УДК 524.387

О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПЛАНЕТЫ ОКОЛО ПУЛЬСАРА PSR B0525+21

© 2019 г. А. Е. Родин^{*}

Пущинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра Физического института имени П.Н. Лебедева

Поступила в редакцию 10.09.2018 г.; принята в печать 19.10.2018 г.

На примере пульсара B0525+21 предложено принципиально иное объяснение резких изменений периода вращения, наблюдаемых у многих пульсаров, а именно, присутствие около пульсара компаньона, движущегося по высокоэксцентрической орбите. Приведена модель, описывающая поведение барицентрических остаточных уклонений пульсара B0525+21, полученных по наблюдениям на радиотелескопах DSS 13 и DSS 14 в Лаборатории реактивного движения и радиотелескопе им. Ловелла в Джодрелл-Бэнк. Предлагаемая модель описывает движение PSR B0525+21, находящегося в двойной системе, где второй компонент является планетой, обращающейся по эллиптической орбите с периодом P = 27.74 лет, большой полуосью a = 10.35 а. е., эксцентриситетом e = 0.96 и массой $m_c = 0.39M_{\oplus}$. Измерена угловая скорость движения перицентра, $\dot{\omega} = -0.67$ рад/период, наличие которой свидетельствует о том, что вокруг пульсара B0525+21 имеется газопылевой диск или пояс астероидов.

DOI: 10.1134/S0004629919030095

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди нескольких тысяч подтвержденных экзопланет, известных на настоящий момент, к пульсарным планетам относятся шесть: планетная система, состоящая из трех планет, обращающихся вокруг пульсара PSR 1257+12 [1], и по одному планетному компаньону у пульсаров PSR B1620– 26 [2], PSR J1719–1438 [3] и PSR B0329+54 [4]. Однако среди пульсаров существует еще, по крайней мере, один потенциальный обладатель планеты — пульсар B0525+21 [5].

Пульсар B0525+21 с момента своего открытия в 1968 г. Стаэлином и Рейфенштейном [6] изучался многими исследователями. В течение некоторого времени он считался самым долгопериодичным известным пульсаром, интересным формой своего широко разделенного двойного импульса [7]. Кроме того, активно исследовались поляризационные свойства пульсара B0525+21, впервые подробно описанные в работе Стаэлина и Рейфенштейна [8], а также Манчестера [9]. В 1971 г. Ричардс и Робертс переопределили вращательные и астрометрические параметры пульсара на основе данных из работы [10].

Начиная с момента открытия пульсар B0525+21 наблюдался в Лаборатории реактивного движения [11], а затем в Джодрелл-Бэнк [12]. В результате анализа многолетнего ряда наблюдений, охватывающего период в 36 лет, посредством тайминга были получены остаточные уклонения PSR B0525+21, представленные в работе Хоббса и др. [12].

Главной целью данной работы является демонстрация того, что полученные остаточные уклонения моментов прихода импульса (МПИ) могут быть объяснены наличием на орбите вокруг рассматриваемого пульсара планетного компаньона, обращающегося по высокоэксцентрической орбите. Такое объяснение в корне отличается от общепринятого, основанного на наложении эффектов нерегулярностей вращения и сбоев периода (глитчей). По нашему мнению предложенное объяснение с помощью высокоэксцентрической орбиты имеет гносеологическое преимущество в сравнении со сбоями периода, так как, во-первых, хорошо объясняет ход остаточных уклонений МПИ, вовторых, имеет более глубокие и интересные астрофизические последствия, поскольку позволяет пролить новый свет на эволюцию планетных систем, возникших до и/или после образования пульcapa.

В литературе по пульсарам широко применяется термин "шум хронометрирования" (timing noise). Объяснение нерегулярностей вращения пульсаров с помощью этого словосочетания не является по нашему мнению астрофизическим, т.к.

^{*}E-mail: rodin@prao.ru

скрывает за собой по сути нежелание или неумение разобраться в физике явления. Нерегулярности вращения вызываются совершенно разными астрофизическими причинами: от перестройки внутреннего строения и звездотрясений до взаимодействий пульсара с окружающими гравитирующими телами, прецессии оси вращения и эффектами прохождения импульса в среде распространения. Данная статья предлагает конкретное объяснение на основе гравитационного взаимодействия пульсара с компаньоном.

Искусственное отбрасывание альтернативной точки зрения на объяснение вариаций вращения пульсаров под предлогом "соблюдения критической точки зрения" не имеет под собой основания, т.к. предложенный сценарий с переходом планеты на высокоэксцентрическую орбиту в природе принципиально возможен, и требуется только время для обнаружения таких орбитальных систем.

Следующие разделы данной статьи посвящены описанию наблюдательных данных и их обработке с точки зрения наличия у данного пульсара планеты. В качестве результата приведены орбитальные параметры планеты и ее масса. В конце статьи обсуждается причина возникновения обнаруженной в данном исследовании прецессии линии апсид планетной орбиты, и делается вывод о наличии вокруг пульсара газопылевого диска или пояса астероидов.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

В данной работе использовались остаточные уклонения, полученные в двух обсерваториях.

1. Лаборатория реактивного движения (США). Использовался радиотелескоп DSS 13 диаметром 26 м, ширина полосы пропускания 12 МГц, и радиотелескоп DSS 14 диаметром 64 м, ширина полосы пропускания 32 МГц. Рабочая частота 2388 МГц, интервал наблюдений 1969— 1983 гг. [11]. Всего получено 320 МПИ.

2. Обсерватория Джодрелл-Бэнк (Великобритания). Использовался радиотелескоп им. Ловелла диаметром 76 м. Наблюдения проводились на частотах 408, 610, 910, 1410, 1630 МГц. Интервал наблюдений 1969—2006 гг. Всего получено 954 МПИ [12]. Наблюдения, использованные в работе Хоббса и др. [12] для тайминга, включали в себя не только данные Джодрелл-Бэнк, но и самые ранние МПИ, полученные в Лаборатории реактивного движения [11]. Остаточные уклонения были получены с использованием ПО для анализа пульсарных наблюдений ТЕМРО2 [13].

Данных после 2006 г. в свободном доступе, к сожалению, найдено не было, поэтому продолжить орбиту с 2006 г. по настоящее время пока не представляется возможным.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Как уже было сказано во Введении, вид остаточных уклонений МПИ с резкими изломами допускает совершенно иную астрофизическую интерпретацию, помимо ставшего уже традиционным объяснения, основанного на сбое периода [14]. В данной работе мы предлагаем интерпретировать наблюдаемые скачки периода наличием планеты, обращающейся вокруг пульсара по высокоэксцентрической орбите. Направление движения пульсара вокруг центра масс двойной системы вблизи момента прохождения перицентра резко меняется, что приводит к изменению видимой вращательной частоты пульсара и, как следствие, к резкому изменению вращательной фазы, что и наблюдается в остаточных уклонениях МПИ PSR B0525+21.

Так как в качестве рабочей гипотезы принято наличие у пульсара планетного компаньона на эллиптической орбите, необходимо описать орбитальное движение как функцию времени. Традиционно это делается посредством уравнения Кеплера, связывающего эксцентрическую и среднюю аномалию. Уравнение Кеплера решается методом итераций либо посредством разложения в ряд по степеням эксцентриситета. При описании движения пульсара, находящегося в двойной системе, измеряется только одна компонента его радиусавектора — проекция на луч зрения *z*, которая записывается в следующем виде:

$$z = r\sin i \sin(v + \omega), \tag{1}$$

где r — радиус-вектор пульсара относительно барицентра двойной системы, i — угол между плоскостью орбиты и плоскостью неба в точке, где расположен барицентр системы, v — истинная аномалия пульсара, ω — долгота перицентра.

Радиус-вектор r записывается следующим образом: $r = a_p(1 - e \cos E)$, где a_p — большая полуось пульсарной орбиты, e — эксцентриситет орбиты, E — эксцентрическая аномалия, которая связана с истинной аномалией v с помощью соотношений

$$\cos v = \frac{\cos E - e}{1 - \cos E}, \quad \sin v = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{1 - e \cos E}.$$
 (2)

Подставляя выражения для радиуса-вектора r, cos v и sin v в уравнение (1), а также учитывая, что вариации вращения пульсара носят сложный характер и описываются полиномом четвертой степени, окончательно для модели, описывающей поведение остаточных уклонений, получим:

$$z = a_p \left(\cos E - e \sin(\omega + \dot{\omega}t) + (3) + \sqrt{1 - e^2} \sin E \cos(\omega + \dot{\omega}t) \right) + c + bt + pt^2 + st^3 + rt^4.$$



Рис. 1. Барицентрические остаточные уклонения (точки) пульсара B0525+21 и теоретическая кривая (черная линия), описывающая движение пульсара в двойной системе. Время в годах отсчитывается от момента прохождения перицентра.

Так как в формулу (3) в качестве независимых аргументов входят сразу две величины — время t и эксцентрическая аномалия E, то для приведения к одному аргументу t используется разложение эксцентрической аномалии в ряд.

Для того, чтобы получить ряды, представляющие собой решение уравнения эллиптического движения для значений эксцентриситета, заключенных в интервале 0 < e < 1, не ограниченных пределом Лапласа (e < 0.663), и которые являются сходящимися для всех действительных значений эксцентрической аномалии, было использовано разложение в ряд Фурье. Тогда формула для эксцентрической аномалии, выражаемой через функции Бесселя первого рода J_s , записывается следующим образом [15, 16]:

$$E(M) = M(t) +$$

$$+ 2\sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{s} J_s(se) \sin(sM(t)).$$
(4)

При подстановке разложения (4) в формулу (3) получаем модель, описывающую поведение остаточных уклонений пульсара B0525+21 как функцию времени t.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная модель движения была вписана в барицентрические остаточные уклонения пульсара PSR B0525+21 (см. рис. 1). Были определены период обращения P, эксцентриситет e, а также проекция большой полуоси на луч зрения $a_p \sin i$. Их значения приведены в таблице.

Выражение для функции масс выглядит следующим образом:

$$f(m_p) = \frac{(m_c \sin i)^3}{(m_p + m_c)^2} = \frac{4\pi^2}{G} \frac{(a_p \sin i)^3}{P^2}.$$
 (5)

Используя формулу (5) и определенные из остаточных уклонений значения периода P и проекции большой полуоси $a_p \sin i$, а также предполагая, что масса системы примерно равна массе пульсара $(m_p + m_c) \simeq m_p$ и эта масса составляет $m_p =$ = 1.44 M_{\odot} , можно выразить и вычислить массу

Таблица 1. Орбитальные параметры PSR B0525+21

Параметры	Величина
Проекция большой полуоси $a_p \sin i$, мс	4.24 ± 0.02
Большая полуось отн. орбиты a , a. e.	10.35 ± 0.06
Орбитальный период, годы	27.74 ± 0.02
Эксцентриситет, e	0.963 ± 0.006
Масса планеты, $m \sin i, M_\oplus$	0.387 ± 0.002
Угловая скорость движения	-0.67 ± 0.04
перицентра, $\dot{\omega}$, рад/период	

планетного компаньона *m_c* по следующей формуле:

$$m_c \sin i = a_p \sin i \sqrt[3]{\frac{4\pi^2}{GP^2}} \simeq 0.39 M_{\oplus}.$$
 (6)

Большая полуось относительной орбиты *а* определяется из третьего закона Кеплера:

$$a = \sqrt[3]{m_p P^2} \simeq 10.35 \text{ a. e.}$$
 (7)

Кроме того, в описанной модели была определена угловая скорость движения перицентра $\dot{\omega} = -0.67$ рад/период, что является важной отличительной особенностью рассматриваемой двойной системы. Все указанные выше параметры эллиптического движения пульсарной планеты, а также ее масса представлены в таблице.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Взятая в качестве рабочей гипотеза существования вокруг пульсара планеты на высокоэксцентрической орбите позволила построить модель движения пульсара в двойной системе и на статистически значимом уровне определить орбитальные параметры и массу планеты.

Следует особо отметить величину эксцентриситета e = 0.96, близкую к единице, что может говорить, по нашему мнению, о том, что планета обращалась вокруг звезды еще до образования пульсара. В процессе взрыва сверхновой звезда потеряла почти половину своей массы, и это привело к переходу планеты на высокоэксцентрическую орбиту.

В качестве первой, но не основной причины и для полноты объяснения измеренной из наблюдений угловой скорости движения линии апсид $\dot{\omega}$ следует упомянуть релятивистское движение перицентра. Смещение перицентра планеты, движущейся в гравитационном поле пульсара, определяется по следующей формуле [17]:

$$\delta\varphi = \frac{6\pi Gm_p}{c^2 a(1-e^2)},\tag{8}$$

где *с* — скорость света.

Применительно к планете около пульсара В0525+21 смещение перицентра составляет $\delta \varphi \simeq 23.7 \times 10^{-7}$ рад/период, если масса пульсара равна $m_p = 1.44 \ M_{\odot}$, или $\delta \varphi \simeq 7.4 \times 10^{-7}$ рад/период, если $m_p = 3 \ M_{\odot}$. Обе величины существенно меньше наблюдаемого значения.

Главной, по нашему мнению, причиной существования наблюдаемой угловой скорости движения линии апсид является отличие поведения гравитационного потенциала от закона 1/r [18] из-за наличия распределенной массы внутри орбиты планеты. На роль такой массы, на наш взгляд, хорошо подходит пояс астероидов или газопылевой диск, сформировавшийся вокруг пульсара из остатков вещества сверхновой.

Таким образом, на основе модели, описывающей наблюдательные данные пульсара В0525+21, можно выдвинуть гипотезу о происхождении его планеты. Предполагаемая планета сформировалась на околокруговой орбите вокруг массивной звезды, ставшей впоследствии пульсаром. В процессе своей эволюции звезда перешла в стадию сверхновой, потеряв часть своей массы, а затем в стадию нейтронной звезды. При этом в течение эволюции родительской звезды планета перешла на высокоэксцентрическую орбиту, а из остатков вещества сверхновой образовался либо газопылевой диск, либо пояс астероидов. Это привело к тому, что в процессе удаления планеты от центрального тела она "набирает" дополнительную гравитирующую массу, в результате чего наблюдается прецессия перицентра. Именно в таком состоянии в настоящее время находится планетная система вокруг пульсара В0525+21.

Для описания движения планеты по орбите с прецессией линиии апсид использовалось следующее уравнение движения:

$$\ddot{r}(t) = -\frac{\mu(r)}{r^2} = -\frac{mr^{\epsilon}}{r^2} = -\frac{m}{r^{2-\epsilon}},$$
(9)

где функция $\mu(r) = mr^{\epsilon}$ задает степенной закон распределения массы в зависимости от расстояния r. Скорость прецессии долготы перицентра $\dot{\omega}$ зависит от показателя ϵ . Для значения $\dot{\omega} = -0.67$ рад/период величина $\epsilon = 0.183 \pm 0.005$ (см. рис. 2). Для расчета величины ϵ использовался полуаналитичеекий метод: путем компьютерного моделирования строилась экспериментальная зависимость $\epsilon(\dot{\omega})$, и затем бралось значение ϵ , соответствующее измеренной величине $\dot{\omega}$.

Заслуживает отдельного упоминания тот факт, что при отличии поведения гравитационного потенциала от закона 1/r планета может удержаться вокруг пульсара при сбросе более чем половины массы звезды. Если часть сброшенной массы остается в промежутке расстояний между начальной орбитой и апоцентром новой орбиты, то, хотя скорость планеты превышает вторую космическую, распределенная между орбитами масса выброшенного вещества удерживает планету в поле тяготения, и система не распадается.

В качестве независимого подтверждения наличия газо-пылевого диска или пояса астероидов вокруг пульсара B0525+21 могли бы стать его наблюдения в инфракрасной области. Обнаружение избытка инфракрасного излучения послужило бы дополнительным аргументом в пользу предложенной в данной работе модели.



Рис. 2. Прецессия планетной орбиты около пульсара В0525+21. Пульсар находится в точке с координатами (0,0).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы:

1. Предложено принципиально иное объяснение резких изменений периода вращения, наблюдаемых у многих пульсаров, основанное на наличии вокруг пульсара компаньона, движущегося по высокоэксцентрической орбите, на примере пульсара PSR B0525+21.

2. Определена модель, описывающая периодические вариации, наблюдаемые в остаточных уклонениях пульсара B0525+21, полученных по наблюдениям в Лаборатории реактивного движения и Джодрелл-Бэнк за период в 36 лет. Полученная модель описывает движение исследуемого пульсара в двойной системе, где вторым компонентом является планета.

3. На статистически значимом уровне определены орбитальные параметры планеты: период обращения, проекция большой полуоси, эксцентриситет орбиты, угловая скорость движения перицентра и ее масса.

4. Наблюдаемая прецессия линии апсид объясняется наличием вокруг пульсара распределенной гравитирующей массы. На роль такой массы предлагается пояс астероидов или газо-пылевой диск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. A. Wolszczan and D. Frail, Nature 355, 145 (1992).
- S. Sigurdsson, H. B. Richer, B. M. Hansen, I. H. Stairs, and S. E. Thorsett, Science **301**, 193 (2003).
- 3. M. Bailes, S. D. Bates, V. Bhalerao, N. D. R. Bhat, *et al.*, Science **333**, 1717 (2011).
- 4. Е. Д. Старовойт, А. Е. Родин, Астрон. журн. **94**, 944 (2017).

- 5. А. Е. Родин, Е. Д. Старовойт, Астрон. циркуляр № 1642, 1 (2018).
- D. H. Staelin and E. C. Reifenstein, Science 162, 1481 (1968).
- G. A. Zeissing and D. W. Richards, Nature 222, 150 (1969).
- D. H. Staelin and E. C. Reifenstein, Astrophys. J. 156, L121 (1969).
- 9. R. N. Manchester, Astrophys. J. 167, L101 (1971).
- D. W. Richards and J. A. Roberts, *The Crab Nebula*, Proc. IAU Symp. 46 held at Jodrell Bank, England, August 5–7, 1970, edited by R. D. Davies and F. Graham-Smith (Dordrecht, Reidel), 211 (1971).
- 11. G. S. Downs and P. E. Reichley, Astrophys. J. **53**, 169 (1983).
- 12. G. B. Hobbs, A. G. Lyne, and M. Kramer, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **402**, 1027 (2010).
- 13. G. B. Hobbs, R. T. Edwards, and R. N. Manchester, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **369**, 655 (2006).
- W. Z. You, H. X. Wang, R. N. Manchester, X. J. Wu, and J. Zhang, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 354, 811 (2004).
- D. Brouwer and G. M. Clemence, *Methods of Celestial Mechanics* (New York: Academic Press, 1961).
- Г. Н. Дубошин, Небесная механика. Основные задачи и методы (М.: Наука, 1968).
- 17. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика: Теория поля* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003).
- 18. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика: Механика* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004).