

Результаты наблюдений A0620-00 и GRO J0422 + 32 свидетельствуют в пользу реализации в некоторых случаях отклонений от классической дисковой модели. Более того, у GRO J0422 + 32 мы, по-видимому, непосредственно наблюдаем фрагментированную аккреционную структуру.

6. Перспективы исследований астрофизических объектов с высоким временным разрешением во многом связаны с созданием нового класса приемников — координатно-чувствительных детекторов (КЧД) с высоким пространственным (50 мкм) и временным разрешением (1 мкс). Использование таких систем позволит улучшить пределы обнаружения быстрых флуктуаций блеска на 2–3^m. Другими словами, можно будет обнаруживать оптические пульсары с блеском 28–29^m, и искать черные дыры среди объектов 20–21^m.

На очереди — поиск черных дыр в зонах повышенной плотности межзвездного газа, поиск пульсирующего излучения в молодых остатках сверхновых в близких галактиках, синхронные наблюдения в нескольких полосах пульсара в Крабе, оптических вспышек, рентгеновских барстеров.

Список литературы

1. Неизвестный С И, Пимонов А А *Сообщ. САО* **23** 56 (1979)
2. Пимонов А А *Сообщ. САО* **25** 31 (1979)
3. Плохотниченко В Ф *Сообщ. САО* **38** 29 (1983)
4. Шварцман В Ф *Сообщ. САО* **19** 5 (1977)
5. Шварцман В Ф *Астрон. ж.* **48** 474 (1971)
6. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Пустильник Л А *Астрофизика* **31** 457 (1989)
7. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Митронова С Н *Письма Астрон. ж.* **15** 337 (1989)
8. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Плохотниченко В Л В кн. *Физика нейтронных звезд. Пульсары и барстеры* (Ленинград, 1988) 178
9. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Неизвестный С И, Плохотниченко В Л *Физика нейтронных звезд. Пульсары и барстеры* (Ленинград, 1988) 184
10. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Гершберг Р Е, Плохотниченко В Л, Пустильник Л А *Письма Астрон. ж.* **14** 233 (1988)
11. Шварцман В Ф, Бескин Г М, Митронова С Н, Неизвестный С И, Плохотниченко В Л *Письма Астрон. ж.* **15** 590 (1989)
12. Bartolini C, Guarnieri A, Piccioni A, Beskin G, Neizvestny S *Astrophys. J. (Suppl.)* (in press)

PACS numbers: 97.60. Gb

Т.В. Шабанова. Обнаружение планетной системы около пульсара PSR 0329 + 54. Планеты за пределами Солнечной системы очень трудно обнаружить из-за их малого влияния на положение центральной звезды. Орбитальная лучевая скорость звезды при наличии планеты может составлять всего несколько см с⁻¹. Такую малую скорость можно обнаружить только при орбитальном движении источников излучения с постоянным периодом пульсаций, т.е. прежде всего у пульсаров — источников импульсного радиоизлучения высокой стабильности. Существование планеты обнаруживается по модуляции наблюдаемого времени прихода импульсов пульсара эффектом Доплера, возникающим при движении пульсара по орбите вокруг общего центра масс системы.

В настоящее время известно более 600 пульсаров и только у одного из них — миллисекундного пульсара

PSR 1257 + 12 — обнаружена планетная система [1]. В данной работе сообщается об обнаружении планеты около пульсара PSR 0329 + 54. Планета имеет массу около 2M_E (M_E — масса Земли) и обращается вокруг пульсара с периодом 16,8 лет по достаточно вытянутой орбите (e = 0,2) на расстоянии 7,3 а.е. Пульсар PSR 0329 + 54 — это второй пульсар, у которого обнаружена планетная система.

Результат о наличии орбитального движения пульсара PSR 0329 + 54 был получен на основе анализа наблюдений с точной временной привязкой, проводившихся в Пушино с 1979-го по январь 1994 г. на антенне БСА на частоте 102,5 МГц, и анализа опубликованных данных Даунса и Ричли, Даунса и Крауз-Полсторфа (далее, как DR и DK), полученных на промежутке времени 1968–1982 гг. на частоте 2388 МГц [2, 3].

Наблюдения в Пушино проводились на многоканальном радиометре (32 · 20 кГц) с общей полосой пропускания 640 кГц и постоянной времени 3 мс. Интервал съема информации составлял 2,5 мс. Средний импульс за один сеанс наблюдения получался в результате синхронного с периодом пульсара суммирования 520 индивидуальных импульсов, регистрируемых за время прохождения этого пульсара через диаграмму направленности антенны. Время прихода импульсов измерялось по максимальному значению кросс-корреляционной функции, вычисляемой между средним импульсом, полученным из одного сеанса наблюдения, и эталонным профилем. Для получения эталонного профиля усреднялось 7300 отдельных импульсов. Точность определения моментов прихода импульсов составляла 30–100 мкс.

Анализ времени прихода импульсов PSR 0329 + 54 проводился по объединенному массиву: массиву, полученному в Пушино на частоте 102,5 МГц, и по опубликованному массиву данных DR и DK, полученному на частоте 2388 МГц. Времена прихода импульсов приводились к барицентру Солнечной системы с использованием эфемерид JPL DE200 [4] и координат пульсара [2] и пересчитывались на бесконечно высокую частоту для исключения зависимости времени прихода импульсов от частоты наблюдения. Объединенный массив содержал 790 значений, распределенных на интервале в 25 лет: сентябрь 1968 г. — январь 1994 г. По совместному массиву координаты и собственное движение пульсара не определялись.

Обработка проводилась следующим образом. На основе начальных значений периода P и производной периода \dot{P} предвычислялось время прихода импульсов и находились остаточные отклонения, равные разности между наблюдаемым временем прихода и предвычисленным, которые затем использовались для вычисления поправок к начальным значениям параметров. После этого вновь предвычислялось время прихода импульсов, но уже с уточненными параметрами и затем вновь находились остаточные отклонения — отклонения после аппроксимации. Аппроксимирующий полином имел вид

$$\varphi(t) = \varphi_0 + v(t - t_0) + \frac{1}{2} \dot{v}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \ddot{v}(t - t_0)^3.$$

Здесь φ_0 — начальная фаза, $v = 1/P$ — частота вращения пульсара, $\dot{v} = -\dot{P}/P^2$, $\ddot{v} = -\ddot{P}/P^2$ — две ее первых производных, t_0 — время прихода первого импульса.

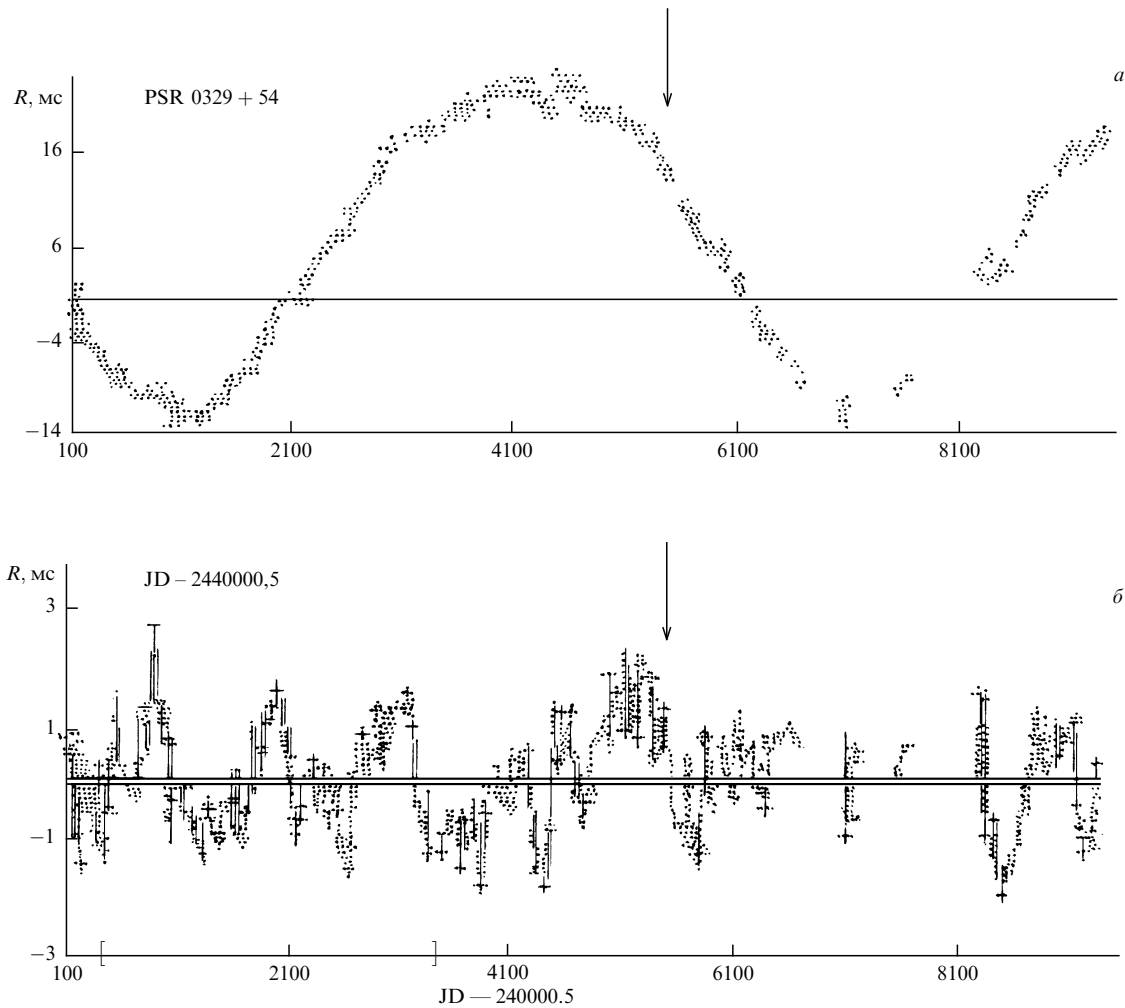


Рис. 1. Остаточные отклонения PSR 0329 + 54, полученные после исключения из барицентрического времени прихода импульсов кубического полинома (а), после исключения из (а) периодичности в 6140 дней (б). По оси x указано время в Юлианских днях, по оси y — величина отклонений в мс

Остаточные отклонения после аппроксимации показаны на рис. 1, а. По оси x отложено время в юлианских днях, по оси y — отклонения в мс. Стрелкой отмечено место стыковки двух массивов. Слева от стрелки — массив DR и DK, полученный на частоте 2388 МГц, справа — массив Пушино, полученный на частоте 102,5 МГц. Из рис. 1, а видно, что один массив данных очень хорошо продолжает другой, даже незаметно место соединения двух массивов.

Остаточные отклонения после аппроксимации имеют синусоидальный вид и на интервале наблюдений в 25 лет укладывается 1,5 периода синусоидальной кривой. Синусоидальный вид отклонений позволил предположить, что пульсар имеет орбитальное движение. По-видимому, пульсар PSR 0329 + 54 — не одиночная звезда, а у него имеется второй компонент, обращающийся вокруг нейтронной звезды — пульсара, и мы наблюдаем модуляцию времени прихода импульсов пульсара из-за эффекта Доплера, обусловленного движением звезды вокруг общего центра масс системы. Асимметрия кривой отклонений указывает на то, что орбита имеет эксцентриситет. Данные о параметрах двойной системы были получены вписыванием в барицентрические времена прихода полинома, содержащего, кроме параметров P , \dot{P} , \ddot{P} , также параметры орбитального движения. Методика описана в работах [5–7].

После решения системы с 9-ю неизвестными по методу наименьших квадратов были определены начальная фаза импульса, частота вращения и ее две первых производных (φ_0 , ν , $\dot{\nu}$, $\ddot{\nu}$) и классические элементы кеплеровой орбиты — проекция большой полуоси на луч зрения $a \sin i$, эксцентриситет e , орбитальный период P_b , долгота периастра ω и время прохождения периастра T_0 . Полученные значения элементов орбиты пульсара указаны в таблице. Ошибки равны двум среднеквадратичным ошибкам, полученным при решении системы уравнений по методу наименьших квадратов. На рис. 1, б показаны отклонения, оставшиеся после исключения из времени прихода импульсов модуляции, обусловленной орбитальным движением с указанными параметрами. На рис. 2 показано, насколько хорошо в экспериментальные значения вписывается рас-

Параметры планетной системы PSR 0329 + 54

Период пульсара P , с	0,714518572619 (10)
Первая производная периода \dot{P} , $e - 15$	2,04934 (6)
Вторая производная периода, \ddot{P} , $e - 27$	-2,49 (12)
Эпоха, JED	2440105,73037
Проекция большой полуоси $a \sin i$, с	0,0178 (4)
Орбитальный период P_b , e дни	6140 (50)
Эксцентриситет, e	0,213 (16)
Долгота периастра ω , град	268 (3)
Время прохождения периастра T , JED	2441011 (60)

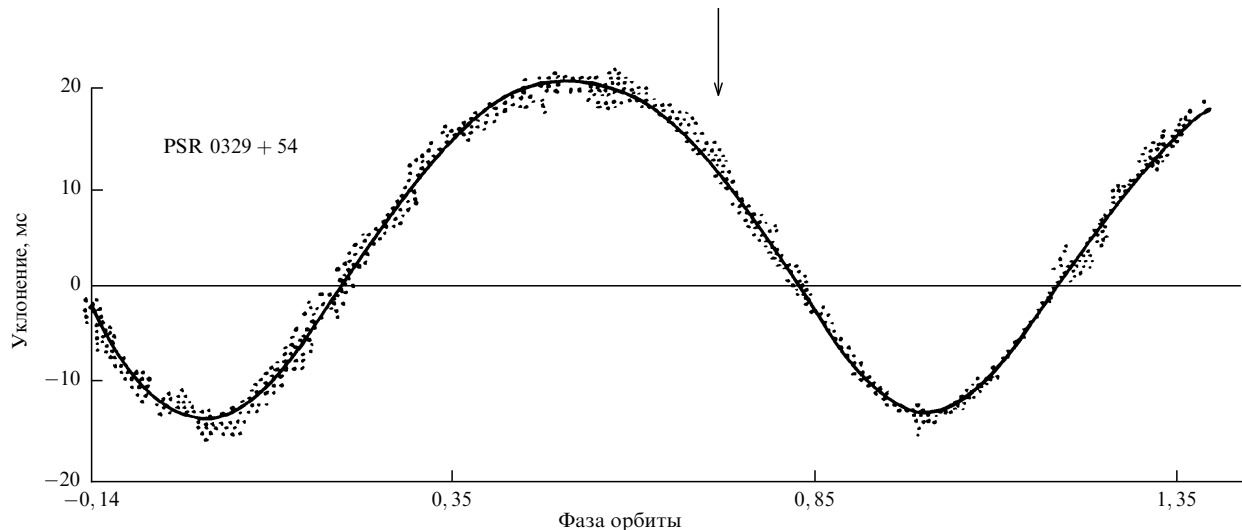


Рис. 2. Вписывание в остаточные уклонения расчетной кривой (сплошная линия), определяющей величину модуляции времени прихода импульсов при движении пульсара по орбите с указанными в таблице параметрами. По оси x отложена орбитальная фаза

четная кривая (непрерывная), дающая величину модуляции времени прихода при движении пульсара по орбите. По оси x отложена орбитальная фаза.

В оставшихся после исключения синусоидальной кривой уклонениях (рис. 1, б) видна модуляция меньшей амплитуды ~ 1 мс и с гораздо меньшим периодом ~ 1105 дней. Эта четкая модуляция видна три периода в первой части данных DR, затем картина несколько размывается. В данных Пушино за 1982–1986 гг. и 1991–1994 гг. эта модуляция не видна, скорее всего из-за аппаратных эффектов. Полученная периодичность в 1105 дней не является новой. В 1979 г. Демьянский и Прожинский [8] сообщили о существовании в остаточных уклонениях PSR 0329 + 54 периодичности в 1105 дней, которую они связали с возможным существованием планеты малой массы. На рис. 1, б отмечен интервал их анализа. Кордс и Даунс, анализируя данные DR, существование такой периодичности не подтвердили [9]. Позднее, в работе [10] авторы отметили, что она существует. На рис. 1, б она хорошо видна и отчетливо проявляется в первой части данных DR только после исключения синусоидальной кривой с периодом в 6140 дней. Если при дальнейших наблюдениях периодичность в 1105 дней будет видна и ее фаза сохранится, то ее можно связать с наличием орбитального движения второй планеты, хотя не исключена возможность и иной интерпретации.

Полагая, что периодичность в 6140 дней связана с орбитальным движением, можно оценить параметры планетной системы. Функция массы, соответствующая орбитальным параметрам таблицы, равна

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

$$f(m_p) = 0,14 \cdot 10^{-15} M_\odot.$$

Здесь m_p и m_c — массы пульсара и второго компонента, G — постоянная гравитации, i — угол наклона орбиты относительно картинной плоскости. Принимая массу пульсара $m_p = 1,4 M_\odot$, можно оценить минимальную массу второго компонента. Оценки параметров вычисляются для случая, когда угол наклона между картинной плоскостью и плоскостью орбиты равен 90° ($\sin i = 1$)

$$m_c \sin i = 6,5 \cdot 10^{-6} M_\odot \simeq 2 M_E,$$

т.е. второй компонент имеет массу планеты.

Можно оценить большую полуось орбиты планеты, зная орбитальный период и массу нейтронной звезды:

$$a = \left[\frac{G(m_p + m_c) P_b^2}{4\pi^2} \right]^{1/3} = 1 \cdot 10^{12} \text{ м},$$

$$a = 1 \cdot 10^9 \text{ км} = 7,3 \text{ а.е.} \simeq 0,7 R_\eta.$$

Этот размер орбиты чуть меньше размера орбиты Сатурна вокруг Солнца.

С вопросом существования планет около пульсаров связан вопрос выживания планет на разных стадиях эволюции пульсара и особенно на стадии взрыва сверхновой. Теоретически легче объясняется существование планет около миллисекундных пульсаров, так как они, как полагают, обладают аккреционным диском, из которого могут образовываться планеты. В случае обычных пульсаров с периодами около 1 с особенно трудно объяснить, как планета сохраняется во время взрыва сверхновой. Для планеты с периодом обращения в 6140 дней вероятность выживания может быть достаточно большой, так как планета находится далеко от звезды и имеет вытянутую орбиту.

Автор выражает благодарность Ю.П. Шитову за полезное обсуждение результатов работы, З.А. Марченко — за помощь в обработке данных.

Список литературы

1. Wolszczan A, Frail D A *Nature*. **355** 145 (1992)
2. Downs G S, Reichley P E *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **53** 169 (1983)
3. Downs G S, Krause-Polstorff J *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **62** 81 (1986)
4. *Астрономический ежегодник* (Ред. Абалакин В.К.) (Л.: Наука, 1990) с. 156
5. Taylor J H, Hulse R A, Fowler L A, Gullhorn G E, Rankin J M *Astrophys. J.* **206** 53 (1976)
6. Blandford R, Teukolsky S A *Astrophys. J.* **205** 580 (1976)
7. Манчестер Р, Тэйлор Дж В кн. *Пульсары* (М.: Мир, 1980) с. 119
8. Demianski M, Proszynski M *Nature* **282** 383 (1979)
9. Cordes J M, Downs G S *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **59** 343 (1985)
10. Bailes M, Lyne A G, Shemar S L In *Proceedings of the Workshop "Planets around Pulsars"* (Pasadena, USA, 1992) p. 19