



Аннотация

Миллисекундные пульсары образуются в двойных звездных системах в результате аккреции вещества со звезды компаньона. Они интересны тем, что их массы могут быть значительно больше канонической массы нейтронной звезды 1.4 массы Солнца. Оптические наблюдения компаньона таких систем совместно с радио наблюдениями пульсара позволяют с высокой точностью определять массу нейтронной звезды. Особую группу среди миллисекундных пульсаров составляют "черные вдовы" тесные двойные системы с периодом обращения < 1 д. В таких системах одна сторона компаньона подвергается значительному нагреву со стороны пульсара, что приводит к сильной переменной блеска компаньона. Моделирование оптических кривых блеска "черных вдов" даёт информацию о многих параметрах этих двойных систем, включая массы компонентов системы, расстояния до неё, наклонение орбиты и температуры компаньона. В этой работе приводятся результаты такого исследования двух "черных вдов" J2017-1614 и J1513-2550, открытых в 2016 г. с помощью радиотелескопа Green Bank и также обнаруженных в гамма-диапазоне обсерваторией Fermi. Нами получены оптические кривые блеска компаньонов и проведена их аппроксимация моделью прямого нагрева для оценки основных параметров двойных систем. Наблюдения пульсара J2017-1614 проводились на 10-метровом телескопе GTC в 4-х фильтрах g_s , r_s , i_s , z_s . J1513-2550 наблюдался на 2.1-метровом телескопе OAN-SPM в фильтрах B, V и R и на 6.5-метровом телескопе Magellan в фильтре r' . У обоих компаньонов наблюдается сильная периодическая переменность с амплитудой >2 звездных величин. В кривой блеска J1513-2550 также наблюдается сильная асимметрия во всех фильтрах, которая может свидетельствовать, например, о наличии горячего пятна на поверхности компаньона. Помимо этого в r' фильтре мы обнаружили слабые квазипериодические колебания неизвестной природы с периодом 15 минут. Мы также идентифицировали оба этих источника в рентгеновском диапазоне с помощью обсерватории XMM Newton.

Введение

Одними из наиболее интересных объектов в современной астрофизике являются нейтронные звезды (НЗ). Их массы могут достигать $2 M_{\odot}$, а магнитные поля 10^{15} Гс. Особую группу среди них представляют "паучьи пульсары". Это тесные двойные системы с миллисекундным пульсаром (МСП) и маломассивной звездой-компаньоном. Их разделяют на "черные вдовы" (black widows) и "австралийские вдовы" (redbacks). Компаньонами первых являются частично вырожденные звезды с очень малой ($\lesssim 0.05 M_{\odot}$) массы, а компаньонами вторых – более массивные (0.1-1 M_{\odot}) невырожденные звезды. В таких системах МСП сильно раскручены (до периодов около 1.4 мс), а орбитальные периоды короткие (менее дня), что приводит к нагреву и испарению компаньонов пульсарным ветром. Многоволновые наблюдения таких систем позволяют с высокой точностью определять параметры НЗ и в особенности их массы. Это важно, так как в последствии можно установить ограничения на уравнения состояния сверхплотного вещества НЗ.

В этой работе приводятся результаты исследования двух "черных вдов" J2017–1614 и J1513–2550 (далее J2017 и J1513) в оптическом диапазоне. Эти объекты были обнаружены в радиодиапазоне с помощью обсерватории Грин Бэнк [1]. Полученные из радионаблюдений параметры представлены в таблице 1

Параметры пульсаров

Таблица 1: Параметры J1513 и J2017, взятые из работы [1] и каталога пульсаров ATNF.

MSP	J1513–2550	J2017–1614
Прямое восхождение α (J2000)	15 ^h 13 ^m 23 ^s .32059(6)	20 ^h 17 ^m 46 ^s .1478(8)
Склонение δ (J2000)	–25°50'31".285(3)	–16°14'15".51(5)
Галактическая широта l , град.	338.820	27.314
Галактическая долгота b , град.	26.964	–26.220
Период вращения P , мс	2.1190675651177(1)	2.3142872649224(4)
Изменение периода вращения \dot{P} , $c \cdot s^{-1}$	21.61(2) $\times 10^{-21}$	2.45(5) $\times 10^{-21}$
Орбитальный период P_b , дней	0.1786354505(8)	0.0978252578(4)
Проекция большой полуоси x , св. с.	0.0408132(7)	0.043655(5)
Время восходящего узла T_{asc} , MJD	56728.4539340(6)	56704.756314(2)
Функция масс f_M , M_{\odot}	2.2874(1) $\times 10^{-6}$	9.334(3) $\times 10^{-6}$
Мера дисперсии DM, пк см ⁻³	46.86(7)	25.4380(4)
Расстояние D_{YMW16} , кпк	4.0	1.4
Расстояние D_{NE2001} , кпк	2.0	1.1
Характеристический возраст $\tau_c \equiv P/2\dot{P}$, млрд лет	1.55	15
Темп потери энергии вращения \dot{E} , эрг с ⁻¹	9.0 $\times 10^{34}$	7.8 $\times 10^{33}$
Минимальная масса компаньона $M_{c, min}$, M_{\odot}	0.02	0.03

D_{YMW16} и D_{NE2001} – значения меры дисперсии, полученные при измерении с помощью моделей распределения электронов в галактике YMW16 [2] и NE2001 [3], соответственно. Оценки минимальной массы компаньона получены при массе пульсара $M_p = 1.4 M_{\odot}$ и наклонении орбиты $i = 90^\circ$.

Наблюдения

Оптические фазово-разрешенные фотометрические наблюдения пульсара J1513 проводились в мае 2019 г. на 2.1-метровом телескопе (OAN-SPM) и в апреле 2022 г. на 6.5-метровом Магеллановом телескопе. Всего было получено 121 изображение с 50-с экспозициями в r' и 59 $BVRi$ изображений с экспозициями 600 с. Наблюдения пульсара J2017 проходили в сентябре 2021 г. на 10-метровом Большом Канарском Телескопе (GTC) с помощью инструмента HiPERCAM. В результате мы получили 395 кадров с экспозициями 140 с в фильтрах $u_s g_s r_s i_s z_s$.

Мы провели стандартную первичную редукцию данных. Фрагменты изображений полей пульсаров показаны на Рис. 1. Далее посредством апертурной фотометрии мы построили кривые блеска от орбитальной фазы для каждого объекта (рис.2, 3).

Изображения полей пульсаров

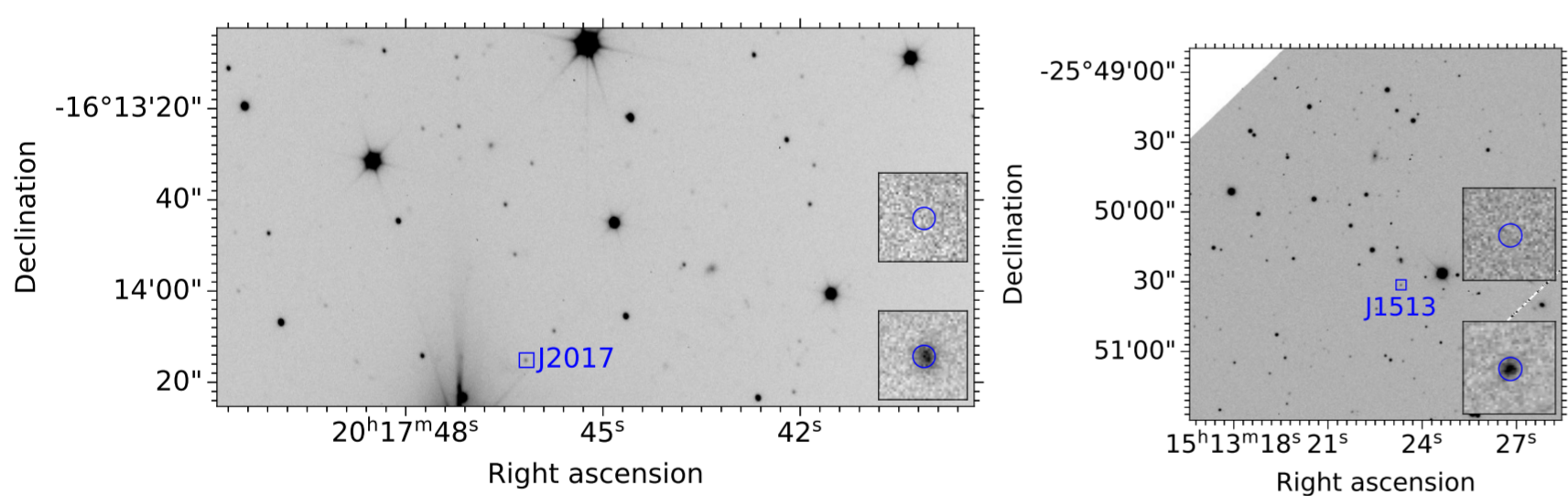


Рис. 1: Левое изображение: Поле зрения пульсара J2017 полученное инструментом HiPERCAM в фильтре r_s . Правое изображение: Поле зрения пульсара J1513, полученное в фильтре r' с помощью телескопа Magellan-1. Окрестности компаньонов обозначены прямоугольниками и увеличены на вставках, демонстрирующих их максимальную (внизу) и минимальную (вверху) фазы яркости; положения исследуемых объектов отмечены синими кружками

Моделирование кривых блеска

Для определения параметров двойной системы J2017 мы использовали метод моделирования кривых блеска, описанный в работах [4-5] и подразумевающий прямой нагрев компаньона пульсарным ветром. В качестве параметров модели мы включали межзвездное поглощение, расстояние, массу пульсара, отношение масс компонент двойной системы, угол наклона орбиты системы, эффективность степени облучения компаньона пульсаром, степень заполнения полости Роша и температуру ночной стороны компаньона. При аппроксимации наблюдаемых кривых блеска моделью мы использовали функцию масс, полученную из радионаблюдений и связывающую отношение масс компонент системы и угла наклона. Это уменьшает количество модельных параметров. Значения параметров, соответствующих наилучшей аппроксимации данных, представлены в таблице 2.

Кривые блеска

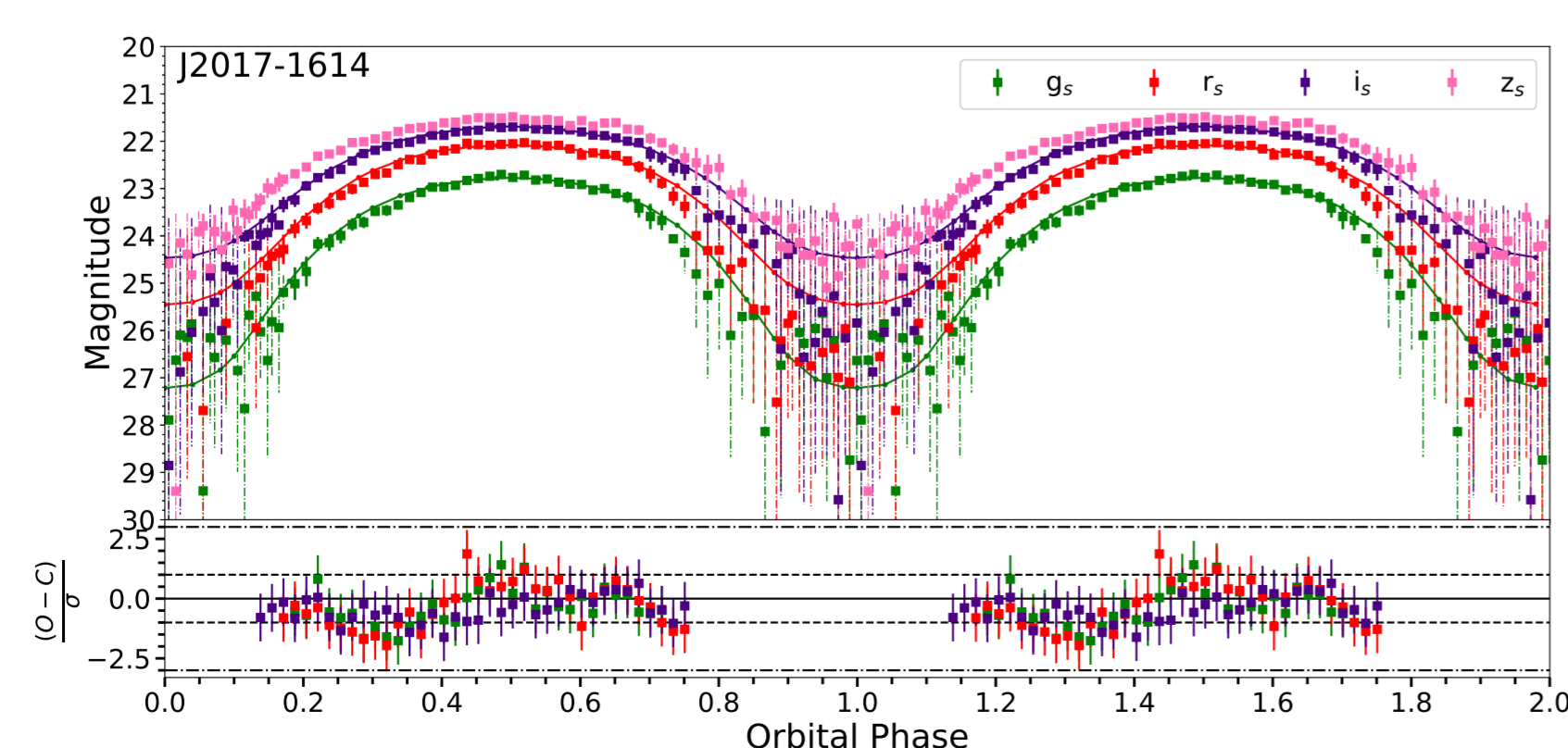


Рис. 2: Свернутые с орбитальным периодом кривые блеска компаньона J2017 полученные в g_s , r_s , i_s и z_s фильтрах (O), точки с пунктирными усами показывают значения находящиеся ниже 3σ предела чувствительности телескопа. Сплошной линией обозначен результат моделирования (C). На нижней представлена невязка модельных аппроксимаций кривых блеска.

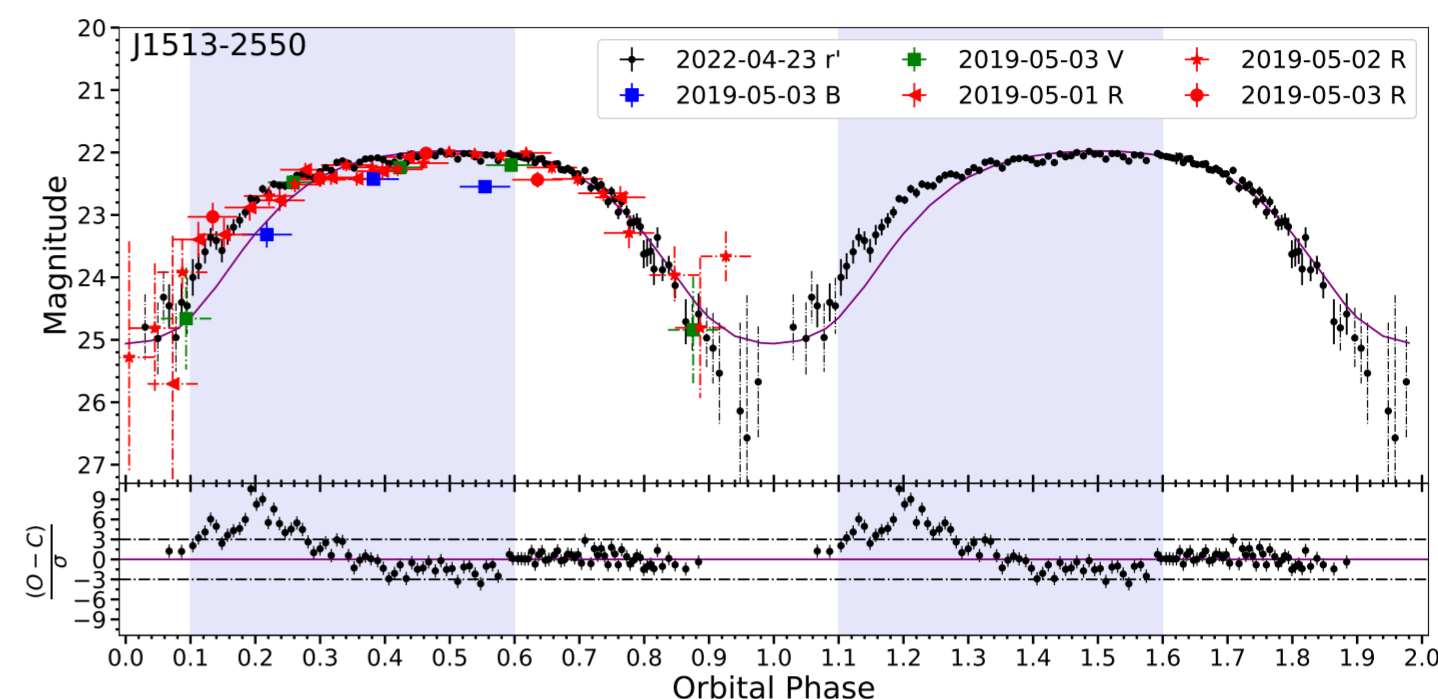


Рис. 3: Кривые блеска J1513 свернутые с периодом обращения (O), точки с пунктирными усами показывают значения находящиеся ниже 3σ предела чувствительности телескопа. Данные, полученные в разных фильтрах обозначены различными цветами см. легенду. Все звездные величины приведены к AB системе звездных величин. Сплошной линией обозначен результат аппроксимации кривой блеска в фильтре r' в диапазоне фаз 0.5 – 1(C). Синей полосой обозначена часть кривой блеска с мелкомасштабными колебаниями. На нижней представлена невязка модельной аппроксимации кривой блеска в фильтре r' .

Результаты моделирования для J2017

Таблица 2: Параметры наилучшей аппроксимации для J2017.

	J2017	J1513
Покраснение $E(B - V)$, зв. вел.	0.09 ^{+0.03} _{-0.01}	0.07 ^{+0.03} _{-0.04}
Расстояние D , кпк	2.40 ^{+0.10} _{-0.05}	1.95(5)
Масса пульсара M_p , M_{\odot}	2.4(6)	1.7 ^{+1.0} _{-0.6}
Отношение масс $q = M_c/M_p$	0.017(2)	0.012(1)
Температура 'ночной стороны' T_n , 10^3 K	3.0 ^{+0.2} _{-0.1}	3.2(1)
Наклонение i , град.	67 ⁺¹⁰ ₋₇	70 ⁺²⁰ ₋₁₅
Степень заполнения полости Роша f	0.84(6)	1.0 ^{+0.1} _{-0.1}
Масса компаньона M_c , M_{\odot}	0.041	0.020
Радиус компаньона по оси X R_c, R_{\odot}	0.122	0.114
Радиус компаньона по оси Y R_c, R_{\odot}	0.169	0.151
Минимальная температура 'дневной стороны' T_d^{min} , 10^3 K	3.3	3.2
Максимальная температура 'дневной стороны' T_d^{max} , 10^3 K	5.9	5.4

Мелкомасштабные колебания.

Для изучения мелкомасштабных колебаний, наблюдаемых в диапазоне фаз от 0.1 до 0.6 мы нормировали кривую блеска с помощью полинома Чебышева низкого порядка. Далее для поиска периодичности этих колебаний мы построили Ломб-Скаргле периодограмму. Для определения ошибок периодограммы мы сгенерировали набор синтетических кривых блеска в пределах ошибок и построили для каждой из них Ломб-Скаргле периодограмму. Полученное распределение периодограмм мы аппроксимировали функцией Гаусса, максимуму которой соответствует наиболее вероятное значение периодограммы, а её ширина ошибке. Максимум периодограммы соответствует периоду 15.3 минуты.

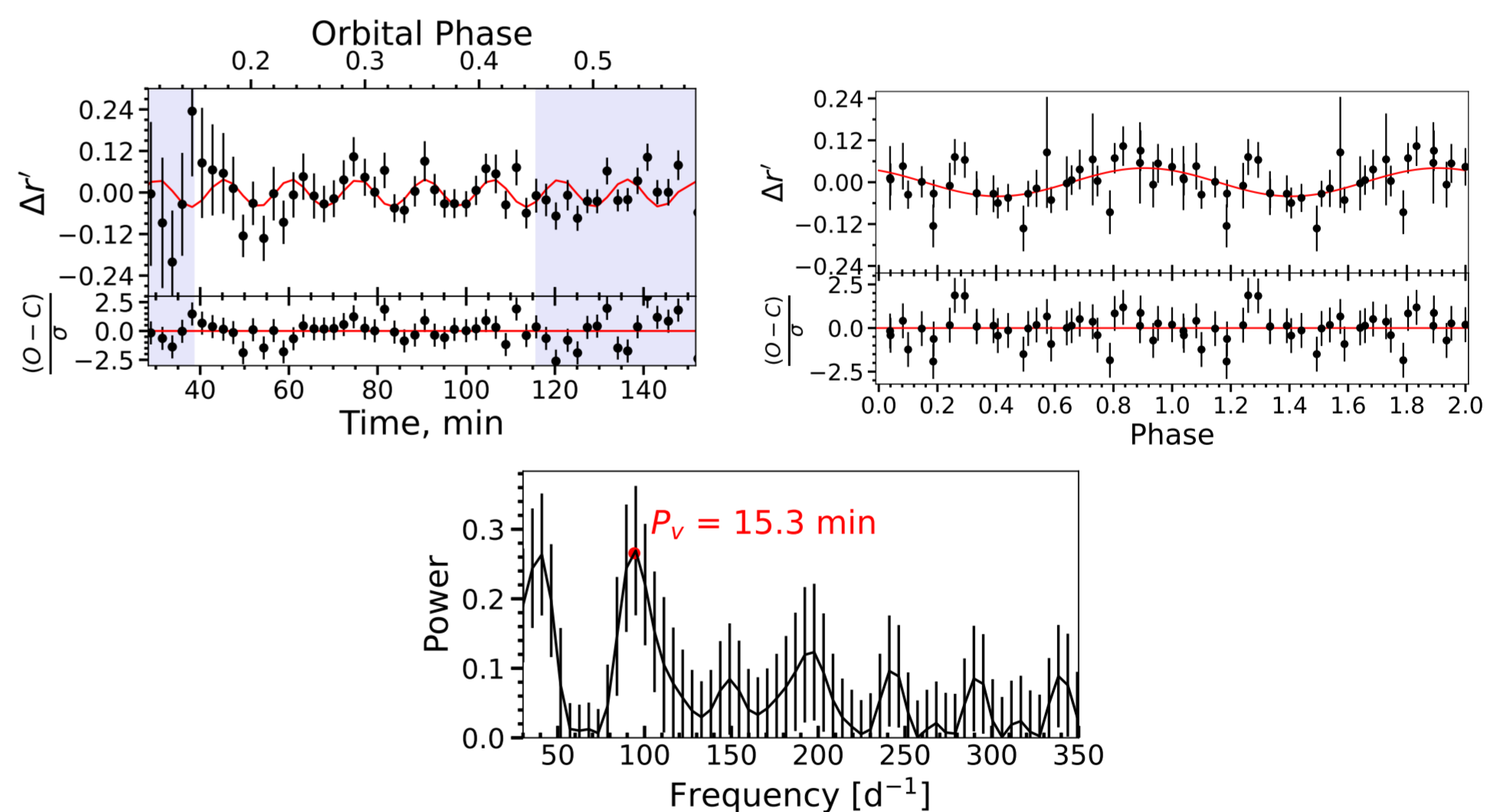


Рис. 4: Левая панель: нормированная кривая блеска. Красной сплошной линией обозначена синусоида с периодом 15 минут. Центральная панель: Свернутая с периодом 15 минут кривая блеска. Правая панель: Ломб - Скаргле периодограмма для нормированной кривой блеска.

Заключение

Мы провели фотометрию для двух компаньонов миллисекундных пульсаров J2017 и J1513 для разных фаз их орбитального движения. Оказалось, что амплитуды орбитальной модуляции оптического блеска обоих источников составляют несколько звездных величин, что является типичным для "черных вдов" (напр., [9]).

Моделирование кривой блеска J2017 позволило получить первые оценки основных НЗ. Оценка расстояния до пульсара превосходит значение, измеренное по мере дисперсии в радиодиапазоне. Это согласуется с наблюдаемой тенденцией для "паучьих" систем, для которых оценки расстояния по мере дисперсии оказываются систематически меньше полученных другими способами [10]. Измеренные температуры, степень заполнения полости Роша и масса компаньона типичны для "черных вдов" [11].

Кривые блеска J1513 во всех проведенных наблюдениях демонстрируют заметную асимметрию относительно максимума яркости, что не позволяет провести их адекватное моделирование с помощью упрощенной модели прямого нагрева компаньона пульсаром. Асимметрия может объясняться, например, наличием холодного магнитного пятна на поверхности компаньона, как у магнитных звезд, неравномерным переносом тепла по поверхности компаньона из-за конвективных процессов или несимметричным нагревом за счет ударной волны, возникающей при взаимодействии пульсарного ветра и ветра компаньона. Похожее явление наблюдалось у ряда других "паучьих" пульсаров [6-8]. Также мы обнаружили слабые 15-ти минутные колебания кривой блеска неизвестной природы. Мы оценили значимость этих колебаний как 2.5 σ . Для определения физической природы наблюдаемой асимметрии, а также малых колебаний кривой блеска этого объекта необходимы дальнейшие более подробные многополосные наблюдения.

Литература

- [1] Sanpa-arsa S. Searching for New Millisecond Pulsars with the GBT in Fermi Unassociated Sources, PhD Thesis, University of Virginia, 2016
- [2] Yao, J.M., et al., New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances, ApJ, 835, 29, 2017
- [3] Cordes J. M., Lazio T.J.W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations, arXiv:astro-ph/0207156, 2002
- [4] Zharikov, S., et al. 2019, Optical detection of the black widow binary PSR J2052+1219 MNRAS, 489, 5547
- [5] Zharikov, et al. 2013, The accretion disk in the post period-minimum cataclysmic variable SDSS J080434.20 + 510349.2 A&A, 549, A77
- [6] Romani, et al. PSR J1311-3430: A Heavyweight Neutron Star with a Flyweight Helium Companion, 2021, ApJ, 760, L36
- [7] Clark, C. J. et al. Einstein@Home discovery of the gamma-ray millisecond pulsar PSR J2039-5617 confirms its predicted redback nature, 2021, MNRAS, 502, 915
- [8] Kandel, D., & Romani, R. W., Heated Poles on the Companion of Redback PSR J2339-0533, 2020, ApJ, 892, 101
- [9] Mata Sánchez et al., A black widow population dissection through HiPERCAM multi-band light curve modelling., 2023, MNRAS, 520, 2217
- [10] Koljonen, Karri L. L., Linares M., A Gaia view of the optical and X-ray luminosities of compact binary millisecond pulsars, 2023 MNRAS, 525, 3963
- [11] Swihart S.J., et al. A New Flaring Black Widow Candidate and Demographics of Black Widow Millisecond Pulsars in the Galactic Field, 2022 ApJ, 941, 1995