ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦЕФЕИДЫ V1033 Суд

© 2020 г. Ю. А. Фадеев^{1*}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия Поступила в редакцию 15.06.2020 г. После доработки 17.06.2020 г.; принята к публикации 26.06.2020 г.

На основе согласованных расчетов звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций показано, что цефеида V1033 Cyg находится на эволюционной стадии гравитационного сжатия гелиевого ядра после главной последовательности и впервые пересекает полосу пульсационной нестабильности. Наблюдаемая переменность звезды обусловлена радиальными колебаниями в фундаментальной моде. Лучшее согласие (в пределах одного процента) теоретической оценки скорости изменения периода с данными современных наблюдений получено для эволюционной последовательности с массой звезды $M = 6.3 M_{\odot}$ и содержаниями гелия и более тяжелых элементов Y = 0.28 и Z = 0.022 соответственно. Возраст, светимость, радиус, эффективная температура и ускорение силы тяжести на поверхности цефеиды составляют $t_{\rm ev} = 5.84 \times 10^7$ лет, $L = 2009 L_{\odot}$, $R = 45.6 R_{\odot}$, $T_{\rm eff} = 5726$ K, lg g = 1.92.

Ключевые слова: звездная эволюция, пульсации звезд, цефеиды, звезды — переменные и пекулярные.

DOI: 10.31857/S0320010820070050

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Общему каталогу переменных звезд (Самусь и др., 2017), пульсирующая переменная V1033 Cyg с периодом изменения блеска П = = 4.9375 сут принадлежит к звездам типа δ Сер. Главной особенностью, выделяющей V1033 Суд среди остальных цефеид, является аномально высокая скорость возрастания периода. Результаты исследования векового изменения периода показывают, что O - C диаграмма, построенная по наблюдениям этой звезды за последние 117 лет, с высокой точностью описывается квадратичной функцией, а скорость изменения периода составляет $\dot{\Pi} = 18.19$ с/год при средней квадратической ошибке $\sigma \approx 0.08$ с/год (Бердников и др., 2019). Это значение П в несколько десятков раз превосходит скорость изменения периода подавляющего большинства цефеид, эволюционные изменения которых связаны с термоядерным горением гелия в ядре (Фадеев, 2013, 2014). По всей видимости V1033 Суд находится на относительно кратковременной стадии гравитационного сжатия гелиевого ядра, в течение которой звезда перемещается в тепловой шкале времени по диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ГР) в область красных гигантов. Этот вывод подтверждается обнаружением в спектре V1033 Суд линий поглощения ⁷Li, свидетельствующих в пользу того, что звезда находится на этапе эволюции, предшествующем ее превращению в красный гигант (Лак, Ламберт, 2011). Таким образом, V1033 Суд является второй цефеидой, для которой установлено, что она находится на стадии первого пересечения полосы нестабильности. Ранее эволюционный статус первого пересечения полосы нестабильности был определен для цефеиды α UMi (Тэрнер и др., 2005; Фадеев, 2015а).

Благодаря малой погрешности наблюдательной оценки скорости изменения периода цефеида V1033 Суд представляется исключительно подходящим объектом для определения ее фундаментальных параметров (т.е. возраста звезды $t_{\rm ev}$, массы M, светимости L и радиуса R) посредством сравнения теоретически рассчитанных значений П и П с данными наблюдений. Основу метода составляют согласованные расчеты звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций, где отдельные модели эволюционной последовательности используются как начальные условия при решении задачи Коши для уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции, описывающих радиальные звездные пульсации. Ранее с помощью этого метода были определены фундаментальные параметры цефеид α UMi (Фадеев, 2015а) и SZ Таи (Фадеев, 2015б), а также групп долгопериодических (Фадеев, 2018) и короткопериоди-

^{*}Электронный адрес: fadeyev@inasan.ru

ческих цефеид (Фадеев, 2020). Доказательством эффективности метода является хорошее согласие (в пределах нескольких процентов) результатов теоретических расчетов с измерениями радиусов долгопериодических цефеид RS Pup, GY Sge и SV Vul методом Бааде-Весселинка.

Целью данной работы является подтверждение эволюционного статуса V1033 Суд как цефеиды первого пересечения полосы нестабильности методами теории звездной эволюции и теории звездных пульсаций и определение ее фундаментальных параметров. Расчеты звездной эволюции проводились по программе MESA версии 12115 (Пакстон и др., 2018). Описание методов расчета эволюционных последовательностей и нелинейных звездных пульсаций приведено в предшествующей статье автора (Фадеев, 2020). В качестве начальных условий, необходимых для решения уравнений гидродинамики, были использованы отдельные модели эволюционных последовательностей звезд с начальной массой 5.7 $M_{\odot} \leq M \leq$ 7.4 M_{\odot} и начальным содержанием гелия Y = 0.28. Принимая во внимание неопределенности, связанные с существованием радиального градиента металличности галактических цефеид (Лак и др., 2011; Лак, Ламберт, 2011; Лемаль и др., 2018), вычисления звездной эволюции и звездных пульсаций были проведены как для стандартного содержания металлов Z = 0.02, так и для значений Z = 0.018 и Z = 0.022.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты эволюционных последовательностей проводились от начальной главной последовательности до стадии, предшествующей восхождению звезды вдоль ветви красных гигантов на диаграмме ГР. Для звезд с массой $M \le 7.4~M_{\odot}$ эффекты потери массы на рассматриваемом отрезке звездной эволюции пренебрежимо малы, так как доля потерянного вещества вследствие звездного ветра составляет менее 10^{-4} массы звезды. Более того, неизменными остаются содержания химических элементов во внешних слоях с температурой $T \lesssim 5 \times 10^6$ К и радиусом $r \ge 0.1R$, в которых происходят пульсационные движения. Таким образом, при обсуждении свойств гидродинамических моделей цефеид мы без потери точности будем полагать, что масса цефеиды и содержания химических элементов имеют те же значения, что и на начальной главной последовательности.

При первом пересечении полосы нестабильности период колебаний цефеиды монотонно возрастает, причем эволюция звезд с массой $M \leq 7 \ M_{\odot}$ сопровождается переключением колебаний из первого обертона в фундаментальную моду. Для уверенного определения точки эволюционного трека, в которой происходит переключение моды колебаний, описание изменения периода пульсаций как функции возраста звезды проводилось с использованием ≈15 гидродинамических моделей равномерно распределенных по времени эволюции $t_{\rm ev}$ между границами полосы нестабильности. Следуя подходу, примененному в предшествующей статье автора (Фадеев, 2019), в данной работе предполагалось, что возраст звезды, соответствующий переключению моды колебаний, равен среднему значению возраста двух смежных гидродинамических моделей, пульсирующих в разных модах. В пределах отрезка с непрерывным изменением периода пульсаций зависимость $\Pi(t_{ev})$ определялась полиномиальной аппроксимацией методом наименьших квадратов. При использовании алгебраического полинома третьей степени средняя квадратическая ошибка приближения результатов гидродинамических расчетов не превосходит 0.1 процента.

Результаты согласованных расчетов звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций иллюстрируются на рис. 1, где показаны графики эволюционного изменения периода пульсаций П и скорости изменения периода П для цефеид с содержанием металлов Z = 0.02. Для удобства графического представления возраст звезды отсчитывается вдоль горизонтальной оси от момента времени $t_{\rm ev,b}$, когда эволюционный трек звезды пересекает синюю границу полосы нестабильности. Конечная точка каждого графика соответствует прекращению пульсаций на красной границе полосы нестабильности. Продолжительность стадии цефеиды во время первого пересечения полосы нестабильности составляет от $pprox 5.3 imes 10^3$ лет при $M=7.4~M_{\odot}$ до $pprox 1.8 imes 10^4$ лет при $M = 5.7~M_{\odot}$. Горизонтальными штриховыми линиями на рис. 1а и рис. 1б показаны значения периода П = 4.9403 сут и скорости изменения периода $\Pi = 18.19$ с/год (Бердников и др., 2019), которые используются для сравнения результатов расчетов с наблюдениями.

Скачкообразное изменение периода, показанное на графиках пунктирной линией, связано с переключением колебаний из первого обертона в фундаментальную моду. Как видно на рис. 1а, переключение моды колебаний значительно ограничивает интервал значений массы M, при которых звезда в ходе своей эволюции может пульсировать с периодом $\Pi \approx 4.94$ сут. В частности, для представленных на этом рисунке эволюционных последовательностей данное условие выполняется лишь для звезд с начальной массой $5.9 \ M_{\odot} \leq M \leq 6.1 \ M_{\odot}$, которые пульсируют в фундаментальной моде.



Рис. 1. Изменение периода (а) и скорости изменения периода (б) радиальных пульсаций цефеид при Z = 0.02 в течение первого пересечения полосы нестабильности. Около каждой зависимости приведено значение массы звезды M. Пунктирные линии соответствуют переключению моды колебаний. Горизонтальными штриховыми линиями отмечены наблюдательные оценки значений периода $\Pi = 4.9403$ сут и скорости изменения периода $\dot{\Pi} = 18.19$ с/год (Бердников и др., 2019).

В цефеидах первого пересечения полосы нестабильности периоды пульсаций в фундаментальной моде Π_0 и первом обертоне Π_1 в точке переключения моды колебаний моно-

тонно возрастают с увеличением массы звезды. Для эволюционных последовательностей с начальной массой в пределах 5.7 $M_{\odot} \leq M \leq \leq 7.0 \ M_{\odot}$ увеличение значений периода описыва-



Рис. 2. Периоды фундаментальной моды П₀ (кружки) и первого обертона П₁ (треугольники) в точке переключения моды колебаний в зависимости от начальной массы *M* для эволюционных последовательностей с содержанием элементов тяжелее гелия *Z* = 0.02. Горизонтальной штриховой линией отмечено значение периода пульсаций П = 4.9403 сут.

ется соотношениями

$$\Pi_0 = -6.962 + 1.926 M/M_{\odot},\tag{1}$$

$$\Pi_1 = -4.413 + 1.258M/M_{\odot},\tag{2}$$

где Π_0 и Π_1 выражены в сутках. Зависимости (1) и (2) представляют собой линейную аппроксимацию значений периодов Π_0 и Π_1 в точке переключения моды колебаний (см. рис. 2), которые определялись по результатам гидродинамических расчетов.

Предпринятые в данной работе попытки построить гидродинамическую модель цефеиды V1033 Cyg, пульсирующую в первом обертоне, оказались безрезультатными. Это связано с двумя причинами. Во-первых, область существования колебаний в первом обертоне ограничивается массой звезды $M \approx 7 \ M_{\odot}$ при верхнем предельном значении периода $\Pi_1 \approx 4.4$ сут. Как следует из рис. 1а, более массивные звезды пульсируют в фундаментальной моде в пределах всей полосы нестабильности. Во-вторых, если модель с массой $M > 7 \ M_{\odot}$ и колебаниями в первом обертоне всетаки будет построена (например, путем вариаций химического состава звездного вещества), то, как видно на рис. 16, увеличение скорости изменения периода с ростом массы звезды неизбежно приведет к противоречию с наблюдениями.

Для уточнения фундаментальных параметров цефеиды V1033 Cyg, определяемых с помощью гидродинамических моделей пульсирующих в фундаментальной моде, в данной работе были проведены дополнительные расчеты эволюционных последовательностей звезд с массой $M = 5.9 M_{\odot}$, $6.1 \ M_{\odot}$ и $6.3 \ M_{\odot}$ при содержаниях металлов Z == 0.018 и Z = 0.022. Результаты вычислений показаны на диаграмме период-скорость изменения периода, представленной на рис. 3. Каждый график на этом рисунке описывает эволюцию периода колебаний в фундаментальной моде и скорости изменения периода от точки переключения моды колебаний до красной границы полосы нестабильности. Как видно на рис. 3, увеличение содержания металлов Z при фиксированном значении массы М сопровождается смещением графика в сторону меньших значений П.

В качестве критерия согласия с наблюдениями будем использовать величину $\delta = |\dot{\Pi}/\dot{\Pi}_{\star} - 1|$, где $\dot{\Pi}_{\star} = 18.19$ с/год — наблюдаемое значение скорости изменения периода, $\dot{\Pi}$ — теоретическая оценка скорости изменения периода в момент времени, когда период пульсаций модели равен наблюдаемому периоду $\Pi = 4.9404$ сут. В таком случае наилучшее согласие с наблюдениями ($\delta \lesssim 10^{-2}$) на диаграмме период—скорость изменения периода показы-



Рис. 3. Скорость изменения периода П как функция периода П для моделей цефеид, пульсирующих в фундаментальной моде при различных предположениях относительно содержания металлов Z. Числами около кривых указаны значения массы звезды M. Кружком показано положение цефеиды V1033 Суд по данным работы Бердникова и др. (2019).

вает эволюционная последовательность Z = 0.022, $M = 6.3 \ M_{\odot}$. С уменьшением Z различие между теоретической и наблюдательной оценками $\dot{\Pi}$ увеличивается и составляет $\delta \approx 0.05$ при Z = 0.020 и $\delta \approx 0.1$ при Z = 0.018.

В табл. 1 приведены фундаментальные параметры цефеиды V1033 Cyg. Содержание металлов Z во втором столбце таблицы соответствует эволюционной последовательности с наименьшим отклонением δ для данного значения массы звезды M. В третьем столбце даны значения возраста t_{ev} , при котором период пульсаций гидродинамической модели составляет $\Pi = 4.9403$ сут. Светимость L, радиус R, эффективная температура $T_{\rm eff}$ и ускорение силы тяжести на поверхности g соответствуют возрасту звезды $t_{\rm ev}$ и определены интерполированием результатов эволюционных расчетов. Приведенные в последнем столбце табл. 1 значения П вычислены по нелинейной зависимости, аппроксимирующей $\Pi(t_{\rm ev})$ для каждой эволюционной последовательности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты вычислений позволяют уверенно заключить, что цефеида V1033 Суд находится на эволюционной стадии гравитационного сжатия гелиевого ядра после главной последовательности и в первый раз пересекает полосу нестабильности, перемещаясь на диаграмме ГР в область красных гигантов. Анализ гидродинамических моделей подтверждает высказанное ранее на основе фотометрических наблюдений предположение, что V1033 Суд пульсирует в фундаментальной моде (Удовиченко и др., 2019). Незначительная роль эффектов потери массы в эволюции звезд промежуточных масс на главной последовательности позволила получить достаточно уверенные теоретические оценки фундаментальных параметров звезды. Принимая во внимание существующие неопределенности в содержаниях металлов ($0.018 \le Z \le 0.022$), полученные теоретические оценки массы заключены в пределах 5.9 $M_{\odot} \leq M \leq 6.3 M_{\odot}$. Следует также заметить, что характерные значения ускорения

M/M_{\odot}	Z	$t_{ m ev},10^{6}$ лет	L/L_{\odot}	R/R_{\odot}	$T_{ m eff},$ K	$\lg g$	П, с/год
5.9	0.018	65.645	1648	44.6	5510	1.910	16.57
6.1	0.020	62.005	1802	45.1	5604	1.915	17.34
6.3	0.022	58.431	2009	45.6	5726	1.919	18.36

Таблица 1. Фундаментальные параметры цефеиды V1033 Суд

силы тяжести на поверхности $(1.91 \le \lg g \le 1.92)$, определенные в данной работе, находятся в удовлетворительном согласии со значением $\lg g = 2.10$, полученным для V1033 Суд методом звездных атмосфер (Мартин и др., 2015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н., Ковтюх В.В., Лемаль Б., Князев А.Ю., Усенко И.А., Боно Д., Гребель Е., Хайду Г., Жуйко С.В., Удовиченко С.Н., Кейр Л.Э., Письма в Астрон. журн. 45, 269 (2019) [L.N. Berdnikov, E.N. Pastukhova, V.V. Kovtyukh, B. Lemasle, A.Yu. Kniazev, I.A. Usenko, G. Bono, E. Grebel, G. Hajdu, S.V. Zhuiko, S.N. Udovichenko, and L.E. Keir, Astron. Lett. 45, 227 (2019)].
- Лак, Ламберт (R.E. Luck and D.L. Lambert), Astron. J. 142, 136 (2011).
- 3. Лак и др. (R.E. Luck, S.M. Andrievsky, V.V. Kovtyukh, W. Gieren, and D. Graczyk), Astron. J. **142**, 51 (2011).
- Лемаль и др. (B. Lemasle, G. Hajdu, V. Kovtyukh, L. Inno, E.K. Grebel, M. Catelan, G. Bono, P. François, A. Kniazev, R. da Silva, and J. Storm), Astron. Astrophys. 618, A160 (2018).
- 5. Мартин и др. (R.P. Martin, S.M. Andrievsky, V.V. Kovtyukh, S.A. Korotin, I.A. Yegorova, I. Saviane, MNRAS **449**, 4071 (2015).
- 6. Пакстон и др. (B. Paxton, J. Schwab, E.B. Bauer, L. Bildsten, S. Blinnikov, P. Duffell, R. Farmer,

J.A. Goldberg, P. Marchant, E. Sorokina, A. Thoul, R.H.D. Townsend, and F.X. Timmes), Astropys. J. Suppl. Ser. **234**, 34 (2018).

- Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., Астрон. журн. 94, 87 (2017) [N.N. Samus', E.V. Kazarovets, O.V. Durlevich, N.N. Kireeva, and E.N. Pastukhova, Astron. Rep. 61, 80 (2017)].
- 8. Тэрнер и др. (D.G. Turner, J. Savoy, J. Derrah, M. Abdel–Sabour Abdel–Latif, and L.N. Berdnikov), Publ. Astron. Soc. Pacific **117**, 207 (2005).
- 9. Удовиченко и др. (S.N. Udovichenko, V.V. Kovtyukh, and L.E. Keir), Odessa Astron. Publ. **32**, 83 (2019).
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. 39, 829 (2013) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. 39, 746 (2013)].
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн., 40, 341 (2014) [Yu.A. Fadeyev, Astron.Lett. 40, 301 (2014)].
- 12. Фадеев (Yu.A. Fadeyev), MNRAS 449, 1011 (2015а).
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. 41, 694 (20156) [Yu.A. Fadeyev, 2015, Astron. Lett. 41, 640 (2015b)].
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. 44, 851 (2018) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. 44, 782 (2018)].
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. 45, 403 (2019) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. 45, 353 (2019)].
- Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. 46, 345 (2020) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. 46, in press (2020)].