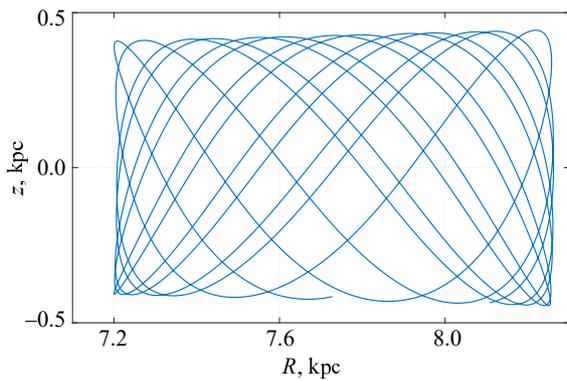


Рис. 3. Меридианальное сечение орбитного тора системы TX Del по астрометрическим данным Gaia DR3 для безансонской модели гравитационного потенциала Галактики.

Галактики¹ (BGM) (Robin et al., 2003, 2014; Bienaymé et al., 2015; Fernández-Trincado et al., 2022). Орбита TX Del заключена в орбитный тор $|z| \leq 0.42$ кпк с внутренним и внешним радиусами 7.2–8.3 кпк в проекции на плоскость Галактики; его меридианальное сечение показано на рис. 3. Тангенциальная скорость системы меняется в пределах 220–255 км с⁻¹, вертикальная — в пределах ± 38 км с⁻¹, период галактовертикальных колебаний составляет около 77 млн лет, а орбитальный период — около 200 млн лет.

Rastorguev et al. (2024a) получили близкие кинематические характеристики для спектрально-двойной цефеиды AU Peg, также обычно относимой к подтипу BL Her, но, по нашему мнению, являющейся звездой старого диска Галактики. Крайне интересно, что расчеты параметров галактической орбиты прототипа подкласса — цефеиды BL Her — с использованием астрометрических данных Gaia DR3 дают очень похожие результаты: орбитный тор толщиной $|z| \leq 0.4$ кпк с внутренним и внешним радиусами 6.3–8.5 кпк, тангенциальная скорость 205–270 км с⁻¹, вертикальная скорость в пределах ± 40 км с⁻¹, период галактовертикальных колебаний около 70 млн лет, а орбитальный период около 200 млн лет. По кинематическим характеристикам BL Her также похожа на представителя населения старого диска с экспоненциальной шкалой порядка $H_z \approx 0.3$ кпк или же толстого диска с $H_z \approx 0.85$ кпк.

Высокая металличность и кинематические характеристики, типичные для населения диска Галактики, позволяют с большой степенью уверенности отнести TX Del (и, возможно, многие другие

¹Расчеты орбит доступны по ссылке: <https://gravpot.utinam.cnrs.fr/>

Таблица 7. Измерения T_{eff} , $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ и оценки массы TX Del

T_{eff} , K	$\lg g$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	M , M_{\odot}	Ссылка
5900	1.60	-0.18	0.40–0.75	[2]
5500	0.50	+0.10	—	[3]
5485	1.06	+0.11	—	[4]
5738	1.32	+0.23	0.33–0.40	[4]
6217	1.80	+0.24	0.90–1.20	[1]

[1] — Andrievsky et al. (2013), [2] — Galazutdinov (1995), [3] — Maas et al. (2007), [4] — Schmidt et al. (2011).

подобные объекты) к населению старого/толстого диска Галактики.

3.4. Эволюционный статус и оценки масс TX Del и спутника

В вопросе об эволюционном статусе и массах звезд, занимающих в полосе нестабильности область между переменными типа RR Лиры и классическими цефеидами, нет устоявшейся точки зрения. Скорее всего, в этот интервал значений светимости ($40\text{--}1000 L_{\odot}$) попадают звезды, находящиеся на разных стадиях эволюции. В настоящее время к переменным подтипа BL Her относят цефеиды с периодами $1^{\text{d}} \leq P_{\text{pls}} \leq 4\text{--}5^{\text{d}}$ (Udalski et al., 2015; Soszyński et al., 2017a,b, 2018; Bono et al., 2020). Считается, что эти переменные с массами в интервале $0.50\text{--}0.80 M_{\odot}$ и в широком интервале обилия тяжелых химических элементов $Z \approx 0.0001\text{--}0.013$ находятся на стадии эволюции после горизонтальной ветви на пути к асимптотической ветви гигантов (стадия АНВ — Above Horizontal Branch). Переменные с периодами $4\text{--}5^{\text{d}} \leq P_{\text{pls}} \leq 20^{\text{d}}$ относят к цефеидам сферической составляющей T2 типа W Vir (Bono et al., 2020; Das et al., 2021; 2024). Эти маломассивные звезды находятся на стадии асимптотической ветви гигантов и в результате тепловых пульсаций, вызванных взаимодействием двух слоевых источников энергии, могут пересекать полосу нестабильности.

В таблице 7 приведены результаты ряда спектроскопических измерений физических параметров TX Del, согласно которым $\lg T_{\text{eff}}$ лежит в пределах от 3.74 до 3.79. Учитывая, что $\langle \lg(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) \rangle \approx 2.40$ (см. таблицу 7), легко убедиться, что TX Del лежит в полосе нестабильности цефеид T2, занимаемой переменными с периодом около 5–6 суток (согласно рис. 4 в работе Bono et al., 2020), в области минимума гистограммы распределения по периодам и фактически разграничивает подтипы переменных BL Her и W Vir.

Недостаточно глубокое понимание природы и эволюционного статуса цефеид Т2, отмеченное Wono et al. (2020), а также существенные различия в кинематике и в пространственном распределении между низкометаллическими цефеидами Т2, с одной стороны, и TX Del, AU Peg и BL Her, с другой стороны, требуют дополнительных исследований, в том числе эволюционных и пульсационных расчетов.

Marconi and Di Criscienzo (2007) построили пульсационные модели звезд подтипа BL Her для звезд с массами $0.50\text{--}0.65 M_{\odot}$ и низкой металличностью $Z = 0.0001, 0.001, 0.004$, а Das et al. (2021; 2024) — модели для более широкого диапазона масс ($0.50\text{--}0.80 M_{\odot}$), металличностей ($Z \approx 0.0001\text{--}0.013$), светимостей ($50\text{--}300 L_{\odot}$) и периодов ($2^{\text{d}} \leq P_{\text{pls}} \leq 4^{\text{d}}$). Радиусы всех рассчитанных моделей не превышают $18 R_{\odot}$ и достаточно слабо зависят от массы звезды; радиусы и пульсационные периоды звезд с $\lg(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) \approx 2.40$ систематически растут с уменьшением T_{eff} . Rastorguev et al. (2024a) указали, что ни одна из упомянутых моделей не воспроизводит свойств цефеиды AU Peg — спектрально-двойной цефеиды с самым коротким орбитальным периодом $P_{\text{orb}} \approx 53^{\text{d}}.33$ и $P_{\text{pls}} \approx 2^{\text{d}}.4$, лежащей к тому же за красной границей полосы неустойчивости. Напротив, TX Del на диаграмме « $\lg T_{\text{eff}} - \lg L$ » располагается в пределах теоретической полосы неустойчивости для переменных подтипа BL Her с $P_{\text{pls}} > 2^{\text{d}}$ (рис. 1 в статье Das et al., 2021), хотя и вне сетки рассчитанных моделей; из-за отсутствия пульсационных моделей с периодами $P_{\text{pls}} > 4^{\text{d}}$, радиусами $R > 20 R_{\odot}$ и светимостями $L \approx 250\text{--}300 L_{\odot}$ нам не удается наложить независимое ограничение на возможную массу главного компонента TX Del. То же самое относится и к методу «пульсационной константы» (Cogan, 1970; Cox et al., 1972) из-за отсутствия сетки пульсационных расчетов для масс, радиусов, периодов и светимостей, характерных для переменных данного подтипа.

Предварительные грубые оценки массы цефеиды TX Del, сделанные на основании вычисленного нами радиуса и спектроскопических измерений $\lg g$, приведены в таблице 7. Для малых значений $\lg g \approx 0.50, 1.06$ оценки массы неправдоподобно малы (меньше $0.2 M_{\odot}$). Согласно работе Wono et al. (2020), через область полосы неустойчивости, занимаемую TX Del, проходят эволюционные треки для звезд с массами на начальной горизонтальной ветви в интервале $M \approx 0.50\text{--}0.90 M_{\odot}$.

В таблице 4 указаны рассчитанные нами величины радиальной проекции орбиты главного ком-

понента $a_1 \sin i$ и функции масс $f(M)$:

$$f(M) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = 1.0385 \times 10^{-7} \times (1 - e^2)^{3/2} K_1^3 P, \quad (3)$$

где массы M_1, M_2 и функция масс $f(M)$ выражены в единицах M_{\odot} , амплитуда орбитальной скорости главного компонента K_1 в km s^{-1} , орбитальный период P в сутках. С их помощью мы рассчитали диагностические диаграммы для значений масс главного компонента в интервале $M_1 \approx 0.50\text{--}0.95 M_{\odot}$, что по современным представлениям считается характерным для переменных подтипа BL Her (рис. 4).

Связь между массами главного компонента M_1 и спутника M_2 для углов наклона орбитальной плоскости $i = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ показана на рис. 4а. Нижняя черная штриховая линия (практически совпадающая с линией для угла наклона $i = 70^\circ$) ограничивает сверху «запретную область» взаимных затмений в предположении, что спутник является звездой главной последовательности (зависимость «масса—радиус» взята из работы Demircan and Kahraman, 1991). Верхняя штриховая линия соответствует $M_2 = 2 M_{\odot}$, то есть верхнему пределу массы спутника, налагаемому наблюдениями в УФ (см. Раздел 1). Опираясь на данные таблицы 6, легко понять, что для этого верхнего предела массы спутника А3 V — А4 V его вклад в суммарный фотометрический поток не превышает 6–7% (Matajsek, 2022). На рис. 4б показано отношение масс $q = M_1/M_2$ для разных углов наклона (горизонтальная штриховая линия обозначает равенство масс, наклонная штриховая линия соответствует $M_2 = 2 M_{\odot}$). На рис. 4с, d для разных углов наклона приведены оценки расстояния между компонентами A/R_{\odot} и степени заполнения сферы Роша R_1/R_L главным компонентом соответственно. Для расчета радиуса сферы Роша использовано выведенное Eggleton (1983) аналитическое выражение, дающее приближение с точностью около 1%. На рис. 4 видно, что цефеида заполняет сферу Роша на 37–55% (в зависимости от принятой массы и угла наклона).

Анализ диагностических диаграмм показывает, что для всех приводимых значений массы главного компонента TX Del углы наклона орбиты лежат в пределах $20^\circ\text{--}70^\circ$, при этом при углах наклона более $35^\circ\text{--}40^\circ$ масса главного компонента выше массы спутника. Решения с массой спутника, превышающей массу главного компонента, возможны при углах наклона от 20° до $30^\circ\text{--}35^\circ$. В последнем случае более низкая масса цефеиды может объясняться неизбежным переносом вещества в

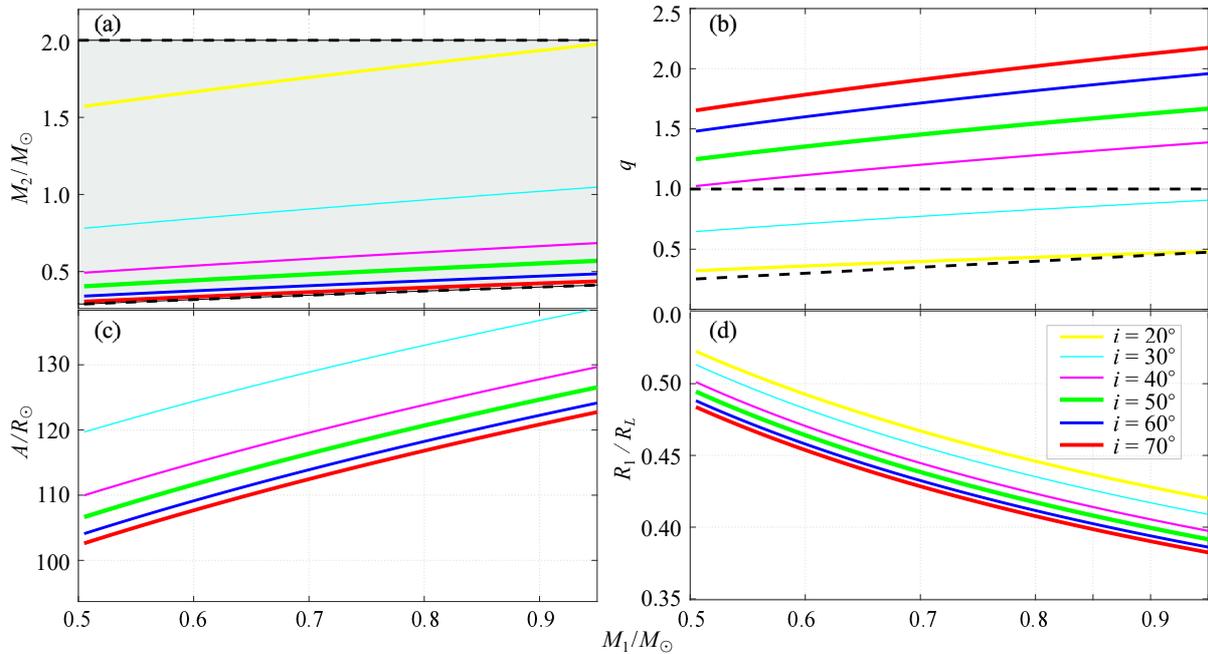


Рис. 4. Диагностические диаграммы для TX Del. Зависимости параметров — массы спутника M_2 (а), отношения масс $q = M_1/M_2$ (б), расстояния между компонентами A/R_\odot — от массы главного компонента M_1 для углов между плоскостью орбиты и картинной плоскостью $i = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ (с), степени заполнения сферы Роша R_1/R_L главным компонентом (д). Нижние черные штриховые линии на панелях (а) и (б) ограничивают «запретную зону», в которой возможны взаимные затмения компонентов; верхняя штриховая линия — максимальная масса спутника около $2 M_\odot$ (ограничение из вклада в УФ-поток). Горизонтальная штриховая линия на панели (б) — линия равных масс $M_1 = M_2$. Детали обсуждаются в тексте.

двойной системе от проэволюционировавшей изначально более массивной звезды к спутнику — звезде главной последовательности. Как было показано выше, по химическому составу, положению в Галактике и кинематическим характеристикам TX Del может быть уверенно отнесена к населению старого (возрастом 8–10 млрд лет) или толстого диска (возрастом 10–11 млрд лет). Эволюционные треки MESA (Dotter, 2016) предсказывают для звезды солнечной массы время эволюции до стадии красного гиганта порядка 11.3 млрд лет, а для звезды с начальной массой $1.05 M_\odot$ время около 9.5 млрд лет. Следовательно, начальная масса главного компонента должна была составлять как минимум $1.05\text{--}1.10 M_\odot$, для того чтобы звезда успела проэволюционировать до стадии маломассивного субгиганта или обмена масс.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе измеренных лучевых скоростей, фотометрических данных выполнена ревизия физических характеристик и эволюционного статуса цефеиды TX Del, обычно классифицируемой как цефеида подтипа BL Her. Уточненные параметры орбиты, включая функцию масс, рассчитаны по 157 нашим измерениям лучевой скорости. Ряды

фотометрических и спектральных измерений на большом интервале времени JD 2441882–2457887 (около 2600 циклов) хорошо описываются единым значением пульсационного периода $P_{\text{pls}} \approx 6^{\text{d}}1662$, что позволило нам, используя метод пульсирующих фотосфер с учетом пренебрежимо малого сдвига фаз между фотометрическими и спектральными рядами, определить средний радиус TX Del $\langle R \rangle \sim 22.4 \pm 0.8$ и $\langle R \rangle \sim 20.6 \pm 0.6$ для полос B, V и BP, RP соответственно. Амплитуда изменения радиуса составляет около 10%. Наша оценка существенно (в 2–3 раза) меньше других имеющихся определений и полностью соответствует зависимости «период — радиус», выведенной для цефеид T2 с периодами менее 10^{d} . Для определения светимости в указанных фотометрических полосах использованы байесовские оценки расстояния (Bailer-Jones et al., 2021), в среднем равного 1.06 ± 0.03 кпк; определены абсолютные величины $\langle M_V \rangle_I \approx -1^{\text{m}}31 \pm 0^{\text{m}}05$ и $\langle M_G \rangle_I \approx -1^{\text{m}}40 \pm 0^{\text{m}}03$, хорошо согласующиеся с предсказаниями зависимости «период — светимость» для цефеид T2; тем самым уверенно отвергается классификация TX Del как классической цефеиды. Светимость системы $L \approx 250 \pm 5 L_\odot$.

По астрометрическим данным Gaia DR3 — рас-

стоянию и собственным движениям, а также по лучевой скорости системы в рамках трехкомпонентной модели гравитационного потенциала Галактики рассчитаны параметры галактических орбит TX Del и прототипа подкласса, цефеиды BL Her. Толщина их орбитных торов около 0.4 кпк и почти круговые орбиты с большими скоростями вращения (более $200\text{--}220\text{ км с}^{-1}$) позволяют по положению в Галактике, свойствам галактической орбиты и химическому составу отнести TX Del, BL Her, а также AU Peg с ранее рассчитанной нами орбитой (Rastorguev et al., 2024a) к населению старого/толстого диска Галактики. Можно констатировать, что полоса нестабильности для переменных с периодами 1–10 дней и светимостями $L \approx 50\text{--}300 L_{\odot}$ включает как типичные объекты сферической составляющей (в том числе старые цефеиды шаровых скоплений, заведомо обладающие значительным дефицитом тяжелых элементов), так и звезды с типичными для старого/толстого диска химическим составом, положением и кинематикой. Подобная дихотомия, безусловно, затрудняет надежную классификацию переменных с указанным диапазоном периодов и светимостей. Для уточнения классификационных признаков совершенно необходимо проведение эволюционных и пульсационных расчетов в более широком интервале металличностей, периодов и светимостей по сравнению с выполненными к настоящему времени вычислениями. Как видно, ни AU Peg, ни TX Del не описываются имеющимися современными моделями, тем более, что они являются главными компонентами двойных систем, и в их эволюции могли сыграть большую роль процессы переноса массы.

Построенные по расчетным данным диагностические диаграммы не позволяют наложить жесткие ограничения на массу главного компонента TX Del, заполняющего сферу Роша на 37–55%. Вероятный диапазон масс — $0.50\text{--}0.95 M_{\odot}$, а угол наклона орбиты к картинной плоскости — $20\text{--}70^{\circ}$. При этом для $i > 35\text{--}40^{\circ}$ масса главного компонента больше массы спутника, а для углов $20^{\circ} < i < 30\text{--}35^{\circ}$ спутник может оказаться массивнее цефеиды, что заставляет рассмотреть эволюционный сценарий с обменом масс. Учитывая вероятную принадлежность TX Del к населению старого/толстого диска, мы можем предположить, что начальная масса TX Del должна была составлять не менее $1.05\text{--}1.10 M_{\odot}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны участникам многолетней программы измерения лучевых скоростей: М. Е. Сачкову (ИНАСАН), Е. В. Глушковой

(МГУ), А. А. Федоровой (ИКИ РАН). Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова. В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ЕКА) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета учреждений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. B. Amôres, R. M. Jesus, A. Moitinho, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (2), 1788 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2248
2. S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, R. E. Luck, et al., *Astron. and Astrophys.* **381**, 32 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20011488
3. S. M. Andrievsky, J. R. D. Lépine, S. A. Korotin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428** (4), 3252 (2013). DOI:10.1093/mnras/sts270
4. A. Arellano Ferro and P. Rosenzweig, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315** (2), 296 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03390.x
5. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
6. Z. Balog and J. Vinko, *Information Bulletin on Variable Stars* **4150**, 1 (1995).
7. Z. Balog, J. Vinko, and G. Kaszas, *Astron. J.* **113**, 1833 (1997). DOI:10.1086/118394
8. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 231 (1977). DOI:10.1093/mnras/178.2.231
9. T. G. Barnes and D. S. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **174**, 489 (1976). DOI:10.1093/mnras/174.3.489
10. L. N. Berdnikov and O. V. Vozyakova, *Astronomy Letters* **21** (3), 308 (1995).
11. O. Bienaymé, A. C. Robin, and B. Famaey, *Astron. and Astrophys.* **581**, id. A123 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526516
12. E. Böhm-Vitense and C. Proffitt, *Astrophys. J.* **296**, 175 (1985). DOI:10.1086/163433
13. G. Bono, V. F. Braga, G. Fiorentino, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A96 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038191

14. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833051
15. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
16. G. Clementini, V. Ripepi, S. Leccia, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A133 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629583
17. B. C. Cogan, *Astrophys. J.* **162**, 139 (1970). DOI:10.1086/150639
18. J. P. Cox, D. S. King, and R. F. Stellingwerf, *Astrophys. J.* **171**, 93 (1972). DOI:10.1086/151262
19. S. Das, S. M. Kanbur, R. Smolec, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (1), 875 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa3694
20. S. Das, L. Molnár, S. M. Kanbur, et al., *Astron. and Astrophys.* **684**, id. A170 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202348280
21. J. F. Dean, A. W. J. Cousins, R. A. Bywater, and P. R. Warren, *Memoirs of the Royal Astron. Soc.* **83**, 69 (1977).
22. S. Demers and W. E. Harris, *Astron. J.* **79**, 627 (1974). DOI:10.1086/111586
23. O. Demircan and G. Kahraman, *Astrophys. and Space Sci.* **181** (2), 313 (1991). DOI:10.1007/BF00639097
24. R. Diethelm, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **64**, 261 (1986).
25. A. Dotter, *Astrophys. J. Suppl.* **222** (1), article id. 8 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/222/1/8
26. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983). DOI:10.1086/160960
27. J. G. Fernández-Trincado, D. Minniti, E. R. Garro, and S. Villanova, *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A84 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142222
28. Gaia Collab., *VizieR On-line Data Catalog: I/358* (2022).
29. G. A. Galazutdinov, *Astronomy Letters* **21** (5), 691 (1995).
30. N. A. Gorynya, T. R. Irsambetova, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus, *Soviet Astronomy Letters* **18**, 316 (1992).
31. N. A. Gorynya, N. N. Samus', A. S. Rastorguev, and M. E. Sachkov, *Astronomy Letters* **22** (2), 175 (1996).
32. N. A. Gorynya, N. N. Samus', M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Letters* **24** (6), 815 (1998).
33. G. M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, et al., *Astrophys. J.* **887** (1), article id. 93 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab5362
34. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **635**, id. A33 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201937060
35. M. A. T. Groenewegen and M. I. Jurkovic, *Astron. and Astrophys.* **604**, id. A29 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201730946
36. P. Guthnick and R. Prager, *Astronomische Nachrichten* **260**, 393 (1936). DOI:10.1002/asna.19362602202
37. H. C. Harris, *Astron. J.* **90**, 756 (1985). DOI:10.1086/113783
38. H. C. Harris and D. L. Welch, *Bulletin of the American Astronomical Society*, **20**, 1022 (1988).
39. H. C. Harris and D. L. Welch, *Astron. J.* **98**, 981 (1989). DOI:10.1086/115190
40. K. Hart, B. J. Shappee, D. Hey, et al., *arXiv e-prints astro/ph:2304.03791* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2304.03791
41. C. Hoffmeister, *Astronomische Nachrichten* **255**, 401 (1935). DOI:10.1002/asna.19352552202
42. G. R. Ivanov, Y. N. Efremov, and N. S. Nikolov, *Peremennye Zvezdy* **21**, 861 (1983).
43. C. D. Laney, *ASP Conf. Ser.*, **83**, 367 (1995).
44. T. Maas, S. Giridhar, and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **666** (1), 378 (2007). DOI:10.1086/520081
45. E. E. Mamajek, *A Modern Mean Dwarf Stellar Color and Effective Temperature Sequence*, (online at https://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt, last updated April 16, 2022).
46. M. Marconi and M. Di Criscienzo, *Astron. and Astrophys.* **467** (1), 223 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20066646
47. D. H. McNamara, *Astron. J.* **109**, 1751 (1995). DOI:10.1086/117405
48. M. Meakes, G. Wallerstein, and J. F. Opalko, *Astron. J.* **101**, 1795 (1991). DOI:10.1086/115806
49. T. J. Moffett and T. G. Barnes, III, *Astrophys. J. Suppl.* **55**, 389 (1984). DOI:10.1086/190960
50. J. R. Percy and J. X. Hoss, *Journal American Association of Variable Star Observers* **29** (1), 14 (2000).
51. M. Petit, *Annales d'Astrophysique* **23**, 710 (1960).
52. A. S. Rastorguev and A. K. Dambis, *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 47 (2011). DOI:10.1134/S1990341311010032
53. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
54. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, and N. A. Gorynya, *Astronomy Reports* **68** (12), 1457 (2024a).
55. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, and N. A. Gorynya, *Astrophysical Bulletin* **79** (4), 629 (2024b). DOI:10.1134/S1990341324600625
56. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, Y. A. Lazovik, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 144 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020079
57. V. Ripepi, R. Molinaro, I. Musella, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, A14 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834506
58. A. C. Robin, C. Reylé, S. Derrière, and S. Picaud, *Astron. and Astrophys.* **409**, 523 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20031117
59. A. C. Robin, C. Reylé, J. Fliri, et al., *Astron. and Astrophys.* **569**, A13 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201423415
60. M. E. Sachkov, A. S. Rastorguev, N. N. Samus', and N. A. Gorynya, *Astronomy Letters* **24** (3), 377 (1998).

61. E. G. Schmidt, D. Rogalla, and L. Thacker-Lynn, *Astron. J.* **141** (2), 53 (2011). DOI:10.1088/0004-6256/141/2/53
62. I. Soszyński, A. Udalski, M. K. Szymański, et al., *Acta Astronomica* **67** (2), 103 (2017a). DOI:10.32023/0001-5237/67.2.1
63. I. Soszyński, A. Udalski, M. K. Szymański, et al., *Acta Astronomica* **67** (4), 297 (2017b). DOI:10.32023/0001-5237/67.4.1
64. I. Soszyński, A. Udalski, M. K. Szymański, et al., *Acta Astronomica* **68** (2), 89 (2018). DOI:10.32023/0001-5237/68.2.1
65. L. Szabados, *Communications of the Konkoly Observatory Hungary* **76**, 1 (1980).
66. L. Szabados, *Communications of the Konkoly Observatory Hungary* **96**, 123 (1991).
67. A. A. Tokovinin, *Sov. Astron.* **31**, 98 (1987).
68. A. Udalski, M. K. Szymański, and G. Szymański, *Acta Astronomica* **65** (1), 1 (2015). DOI:10.48550/arXiv.1504.05966
69. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
70. J. Vinko, N. Remage Evans, L. L. Kiss, and L. Szabados, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **296** (4), 824 (1998). DOI:10.1046/j.1365-8711.1998.01389.x
71. G. Wallerstein and E. M. Farrell, *Astron. J.* **156** (6), article id. 299 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aaee6d
72. T. Walraven, A. B. Muller, and P. T. Oosterhoff, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* **14**, 81 (1958).
73. S. Wang and X. Chen, *Astrophys. J.* **877** (2), article id. 116 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab1c61
74. P. Wielgórski, G. Pietrzyński, B. Pilecki, et al., *Astrophys. J.* **927** (1), id. 89 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac470c

Orbital Parameters, Radius and Classification of the Spectroscopic Binary Cepheid TX Del Based on Gaia DR3 Data

A. S. Rastorguev^{1,2}, M. V. Zabolotskikh², N. N. Samus^{3,2}, and N. A. Gorynya^{3,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

A revision of the orbital parameters of the spectroscopic binary Cepheid TX Del, often classified as a BL Her subtype of T2 variables, has been carried out. The pulsation radius is determined from two series of photometric observations, including Gaia DR3: $\langle R \rangle \approx 22.4 \pm 0.8 R_{\odot}$ for the (B , V) bands and $\langle R \rangle \approx 20.6 \pm 0.6 R_{\odot}$ for the (BP , RP) bands, respectively. The amplitude of the radius variations is about $2R_{\odot}$. The new radius estimates are significantly smaller than the previous estimates, which were in the range of 37 to 60 R_{\odot} . Using the Bayesian distance, $\langle D \rangle \approx 1064 \pm 25$ pc, the absolute values of TX Del are estimated to be $\langle M_V \rangle_I \approx -1.31 \pm 0.04$ mag and $\langle M_G \rangle_I \approx -1.40 \pm 0.03$ mag, respectively. The absolute magnitude and mean radius of TX Del are in excellent agreement with the predictions of the “period–luminosity” and “period–radius” relations for T2 Cepheids with a period of $P_{\text{pls}} \approx 6.1662$ days; TX Del is approximately 2^m2 fainter than classical Cepheids with the same period. It is shown that for orbital plane inclination angles $20^{\circ} < i < (30-35)^{\circ}$ the satellite can be more massive than the main component, which leads to an evolutionary scenario with mass exchange. The current Roche sphere filling degree is 37–55%. The orbit of the binary system TX Del calculated based on astrometric data from Gaia DR3 and radial velocity is limited by a $|z| < 0.42$ kpc torus with the inner and outer radii equal to 7.2 and 8.3 kpc, respectively, while the vertical velocity is $|V_z| \leq 38$ km s⁻¹; the period of galactovertical oscillations is about 77 Myrs. The tangential velocity is 220–255 km s⁻¹. The high metallicity and kinematic characteristics allow us to refer TX Del to the population of the old disk of the Milky Way with a vertical scale $H_z \approx 0.3$ kpc (or to a thick disk with $H_z \approx 0.85$ kpc). At the same time, in terms of pulsation characteristics (period, luminosity, and position in the instability strip), TX Del is close to Population II Cepheids with $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ (including globular cluster Cepheids) that are at the evolutionary stage after the horizontal branch. To finally clarify the evolutionary status of such variables, additional evolutionary and pulsation calculations are required over a wider range of periods and luminosities.

Keywords: *binaries: general—stars: variables: Cepheids—stars: individual: TX Del—stars: evolution—stars: fundamental parameters*