

---

Издаётся Международной общественной организацией “Астрономическое общество”  
и Государственным астрономическим институтом имени П.К. Штернберга МГУ

---

№ 1642, 2018 июня 10

---

**О возможности существования планеты  
около пульсара PSR B0525+21**

**А.Е. Родин и Е.Д. Старовойт**

*Пуцинская радиоастрономическая обсерватория,  
Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии наук, Пуцино, Московская область, 142290, Россия  
E-mail: rodin@pra0.ru*

Поступила в редакцию 6 июня 2018 г.

**Резюме.** 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 имени Ловелла в Джодрелл Бэнк, с точки зрения существования около пульсара планеты, обращающейся по эллиптической орбите с периодом  $P = 27.74$  лет, большой полуосью  $a = 10.35$  а.е., эксцентриситетом  $e = 0.96$  и массой  $m_c \sin i = 0.39 M_{\oplus}$ .

## Введение

Среди нескольких тысяч подтверждённых экзопланет, известных на настоящий момент, к пульсарным планетам относятся шесть из них: планетная система, состоящая из трёх 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 ещё по крайней мере один потенциальный обладатель планеты – пульсар B0525+21.

Начиная с момента открытия пульсар B0525+21 наблюдался в Лаборатории реактивного движения [5], а затем в Джодрелл Бэнк [6]. В результате анализа многолетнего ряда наблюдений, охватывающих период в 36 лет, посредством тайминга были получены остаточные уклонения PSR B0525+21, представленные в работе Хоббса и др. [6]. Интересной особенностью стало то, что полученные остаточные уклонения имеют вид, который может быть объяснён наличием на орбите вокруг данного пульсара планетного компаньона, обращающегося по высокоэксцентрической орбите.

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 её масса.

## Наблюдения

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

1. Лаборатории 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. [5]. Всего получено 320 МПИ.

2. Обсерватории Джодрелл Бэнк, Англия. Использовался радиотелескоп имени Ловелла диаметром 76 м. Наблюдения проводились на частотах 408, 610, 910, 1410, 1630 МГц. Интервал наблюдений 1969–2006 гг. Всего получено 954 МПИ [6]. Наблюдения, использованные в работе Хоббса и др. [6] для тайминга, включали в себя не только данные Джодрелл Бэнк, но и самые ранние МПИ, полученные в Лаборатории реактивного движения [5]. Остаточные уклонения были получены с использованием ПО для анализа пульсарных наблюдений TEMP02 [7].

## 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, связанного со сбоем периода [8]. 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 эксцентриситет 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 радиус-вектора – проекция на луч зрения  $z$ , которая записывается в следующем виде:

$$z = r \sin i \sin(v + \omega), \quad (1)$$

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,  $\omega$  – 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,  $E$  – эксцентриситетная аномалия, которая связана с истинной аномалией  $v$  с помощью соотношений

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

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

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

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

Для того, чтобы получить ряды, представляющие собой решение уравнения эллиптического движения для значений эксцентриситета, заключённых в интервале  $0 < e < 1$ , и которые являются сходящимися для всех действительных значений эксцентрисической аномалии, было использовано разложение в ряд Фурье. Тогда формула для эксцентрисической аномалии, выражаемой через функции Бесселя первого рода  $J_s$ , записывается следующим образом [9]:

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

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

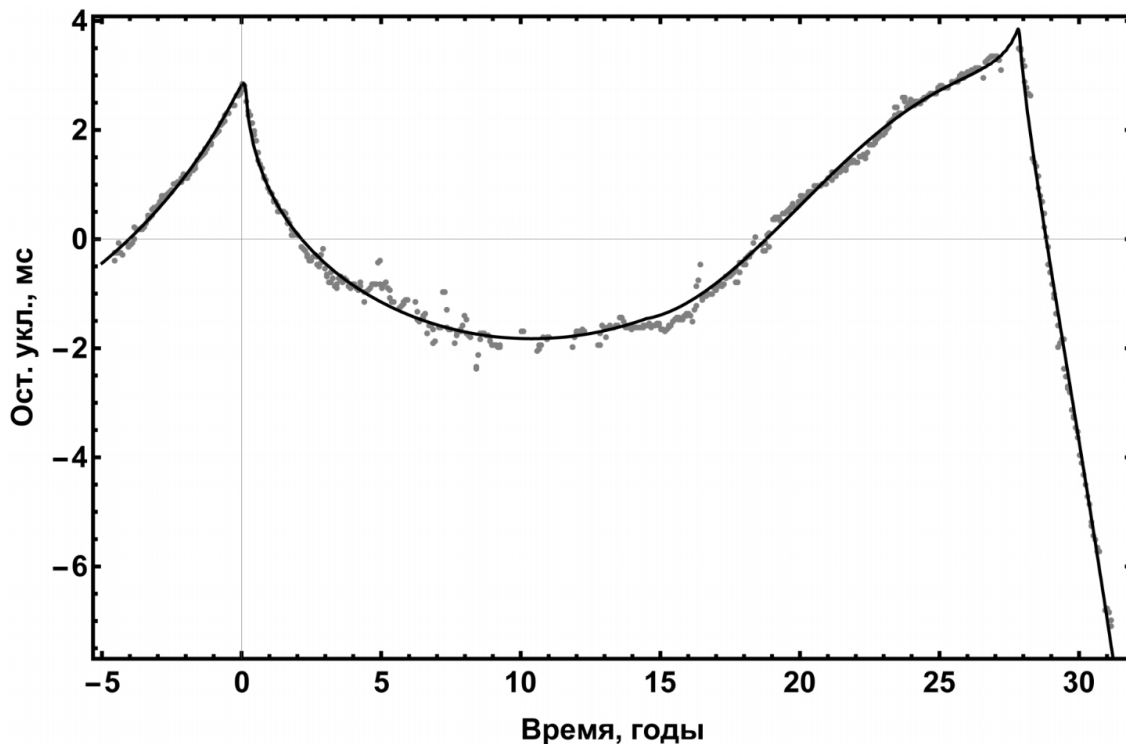


Рис. 1: Остаточные уклонения (серые точки) пульсара PSR B0525+21 и теоретическая кривая (чёрная сплошная линия), построенная на основе модели движения планеты. По горизонтальной оси отложено время в годах. За начало принят момент прохождения перицентра орбиты.

## Результаты

С помощью вышеописанной модели движения (формула (3)), которая была определена путем разложения в ряд Фурье эксцентрической аномалии, в остаточные отклонения, показанные на рис. 1, была вписана гармоническая кривая, описывающая движение предполагаемой планеты, обращающейся по высокоэксцентрической орбите; на графике эта кривая показана сплошной чёрной линией. Используя предложенную модель движения и полученную кривую, описывающую гармоническую модуляцию в остаточных отклонениях пульсара B0525+21, были определены период обращения  $P$ , эксцентриситет  $e$ , а также проекция большой полуоси на луч зрения  $a_p \sin i$ .

Выражение для функции масс выглядит следующим образом:

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

Используя формулу (5) и определённые из графика значения периода 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 планетного компаньона  $m_c$  по следующей формуле:

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

Большая полуось относительной орбиты  $a$  определяется из третьего закона Кеплера:

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

Кроме того, в описанной модели была определена угловая скорость движения перицентра, что является важной отличительной особенностью рассматриваемой двойной системы; эта скорость равна  $\dot{\omega} = -0.67$  рад/период. Все вышеуказанные параметры эллиптического движения пульсарной планеты, а также её масса представлены в Таблице 1.

Таблица 1: Орбитальные элементы двойной системы

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

## Заклучение

Взятая в качестве рабочей гипотеза существования вокруг пульсара планеты на высокоэксцентрической орбите позволила объяснить наблюдаемый вид остаточных уклонений, 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 ещё до образования пульсара. В процессе взрыва сверхновой звезда потеряла почти половину своей массы, что привело к переходу планеты на высокоэксцентрическую орбиту,

## Литература

1. A. Wolszczan and D. Frail, *Nature* **355**, 145 (1992).
2. 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. Bhalariao, N. D. R. Bhat, M. Burgay, S. Burke-Spolaor, N. D'Amico, S. Johnston, M. J. Keith, M. Kramer, S. R. Kulkarni, L. Levin, A. G. Lyne, S. Milia, A. Possenti, L. Spitler, B. Stappers, and W. van Straten, *Science* **333**, 1717 (2011).
4. Е. Д. Старовойт и А. Е. Родин, *АЖ* **94**, 944 (2017).
5. G. S. Downs and P. E. Reichley, *ApJS* **53**, 169 (1983).
6. G. B. Hobbs, A. G. Lyne, and M. Kramer, *MNRAS* **402**, 1027 (2010).
7. G. B. Hobbs, R. T. Edwards, and R. N. Manchester, *MNRAS* **369**, 655 (2006).
8. W. Z. You, H. X. Wang, R. N. Manchester, X. J. Wu, and J. Zhang, *MNRAS* **354**, 811 (2004).
9. D. Brouwer and G. M. Clemence, *Methods of Celestial Mechanics* (New York: Academic Press, 1961).

### On the Possibility of the Existence of a Planet Around the Pulsar PSR B0525+21

A.E. Rodin and E.D. Starovoit

*Pushchino Radio Astronomy Observatory*

*Astrospace Centre, P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences*

*Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

*E-mail: rodin@prao.ru*

Received June 6, 2018

**Abstract.** We present a model describing barycentric residuals of the pulsar PSR B0525+21 observed at the radio telescopes DSS 13 and DSS 14 at the Jet Propulsion Laboratory and the Lowell radio telescope at the Jodrell Bank Observatory from the point of view of the existence of a planet moving in a highly elliptical orbit with period  $P = 27.74$  years, semimajor axis  $a = 10.35$  a.u., eccentricity  $e = 0.96$ , and mass  $m \sin i = 0.39 M_{\oplus}$ .