

УДК 524.6-337

## ОРИЕНТАЦИЯ ОРБИТЫ ПЛАНЕТЫ У $\tau$ Boo (HD 120136)

© 2018 В. Д. Бычков<sup>1\*</sup>, Л. В. Бычкова<sup>1</sup>, Г. П. Топильская<sup>2</sup>, Ю. Мадей<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017 Россия

<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория варшавского университета, Варшава, 00-011 Польша

Поступила в редакцию 19 июля 2018 года; принята в печать 20 сентября 2018 года

Определен период вращения и параметры глобального магнитного поля  $\tau$  Boo. Это позволило оценить угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения, а также получить оценки угла наклона плоскости орбиты планеты к плоскости экватора звезды.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: планетная система — звезды: индивидуальные:  $\tau$  Boo*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди множества экзопланет, обнаруженных у звезд, есть такие удачно расположенные объекты, наблюдения которых дают очень много информации и позволяют не только определить физические и орбитальные параметры планет, но и рассчитать ориентацию плоскости орбиты планеты относительно экваториальной плоскости звезды и даже направление движения планеты по орбите относительно направления вращения звезды. Найдены планеты, орбиты которых расположены под большими углами к плоскости экватора звезды. Есть и такие планеты, которые обращаются по орбите в направлении, противоположном направлению вращения звезды, так называемые ретроградные планеты. Очевидно, что возникновение и эволюция ретроградных планет проходят совсем не так, как в Солнечной системе. Для однозначного определения угла  $\lambda$  между плоскостью орбиты планеты и экваториальной плоскостью звезды необходимы наблюдения прохождения планеты по диску звезды.

Магнитные поля звезд, имеющих планеты, не только влияют на процесс формирования и физические характеристики планет, они дают дополнительную информацию о системе. Для  $\tau$  Boo, у которой плоскость орбиты экзопланеты наклонена так, что не наблюдается фотометрический транзит, мы предлагаем оценить угол  $\lambda$ , используя результаты наблюдений магнитного поля для выявления его переменности, обусловленной вращением звезды. В данном случае это единственный способ, с помощью которого можно достаточно точно

определить период вращения звезды. Зная период, мы можем получить среднюю магнитную фазовую кривую (МФК) и сделать обоснованные предположения о структуре глобального магнитного поля звезды. А также, предполагая наличие дипольного поля, можем вычислить угол между осью диполя и осью вращения звезды, т.е. угол  $\beta$ .

Угол  $i_*$  между осью вращения звезды и лучом зрения можно вычислить с помощью спектроскопических наблюдений.

Чтобы определить угол  $\lambda$ , необходимо также знать угол  $i_p$  между плоскостью орбиты планеты и картинной плоскостью. Даже в отсутствие фотометрических наблюдений планеты его можно найти, если удалось получить кривые лучевых скоростей для линий в спектре и звезды, и планеты. Таким подходящим для исследований объектом является звезда  $\tau$  Boo с планетой — горячим юпитером.

### 2. ПАРАМЕТРЫ $\tau$ Boo

$\tau$  Boo  $\equiv$  HD 120136  $\equiv$  HR 5185 — спектрально-двойная звезда Sp F6 IV + M2,  $m_V = 4^m 49$ . Ее двойственность неоднократно подтверждалась, но решения для второго компонента неоднозначные. Можно уверенно принять, что второй компонент — красный карлик относительно малой массы спектрального типа M2V на широкой орбите с большим эксцентриситетом  $e = 0.71 \pm 0.22$ , большой полуосью  $109 \pm 7$  а.е. и с периодом 964 года [1]. Физические параметры главного компонента представлены в таблице.

Планета, обращающаяся вокруг главного компонента (звезды F6 IV), обнаружена в 1996 г. по переменности лучевых скоростей [3]. Полуамплитуда

\*E-mail: vbych@sao.ru

Физические параметра главного компонента  $\tau$  Boo

Параметр	Значение $\pm$ Ссылка	
$M^*, M_{\odot}$	$1.39 \pm 0.25$	Borsa et al.[1]
$R^*, R_{\odot}$	$1.42 \pm 0.08$	Borsa et al.[1]
$T_{\text{eff}}, K$	$6399 \pm 45$	Borsa et al.[1]
$t, \text{years}$	$(0.9 \pm 0.5) \times 10^9$	Borsa et al.[1]
$V_e \sin i, \text{km s}^{-1}$	$14.27 \pm 0.06$	Borsa et al.[1]
$P_{\text{rot}}, \text{day}$	$3.1 \pm 0.1$	Catala et al.[2]

лучевых скоростей звезды сравнительно большая,  $K_1 = 469 \pm 5 \text{ m s}^{-1}$ , поэтому орбитальные и физические параметры планеты<sup>1</sup> определены с высокой точностью:

- $M_{\text{pl}} \sin i_{\text{pl}} = 4.13_{-0.20}^{+0.35} M_{\text{Jup}}$ ,  $a = 0.046 \text{ a.e.}$ ;
- орбитальный период  $P_{\text{orb}} = 3.^{\text{d}}31249 \pm 0.^{\text{d}}00003$ ;
- эксцентриситет  $e = 0.0787_{-0.0246}^{+0.0382}$ .

Согласно [4], радиус планеты составляет  $R_{\text{pl}} = 1.15 \pm 0.10 R_{\text{Jup}}$ . Плоскость орбиты планеты наклонена к лучу зрения на угол  $i_{\text{pl}} = 44.^{\circ}5 \pm 1.^{\circ}5$  [5]. Можно заключить, что планета — горячий юпитер, который обращается вокруг звезды Sp F6IV по очень тесной и почти круговой орбите. Согласно современным представлениям о происхождении планет, формирование планет-гигантов на таких малых расстояниях от звезды невозможно. Следовательно, планета оказалась на наблюдаемом ныне расстоянии вследствие миграции [6].

Поскольку  $\tau$  Boo — двойная звезда, причиной миграции протопланеты могли быть возмущения со стороны второго компонента. В таком случае мигрировавшая планета изначально оказывается вблизи звезды на сильно вытянутой орбите, ориентация которой определяется направлением возмущающей силы, затем следует постепенная циркуляризация орбиты под действием приливных сил со стороны главного компонента. Об этом также свидетельствует близость периодов вращения звезды и обращения планеты вокруг звезды. В этом случае плоскость орбиты планеты и плоскость орбиты второго, возмущающего, компонента двойной системы должны быть компланарны. Таким образом в настоящий момент планета-гигант занимает наиболее устойчивую к возмущениям орбиту.

По спектроскопии высокого разрешения в  $L$ -полосе ИК-диапазона выделены спектральные линии планеты и измерена переменность

<sup>1</sup>[http://exoplanet.eu/catalog/tau\\_boo\\_b](http://exoplanet.eu/catalog/tau_boo_b)

лучевых скоростей планеты с полуамплитудой  $K = 115 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$  [7, 8]. Измерение лучевых скоростей звезды и планеты позволило вычислить массу планеты:  $M_{\text{pl}} = 5.90_{-0.20}^{+0.35} M_{\text{Jup}}$  [8].

Можно вывести приближенное условие для возможности наблюдения планеты фотометрическим методом, когда вследствие прохождения ее по видимому диску звезды (транзиту) при обращении вокруг звезды меняется блеск всей системы:

$$\cos i_{\text{pl}} \leq \frac{R^* + R_{\text{pl}}}{a}.$$

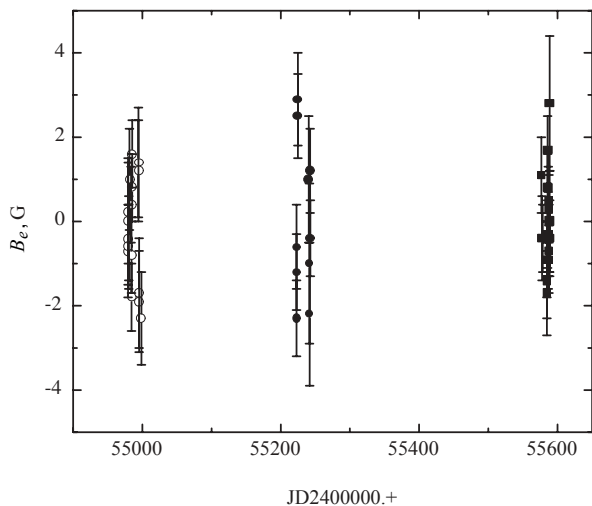
Для  $\tau$  Boo  $\cos i_{\text{pl}} \geq 0.155$ , отсюда  $i_{\text{pl}} \leq 81^{\circ}$ . Таким образом, у  $\tau$  Boo угол  $i_{\text{pl}}$  слишком мал для того чтобы было возможно наблюдать планету в режиме фотометрии, поэтому фотометрическую информацию об ориентации плоскости орбиты планеты относительно экваториальной плоскости звезды получить нельзя.

### 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПЕРИОД ВРАЩЕНИЯ $\tau$ Boo

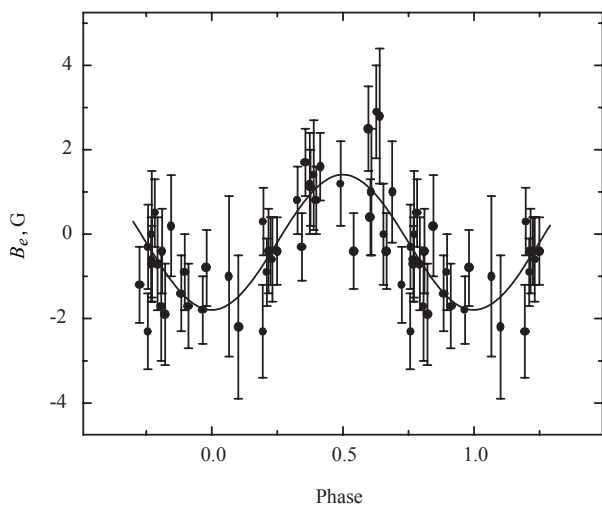
Слабое магнитное поле (МП) звезды было обнаружено и измерено спектрополяриметрическим методом [2]. Более детально поведение глобального магнитного поля было исследовано в работе [9], авторы которой провели 44 измерения продольной компоненты глобального магнитного поля тремя короткими сериями на протяжении 609 дней. Оценки в зависимости от момента их получения, выраженного в  $JD$ , представлены на рис. 1. Используя оценки МП из исследования [9] и методы поиска периода, описанные в работе [10], мы нашли период вращения звезды, равный  $P_{\text{rot}} = 3.0342$  дня, что вполне согласуется с величиной, полученной в работе [11].

По профилям линий в спектре  $\tau$  Boo в работе [2] были определены микротурбулентная скорость  $\xi = 5.5 \text{ km s}^{-1}$  и  $V_{\text{eq}} \sin i_* = 14.4 \text{ km s}^{-1}$  в предположении однородного вращения атмосферы звезды, или  $V_{\text{eq}} \sin i_* = 15.9 \text{ km s}^{-1}$  для скорости вращения на экваторе с учетом возможного дифференциального вращения атмосферных слоев. Зная период вращения звезды и ее радиус, находим величину экваториальной скорости  $V_{\text{eq}} = 2\pi R/P = 33 \text{ km s}^{-1}$  и угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения:  $\sin i_* = 0.48 \pm 0.02$ ,  $i_* = 32^{\circ} \pm 2^{\circ}$ .

Как видно на рис. 1, все измерения представлены тремя короткими сериями — первый продолжительностью 19 дней (16 измерений), второй — 20 дней (10 измерений) и третий — 12 дней (18 измерений), разнесенными приблизительно на 300 дней каждый. За время наблюдений совершилось около 184 оборотов планеты вокруг звезды



**Рис. 1.** Оценки магнитного поля из работы [9]: по данным первого сета — пустые кружочки, второго сета — заполненные кружочки, оценки третьего сета — заполненные квадраты.



**Рис. 2.** Средняя магнитная фазовая кривая  $\tau$  Boo, полученная по измерениям из работы [2]. Обозначения такие же, как и на рис. 1.

и около 201 оборота звезды вокруг своей оси. По 44 измерениям магнитного поля из работы [9] нами получена средняя МФК для  $\tau$  Boo, представленная на рис. 2.

Средняя МФК описывается уравнением

$$B_e(t) = B_0 + B_1 \cos(\phi),$$

где

$$\phi = 2\pi(t - T_0)/P.$$

Здесь  $P$  — период вращения звезды, равный 3.0342 дня,  $B_0 = -0.19 \pm 0.16$  Гс — постоянная

составляющая, смещение фазовой кривой относительно нуля,  $B_1 = 1.61 \pm 0.26$  Гс — полуамплитуда изменений магнитного поля. Соответственно  $B_{l(\min)} = -1.80 \pm 0.31$  Гс,  $B_{l(\max)} = 1.42 \pm 0.30$  Гс.

Как видно на рис. 2, МФК для  $\tau$  Boo представляет собой почти правильную синусоиду, немного смещенную в отрицательные значения напряженности магнитного поля. Исходя из этого, можно предположить, что глобальное магнитное поле близко по структуре к центральному дипольному. Следуя формализму Стиббса—Престона [12, 13], можно определить угол  $\beta$  между осью диполя и осью вращения звезды:

$$B_l = \frac{1}{20} \frac{15+u}{3-u} B_p \left( \cos \beta \cos i_* + \sin \beta \sin i_* \cos \frac{2\pi t}{P} \right),$$

$$r = \frac{B_{l(\min)}}{B_{l(\max)}} = \frac{\cos \beta \cos i_* - \sin \beta \sin i_*}{\cos \beta \cos i_* + \sin \beta \sin i_*},$$

где

$$i_* = \arctan \left[ \left( \frac{1-r}{1+r} \right) \cot \beta \right].$$

Отсюда получаем  $\tan \beta = 13.6$ ,  $\beta = 86^\circ \pm 3^\circ$ . Ось диполя наклонена к лучу зрения в фазе  $B_{l(\max)}$  на угол  $\chi = 180^\circ - (i_* + \beta) = 62^\circ \pm 4^\circ$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Период вращения звезды 3.0342 дня оказывается близок к периоду орбитального движения планеты 3.31249 дня, что в случае очень тесной орбиты,  $a = 0.046$  а.е., может быть следствием действия приливных сил.

Рассмотрим угол  $\lambda$  между плоскостью орбиты планеты и плоскостью экватора звезды. Возможны два варианта: 1) плоскость орбиты и ось вращения наклонены в одну сторону относительно луча зрения, тогда  $\lambda = i_{pl} + i_* = 76^\circ 5' \pm 2^\circ 5'$ ; 2) плоскость орбиты и ось вращения наклонены в разные стороны относительно луча зрения, тогда  $\lambda = i_{pl} - i_* = 12^\circ 5' \pm 2^\circ 5'$ . Убрать неоднозначность результата в рамках предложенного подхода не представляется возможным. Однако вариант  $\lambda = 76^\circ 5'$ , на наш взгляд, представляется более предпочтительным: если протопланетный диск формируется в экваториальной плоскости вращения звезды, следует ожидать, что планеты данной системы также будут обращаться вокруг звезды в этой плоскости. К сожалению, пока нет надежных статистических данных в пользу этого предположения. Как было показано в работе [14], характерное время синхронизации вращения звезды и

газового юпитера мало по сравнению со временем жизни системы. Следует учитывать также периодическое сильное гравитационное влияние на орбиту планеты-гиганта второго компонента, что вызвало миграцию на очень малое расстояние к главному компоненту, одновременно придав орбите большой угол наклона к плоскости экватора главной звезды. Мощное воздействие приливных сил впоследствии привело к циркуляризации орбиты и синхронизации орбитального движения с вращением звезды. Слабым местом этого сценария является малый возраст звезды, все процессы должны пройти менее чем за 1 млрд лет. Однако ускоренному протеканию рассмотренных процессов могло способствовать большое количество газа в системе, остатки которого и сейчас наблюдаются в виде околозвездных дисков вокруг главного и вторичного компонентов [15]. Кроме того, планета может взаимодействовать с окружающим веществом благодаря наличию собственного магнитного поля, напряженность которого может достигать от 1 до 60 Гс [16, 17], тем более что она обращается вокруг главной звезды на таком маленьком расстоянии  $a = 0.046$  а.е. и имеет массу  $5.90 M_{\text{Юп}}$ . Возможно, что такое сильное, постоянно смещающееся ( $P_{\text{orb}} \neq P_{\text{rot}}$ ,  $\epsilon \neq 0$ ) гравитационное воздействие со стороны главной звезды приводит к еще одному эффекту — необычайно короткому циклу магнитной активности (аналогичному солнечному), длительность которого составляет всего 120 (240) дней, что на 1–2 порядка короче циклов, которые встречаются у звезд такого типа [18].

По нашему мнению, в относительно близком времени вполне вероятно слияние планеты и главного компонента. Наблюдение такого неординарного события будет крайне интересным с точки зрения эволюции звезд с планетными системами.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения этой работы В. В. Цымбалу и Г. Г. Ва-

лявину. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00043, направление «Экзопланеты»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Borsa, G. Scandariato, M. Rainer, et al., *Astron. and Astrophys.* **578**, A64 (2015).
2. C. Catala, J.-F. Donati, E. Shkolnik, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **374**, L42 (2007).
3. R. P. Butler, G. W. Marcy, E. Williams, et al., *Astrophys. J.* **474**, L115 (1997).
4. C. Leigh, A. Collier Cameron, K. Horne, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **344**, 1271 (2003).
5. M. Brogi, I. A. G. Snellen, R. J. de Kok, et al., *Nature* **486**, 502 (2012).
6. H. Ngo, H. A. Knutson, S. Hinkley, et al., *Astrophys. J.* **827**, 8 (2016).
7. H. J. Hoeijmakers, I. A. G. Snellen, and S. E. van Terwisga, *Astron. and Astrophys.* **610**, A47 (2018).
8. A. C. Lockwood, J. A. Johnson, C. F. Bender, et al., *Astrophys. J.* **783**, L29 (2014).
9. R. Fares, C. Moutou, J.-F. Donati, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435**, 1451 (2013).
10. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455**, 2567 (2016).
11. M. W. Mengel, R. Fares, S. C. Marsden, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 4325 (2016).
12. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950).
13. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 547 (1967).
14. A. P. Showman and T. Guillot, *Astron. and Astrophys.* **385**, 166 (2002).
15. J. Patience, R. J. White, A. M. Ghez, et al., *Astrophys. J.* **581**, 654 (2002).
16. A. Sánchez-Lavega, *Astrophys. J.* **609**, L87 (2004).
17. J.-M. Grießmeier, A. Stadelmann, T. Penz, et al., *Astron. and Astrophys.* **425**, 753 (2004).
18. S. V. Jeffers, M. Mengel, C. Moutou, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 5266 (2018).

### Orbit Orientation of the Planet in $\tau$ Boo (HD 120136)

V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, G. P. Topilskaja, and J. Madej

We determined the rotation period and the parameters of the global magnetic field of  $\tau$  Boo. This allowed us to estimate the inclination of the rotational axis of the star to the line of sight, as well as to obtain estimates of the inclination of the planet's orbital plane to the stellar equator.

Keywords: stars: magnetic field—stars: planetary system—stars: individual:  $\tau$  Boo