

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
Отделение твердотельной электроники  
Лаборатория прикладной математики и математической физики

Бобаков Александр Васильевич

**Оптические исследования двойных звёздных систем с  
миллисекундным пульсаром.**

Научный доклад

Специальность

01.03.01 - Физика космоса, астрономия

Санкт-Петербург — 2025

# Введение

## Актуальность темы диссертации

Нейтронные звезды (НЗ) – это класс компактных объектов с массами порядка  $1,4 M_{\odot}$  и радиусами порядка 10 км. Существование таких объектов было предсказано в 1930-е годы [1][2][3]. Первая НЗ была открыта как радиопульсар в 1967 году в Маллардской обсерватории [4]. Пульсары – это источники периодического излучения в радио-, оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах. Эти объекты образуются в результате сжатия массивной звезды, коллапсирующей в НЗ во время взрыва сверхновой. Результирующий объект при этом сохраняет большую часть углового момента, а ввиду малого размера НЗ период обращения пульсаров может варьироваться от 1 мс до нескольких минут

Наличие сильного магнитного поля порядка  $10^8$  Гс– $10^{15}$  Гс и сильного вращения приводит к формированию потоков высокоэнергетических заряженных частиц вблизи магнитных полюсов НЗ. Излучение от этих частиц является нетепловым, и оно наблюдается на различных длинах волн от радио- до гамма-диапазона. При этом магнитная ось, как правило, не совпадает с её осью вращения, чем и объясняются наблюдаемые пульсации излучения.

В настоящее время известно около 4000 НЗ. Большая часть из них была открыта как радиопульсары. Анализ пульсаций НЗ, или временной анализ, позволяет по задержке времени прихода импульсов на разных частотах измерять ряд важных параметров, например, период пульсаций и меру дисперсии. Мера дисперсии определяется концентрацией электронов на луче зрения. По разным моделям распределения электронов в Галактике можно определить расстояние до пульсара. Ещё одним важным параметром является замедление вращения пульсара, вызванное потерями вращательной энергии на магнито-дипольное излучение и генерацию пульсарного ветра релятивистских частиц. С помощью измерений временной производной периода вращения пульсара можно оценить величину дипольной компоненты магнитного поля НЗ и определить её возраст.

Помимо нетепловой компоненты излучения также существует и тепловая компонента излучения с поверхности НЗ, которая наблюдается в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Из анализа спектров этого излучения можно оценить температуру поверхности НЗ и горячих полярных шапок, подогреваемых обратным током релятивистских частиц из магнитосферы пульсара.

Среди всех пульсаров выделяют большую группу, порядка 13%, миллисекундных пульсаров (МСП). Эти объекты обладают периодом вращения меньше 30 мс и магнитным полем около  $10^8$ – $10^{10}$  Гс. Первый миллисекундный пульсар, PSR 1937+21, был открыт с помощью обсерватории Аресибо в 1982 году [5]. Он был зарегистрирован как радиоисточник, который впоследствии оказался пульсаром с очень коротким периодом пульсаций равным 1,5 мс. Такой период в рамках стандартной теории образования НЗ мог бы говорить о том, что это очень молодая НЗ. Однако в окрестностях объекта не наблюдается остатка взрыва сверхновой [6]. Для объяснения этого Бэккером было выдвинуто предположение, основанное на статье Л. Смарра и Р. Блэндфорда вышедшей в 1975 [7], о том, что данный пульсар входит в двойную систему, прошедшую стадию аккреции вещества с нормальной звезды на нейтронную. При аккреции звездного вещества со звезды-компаньона механический момент сохраняется и частота обращения пульсара увеличивается. В работе [7] оценили функции масс таких систем и их предельные массы. Из этих оценок видно, что звезда-донор может быть двух типов. Первый – это гелиевая звезда главной последовательности. Второй – вырожденный белый карлик (БК). Открытие следующих двух МСП PSR B1953+29 [8] и PSR B1855+09 [9] с компаньонами, соответствующими выдвинутому предположению, показало корректность сделанных предположений. С тех пор с увеличением разрешающей способности и чувствительности телескопов количество открытых объектов этого класса сильно увеличилось, и сейчас известно более 600 МСП, большинство из которых входят в двойные системы.

МСП имеют очень стабильный период пульсаций, поэтому они могут применяться в качестве стандартных эталонов времени. Это позволяет использовать их для уточнения скоростей движения и радиусов орбит объектов Солнечной системы, что, в свою очередь, полезно, например, для навигации

космических аппаратов [10]. Наличие компаньонов у пульсаров позволяет использовать их как своеобразную лабораторию для проведения релятивистских экспериментов.

МСП в двойных звездных системах могут быть использованы для определения масс НЗ, что является важной задачей современной астрофизики и необходимо для построения теории сверхплотного вещества, обладающего плотностями выше ядерной  $2 \times 10^{-14}$  г см<sup>-3</sup>. Как правило, для определения массы пульсара в радиодиапазоне применяется эффект Шапиро [11], заключающийся в замедлении распространения электромагнитного сигнала в гравитационном поле НЗ. Однако для таких измерений необходимы определённые условия, например, малое наклонение плоскости орбиты к лучу зрения наблюдателя и большие экспозиции. Для МСП возможен и другой способ определения массы. Оптические наблюдения позволяют независимо оценивать массу компаньона и наклонение орбиты. Затем используя функцию масс, достаточно точно определяемую из радионаблюдений, можно определить массу НЗ. Именно по этой причине важны исследование компаньонов МСП в оптическом диапазоне. Однако, на данный момент лишь для небольшой части МСП проведено их отождествление с оптическими источниками излучения.

Среди МСП выделяется особая группа объектов, так называемые “паучьи” пульсары. Они представляют из себя тесные двойные системы, в которых компаньон сильно нагревается пульсарным ветром. В результате этого взаимодействия компаньон постепенно испаряется. Считается, что такие системы являются предшественниками одиночных МСП, происхождение которых всё ещё не известно. Собственное вращение компаньона синхронизировано с его орбитальным вращением, в результате чего нагрев пульсарным ветром происходит с одной стороны. Таким образом, компаньон поворачивается к наблюдателю то холодной, то горячей стороной. Из-за этого наблюдается сильное периодическое изменение яркости кривой блеска. Моделирование таких кривых блеска позволяет оценивать массы НЗ ещё одним способом. Также стоит отметить, что теоретические модели предсказывают наличие наиболее тяжелых НЗ с массами  $> 2,0 M_{\odot}$  в таких системах. И действительно одни из самых тяжелых НЗ были найдены в таких системах. Поэтому поиск и

исследование МСП в двойных системах является критически важным для построения наиболее жестких ограничений теории сверхплотного вещества в их недрах. Этим определяется актуальность данной работы.

## **Цели работы**

Целями данной работы являлись поиск и исследование новых МСП в двойных системах, перспективных для решения упомянутых выше фундаментальных задач, и определение их основных параметров.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Написание заявок и проведение оптических фотометрических и спектроскопических наблюдений полей перспективных МСП на различных телескопах.
2. Проведение обработки и анализа полученных данных с помощью современных методов.
3. Анализ спектральных данных с использованием современных моделей излучения атмосфер звёзд для определения спектрального класса компаньонов МСП и оценки их параметров.
4. Построение кривых лучевых скоростей компаньонов МСП и их моделирование для ограничения орбитальных параметров.
5. Проведение анализа оптических кривых блеска для “паучьих” систем для оценок масс компонент системы.

## **Научная новизна**

Работа основана на оригинальных наблюдениях компаньонов МСП на крупнейших телескопах с использованием новейших инструментов. Впервые была произведена оценка параметров для пяти МСП и их компаньонов. Также впервые была проведена многополосная фотометрия для компаньона пульсара J2017–1614, которая позволила получить новую информацию о свойствах компаньона. Были также найдены необычные колебания яркости

в кривой блеска для J1513–2550, что делает его уникальным объектом для дальнейшего изучения.

## **Достоверность полученных результатов**

Обработка и анализ наблюдательных данных проводились с использованием современных и проверенных программных пакетов. Оценки параметров объектов проходили посредством использования апробированных численных моделей. Полученные оценки параметров объектов, где это возможно, сравнивались с результатами предыдущих работ.

## **Научная и практическая значимость**

1. Полученные оценки масс НЗ в дальнейшем могут использоваться для ограничения теоретических моделей сверхплотного вещества.
2. Найденные эффекты в кривых блеска важны для понимания и построения теоретических моделей распространения излучения тесных двойных систем с НЗ.

## **Апробация работы и публикации**

Работа основана на двух статьях, опубликованных в рецензируемых журналах Q1:

1. Bobakov A. V. Karpova A. V. Zharikov S. V. Kirichenko A. Yu. Shibarov Yu. A. Zyuzin D. A. Optical spectral observations of three binary millisecond pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Vol. 524. – no. 3 – 3357-3365;
2. Bobakov A. V. Kirichenko A. Yu. Zharikov S. V. Karpova A. V. Zyuzin D. A. Shibarov Yu. A. Mennickent R. E. Garcia-Álvarez D. Two black widow pulsars in the optical and X-rays // Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Vol. 690. – A173;

Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях:

1. «Астрофизика высоких энергий» НЕА2019, Москва, ИКИ РАН, 17.12.2019 (стендовый доклад);
2. «Астрофизика высоких энергий» НЕА2022, Москва, ИКИ РАН, 19.12.2022 (стендовый доклад);
3. «Физика нейтронных звёзд» PNS2023, Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе, 10.07.2023 (стендовый доклад);
4. «Астрофизика высоких энергий» НЕА2023, Москва, ИКИ РАН, 18.12.2023 (стендовый доклад);
5. «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр» ВАК2024, Нижний Архыз, САО РАН, 25.08.2024 (стендовый доклад);
6. «Астрофизика высоких энергий» НЕА2024, Москва, ИКИ РАН, 23.12.2024 (стендовый доклад);

и семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

# Основная часть

## 0.1 Оптические спектроскопические наблюдения трёх пульсаров в двойных системах

В этом разделе представлены результаты анализа оптических наблюдений трех МСП в двойных системах: PSR J0621+2514, PSR J2302+4442 и PSR J2317+1439. Их компаньоны были идентифицированы в работах [12, 13, 14]. Параметры объектов приведены в таблице 1. Рассмотрим каждый объект.

Радио- и гамма-пульсар PSR J0621+2514 (далее J0621) был открыт в радиодиапазоне на телескопе Грин-Бэнк в ходе поиска пульсаров среди неассоциированных источников гамма-источников телескопа Fermi Large Area Telescope ([15, 16]). Используя данные Слоановского цифрового обзора неба (SDSS) и Панорамного обзорного телескопа и системы быстрого реагирования (Pan-STARRS), в работе [13] обнаружили его возможного компаньона с  $g' \approx 22$  з.в. Сравнив фотометрические данные с кривыми остывания БК, авторы пришли к выводу, что это БК с гелиевым ядром, температурой  $T_{eff} = 10000 \pm 2000$  К и массой  $M \lesssim 0,5M_{\odot}$ . Авторы предположили, что если у компаньона тонкая водородная атмосфера, то его возраст остывания  $\lesssim 0,5$  млрд. лет значительно меньше характеристического возраста J0621 (1,8 млрд. лет). Это указывает на то, что реальный возраст пульсара может быть меньше. В противном случае возможны два варианта. Первый – это наличие у белого карлика толстой водородной оболочки. Второй – образование компаньона из звезды с низкой металличностью [13].

PSR J2302+4442 (далее J2302) был открыт в ходе поиска периодических радиопульсаций от гамма-источника обсерватории Fermi с помощью Нансенского радиотелескопа [17]. Дальнейшие исследования также выявили пульсации в гамма-диапазоне. Рентгеновский источник на положении пульсара был обнаружен с помощью обсерватории XMM-Newton. Используя наблюдения

на Большом Канарском телескопе (GTC), авторы в работе [14] обнаружили компаньон пульсара J2302 с яркостью в фильтре  $r \approx 23,3$  з.в. Этот объект, предположительно, является БК с гелиевым или СО ядром. Сопоставление его звёздной величины с кривыми остывания даёт оценку температуры компаньона  $T_{eff} = 6000_{-800}^{+1000}$  К, массы  $M = 0,5M_{\odot}$  и возраста остывания 1–2 млрд. лет. Используя оценку массы и параметры, полученные из временного анализа, можно получить оценку наклона системы  $73_{-5}^{+6}$  град.

PSR J2317+1439 (далее J2317) был открыт в радиодиапазоне телескопом Аресибо [18]. Он был также обнаружен как гамма-пульсар в работе [19]. Поток его излучения в диапазоне 0,1 – 100 ГэВ составляет  $(6,17 \pm 1,65) \times 10^{-13}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  [20]. Оптический компаньон с яркостью  $g \approx 23$  з.в. был найден в работе [12] с помощью Канадо-Французско-Гавайского телескопа. Используя подход, аналогичный описанному выше для J0621 и J2302, они установили, что компаньон, скорее всего, является БК с температурой  $8100 \pm 500$  К, массой  $\approx 0,4M_{\odot}$ , и возрастом  $\approx 11$  млрд. лет.

Таблица 1: Параметры пульсаров, полученные из каталога ATNF.

МСП	J0621	J2302	J2317
Прямое восхождение $\alpha$ (J2000)	06 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> 8542(1)	23 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> 978387(1)	23 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 09 <sup>s</sup> 236381(5)
Склонение $\delta$ (J2000)	+25°14'03",83(3)	+44°42'22",08051(2)	+14°39'31",26102(1)
Период пульсаций $P$ (мс)	2,7217879391872(4)	5,19232464875420(3)	3,4452510723611(5)
Изменение периода пульсаций $\dot{P}$ ( $\text{с с}^{-1}$ )	2,483(3) $\times 10^{-20}$	1,3868(1) $\times 10^{-20}$	0,24306(2) $\times 10^{-20}$
Мера дисперсии (пк $\text{см}^{-3}$ )	83,629(6)	13,788120(1)	21,8989(2)
Орбитальный период $P_b$ (дней)	1,256356677(3)	125,93529692(3)	2,459331465164(2)
Время восходящего узла $T_{\text{asc}}$ (MJD)	56185,7806471(4)	–	55643,088185856(1)
Функция масс $f_M, M_\odot$	0,001416077(9)	0,009210	0,002199
минимальная оценка массы компаньона $M_{\text{c,min}} M_\odot$	0,15	0,29	0,17
Характеристический возраст $\tau_c \equiv P/2\dot{P}$ (млрд. лет)	1,8	5,93	22,5
Темп потери вращательной энергии $\dot{E}$ (эрг $\text{с}^{-1}$ )	4,71 $\times 10^{34}$	3,9 $\times 10^{33}$	2,33 $\times 10^{33}$
Расстояние $D_{\text{УМВ}}$ (кпк)	1,64	0,86	2,16
Расстояние $D_{\text{NE2001}}$ (кпк)	2,33	1,18	0,83
Расстояние $D_p$ (кпк)	–	> 0,5	2,0 <sup>+0,4</sup> <sub>-0,3</sub>
Оптическая звёздная величина компаньона	$u' = 23(1)$ , $g' = 21,92(6)$	$r' = 23,33(2)$ , $i' = 23,08(2)$	$u = 24,11(83)$ , $g = 22,96(5)$
фильтр = значение (з.в.)	$r' = 21,76(8)$ , $i' = 21,79(12)$		$r = 22,86(4)$ , $i = 22,82(5)$

### 0.1.1 Наблюдения и обработка данных

Спектроскопические наблюдения J0621 проводили в сентябре и октябре 2019 года на GTC с помощью оптической системы для фотометрии и спектроскопии низкого и среднего разрешения (OSIRIS), которая в то время включала две ПЗС-матрицы. Мы использовали решетку R1000B, которая работает в диапазоне  $3630 - 7500 \text{ \AA}$ , в комбинации с щелью шириной  $0,8$  секунд дуги. Полученное спектральное разрешение составило  $5,4 \text{ \AA}$ . Спектр исследуемого объекта располагался на ПЗС-2, в результате было получено три блока наблюдений (ОВ) с полным временем экспозиции  $3210$  с. Положение щели показано на верхней панели рис. 6, а журнал наблюдений представлен в табл. 3. Нами была проведена первичная обработка данных с помощью набора программ GTCMOS [21], являющихся частью пакета прикладных программ IRAF. Мы извлекли одномерные спектры компаньонов из двумерных изображений с помощью процедуры APALL. Мы выполнили калибровку по длине волны, используя спектры HgAr и Ne ламп. Для этого мы сопоставили наблюдаемые и эталонные спектры ламп, после чего аппроксимировали полученную зависимость длин волн от положения линий полиномом третьей степени для получения дисперсионного уравнения вдоль оси дисперсии. Полученное дисперсионное уравнение было стабильно в течение разных ночей, в результате чего среднеквадратичное отклонение (RMS) находилось на уровне  $0,045 \text{ \AA}$ , что соответствует  $2,5 \text{ км с}^{-1}$  на длине волны  $\lambda = 5455 \text{ \AA}$ . Для калибровки по потоку в каждом наблюдении снимался спектр стандартной звезды, а именно, Ross640 (ОВ 1) из [22], G24-9 (ОВ 2) и G158-100 (ОВ 3) из [23], для тех же решеток, но с шириной щели равной  $2,52$  угловых секунд. Стандарты были сняты на той же ПЗС-матрице, что и объект. Их спектры были обработаны тем же способом, что и спектры исследуемого объекта, в результате чего были получены одномерные спектры стандартов. Используя их совместно с кривой атмосферного поглощения, предоставленной командой GTC, мы нашли функции чувствительности ПЗС-матрицы для каждого из наблюдений. Последние были применены к спектрам J0620 для предварительной их калибровки по потоку. Поскольку ширина щели для объекта была значительно меньше, чем для стандартов, мы дополнительно скорректировали получен-

ные спектры на потерю излучения в узкой щели. Для этого мы вычислили потоки в широкополосных фильтрах из каталогов SDSS DR17 [24] и Pan-STARRS DR2 [25], которые перекрываются с наблюдаемым диапазоном длин волн, а также свернули предварительно откалиброванные спектры с кривыми пропускания фильтров. Затем мы подогнали рассчитанные потоки к табличным (табл. 1), используя относительный сдвиг в качестве единственного свободного параметра. В результате мы получили откалиброванные спектры компаньона с отношением сигнал/шум (ОСШ) для континуума  $\sim 10$  для OB1, OB2 и  $\sim 3$  для третьего OB. Низкое ОСШ в OB3 обусловлено погодными условиями, такими как облака и лунная засветка, поэтому мы исключили его из дальнейшего рассмотрения. Чтобы увеличить ОСШ, мы сдвинули спектры в OB1 и OB2 в положение нулевой скорости, используя оценки радиальной скорости  $V_{OB1} = -89 \pm 19 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $V_{OB2} = -326 \pm 24 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , полученные в результате кросскорреляционного анализа спектральных линий. После усреднения сдвинутых спектров мы получили ОСШ  $\sim 15$  в континууме.

Компаньоны J2302 и J2317 наблюдались летом 2019 г. с помощью инструмента OSIRIS и установленной на него решетки R300B в диапазоне длин волн 3600 – 7200 Å с шириной щели 0,8 секунды дуги. Полученное спектральное разрешение составило 15 Å для длины волны 5400 Å. По сравнению с J0621, низкое разрешение было выбрано для получения приемлемого ОСШ, поскольку эти два объекта на 1 з.в. тусклее, чем J0621 1. Спектры компаньонов снимались на ПЗС-матрице 2. Положения щелей представлены на рис. 1, 2 и 3, а журнал наблюдений – в табл. 2. Для каждого из объектов наблюдения проводились в течение пяти ночей с пятью экспозициями длительностью около 10 мин каждая. Во время всех наблюдений небо было чистым. Стандартная обработка данных, а также калибровки по длине волны и потоку выполнялись согласно методике, описанной ранее для J0621. В качестве звезды-стандарта в этих наблюдениях использовалась Feige 110 [23]. ОСШ полученных спектров для различных ночей варьировалось от 2,5 до 3,0 и от 6,5 до 7,0 для J2302 и J2317, соответственно. Низкое спектральное разрешение и ОСШ, а также плохие профили линий в случае J2302 и J2317 не позволяют уверенно измерить радиальные скорости в разных OB. Однако

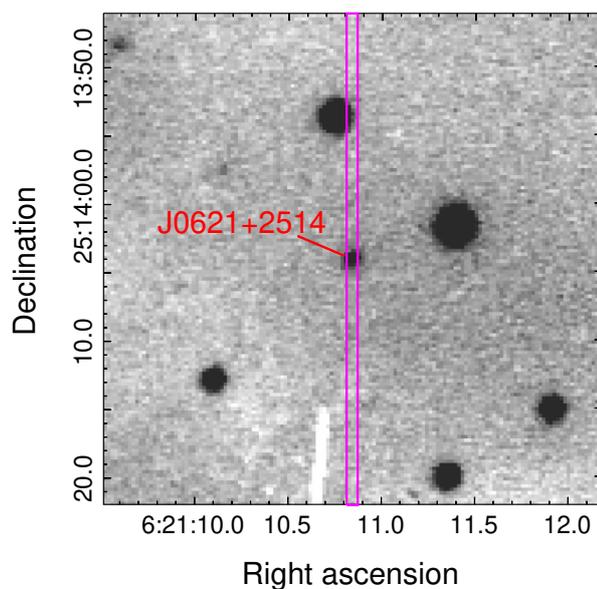


Рисунок 1: Поле зрения пульсара J0621 размером  $0,6 \times 0,6$  секунд дуги<sup>2</sup>, полученное на телескопе ГТС в фильтре  $g'$ , положение щели шириной 0,8 секунд дуги показано пурпурным прямоугольником

разницей между скоростями можно пренебречь, поскольку их орбитальные периоды значительно превышают продолжительность наблюдений (см. табл. 1 и 2). Поэтому для увеличения ОСШ мы усреднили спектры в соответствующих ОВ и получили спектры с результирующими ОСШ  $\sim 5$  и  $\sim 11$  для J2302 и J2317, соответственно.

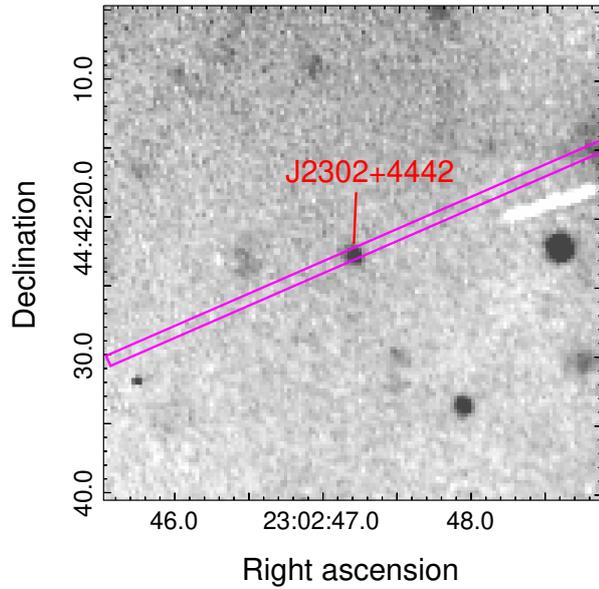


Рисунок 2: Поле зрения пульсара J2302 размером  $0,6 \times 0,6$  секунд дуги<sup>2</sup>, полученное на телескопе ГТС в фильтре  $r'$ , положение щели шириной 0,8 секунд дуги показано пурпурным прямоугольником

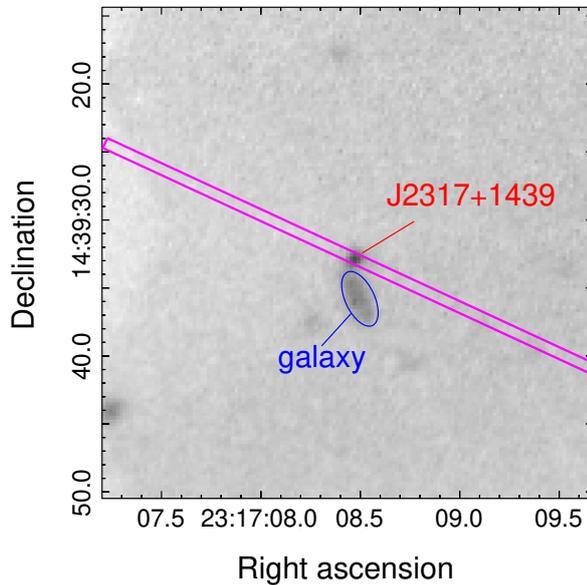


Рисунок 3: Поле зрения пульсара J2317 размером  $0,6 \times 0,6$  секунд дуги<sup>2</sup>, полученное на телескопе ГТС в фильтре  $r'$ , положение щели шириной 0,8 секунд дуги показано пурпурным прямоугольником. Положение щели выбиралось так, чтобы минимизировать вклад от галактики расположенной рядом и обозначенной синим овалом.

Таблица 2: Журнал наблюдений.

ОВ	Дата	Время наблюдения (с)	MJD <sub>mid</sub> <sup>a</sup>	Фаза $\phi^a$	Радиальная скорость <sup>a</sup> (км с <sup>-1</sup> )	Масса воздуха	Качество изображения (секунды дуги)	Решетка
J0621								
1	2019-09-26	3×1070	58766,16	0,75	-89±19	1,13-1,23	0,8	
2	2019-10-10	3×1070	58752,20	0,87	-326±24	1,12-1,21	1,0	R1000B
3	2019-11-20	3×1070	58807,21	0,54	-	1,05-1,11	0,9	
J2302								
1	2019-07-29	5×600	58693,55	-	-	1,04-1,05	0,9	
2	2019-07-29	5×600	58693,59	-	-	1,04-1,07	0,9	R300B
3	2019-08-29	5×600	58725,45	-	-	1,04-1,07	0,8	
4	2019-08-29	5×600	58725,49	-	-	1,04-1,05	0,9	
J2317								
1	2019-07-26	5×545	58691,49	0,52	-	1,15-1,26	0,9	
2	2019-07-27	5×545	58691,54	0,54	-	1,05-1,09	0,9	R300B
3	2019-07-27	5×545	58691,6	0,56	-	1,03-1,05	0,9	
4	2019-08-02	5×545	58697,65	0,03	-	1,07-1,14	0,7	

<sup>a</sup> MJD<sub>mid</sub> – время, соответствующее середине наблюдения и  $\phi$  – орбитальная фаза, вычисленная относительно времени восходящего угла (см. табл. 1). Приведенные радиальные скорости поправлены на барицентр Солнечной системы.

## 0.1.2 Анализ данных

Как видно из рис. 4, Бальмеровские линии поглощения хорошо видны в спектре J0621 и слабо разрешены для J2317. Это указывает на то, что они являются БК с водородной атмосферой. Для J2302 линий не видно, что, вероятно, связано с низкой эффективной температурой. Мы оценили параметры компаньонов, аппроксимировав полученные спектры теоретическими моделями излучения БК с водородной атмосферой (DA), рассчитанными для сетки значений эффективной температуры  $T_{eff}$  и поверхностной гравитации  $g$  [26]. Модельный спектр приводился к наблюдаемому согласно нормировочному коэффициенту, определяемому как

$$F_{\lambda}^m = \pi \left( \frac{R}{D} \right) \times f_{\lambda}^m, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус компаньона,  $D$  – расстояние до источника, а  $f_{\lambda}^m$  – теоретический поток, рассчитанный в работе [27] для  $5500 \text{ K} \leq T_{eff} \leq 80000 \text{ K}$  и  $6,5 \leq \log(g) \leq 9,5$ . Для получения  $f_{\lambda}^m$  мы использовали линейную интерполяцию значений в узлах сетки  $T_{eff} - \log(g)$ . Для уменьшения разрешения модельных спектров мы свернули их с функцией Гаусса с  $\sigma = 5 \text{ \AA}$ . Чтобы учесть межзвёздное поглощение, мы использовали эмпирическое соотношение между поглощением и расстоянием, взятым из трёхмерной карты пыли Галактики [28]. Расстояние в этих соотношениях было связано с выражением для  $F_{\lambda}^m$ , представленным выше, а для вычисления зависимости поглощения от длины волны была применена модель из работы [29]. В результате свободными параметрами в модели были  $T_{eff}$ ,  $\log(g)$ ,  $R$ ,  $D$  и избыток цвета  $E(B - V)$ . Рассмотрим результаты моделирования для каждого из объектов.

### J0621

Для начала мы произвели нормировку спектра полиномом низкого порядка. Нормированные спектры зависят только от  $T_{eff}$  и  $\log(g)$ . Такая нормировка позволила уменьшить количество параметров в модели и произвести оценку  $T_{eff} = 8600 \pm 200 \text{ K}$  и  $\log(g) = 6,5 \pm 0,8$ , при этом  $\chi^2 = 0,41$  для 1379 степеней свободы (*dof*). Полученные значения  $T_{eff}$  и  $\log(g)$  находятся в хорошем согласии с оценками, полученными из фотометрических данных

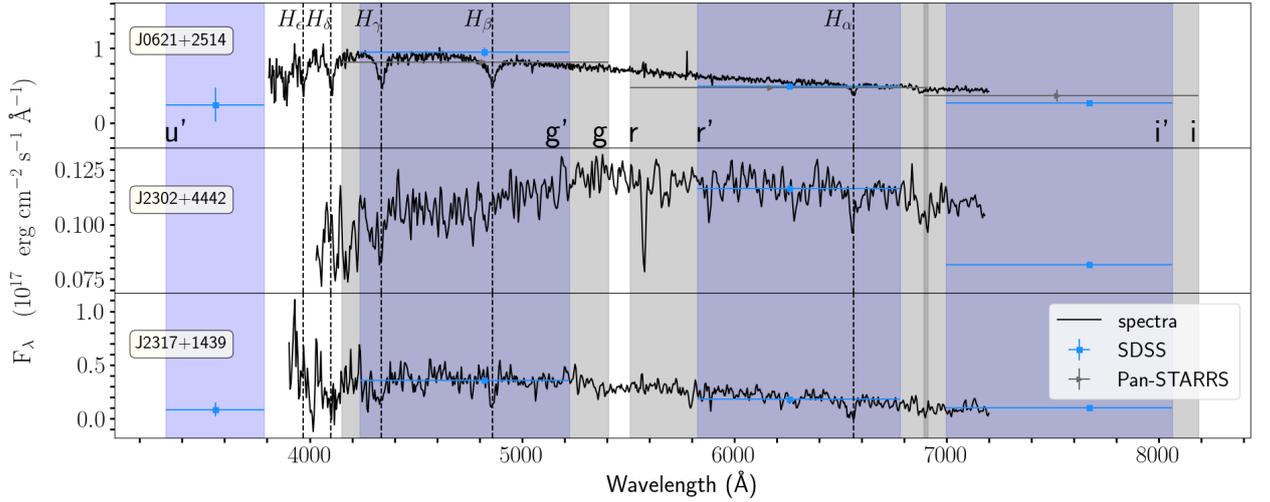


Рисунок 4: Полученные после калибровки спектры J0621, J2302 и J2317. Положение линий Бальмера показаны пунктирными линиями. Синими и светло-серыми полосами показаны полосы пропускания фильтров SDSS и Pan-STARRS, соответственно, точками с усами показаны фотометрические потоки в различных фильтрах.

в работе [13]. Их большие неопределенности связаны с низкими ОСШ в наблюдаемых спектральных линиях. Результаты представлены на рис. 5. Далее мы оценили радиус, на основании найденной поверхностной гравитации и соотношения масса-радиус для БК из работы [30]. Поверхностная гравитация определяется формулой

$$g = \frac{GM}{R^2}, \quad (2)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса и  $R$  – радиус. В результате мы определили значение радиуса компаньона  $R_{J0621} = 13_{-6}^{+9} \times 10^3$  км или  $0,028_{-0,012}^{+0,010} R_{\odot}$ . Значения массы компаньона лежит в диапазоне  $0,03 - 0,26 M_{\odot}$ . Такой широкий диапазон значений возникает из-за большой погрешности при определении поверхностной гравитации при аппроксимации данных моделью. Формальное значение массы компаньона для наилучших параметров аппроксимации составило  $M_{J0621} = 0,09 M_{\odot}$ .

Используя полученные параметры, мы оценили расстояние до системы. Для этого в нашей модели мы зафиксировали  $T_{eff}$ ,  $\log(g)$  и  $R_{J0621}$ , оставив свободным параметром только  $D$ , учитывая при этом связанное с ним изме-

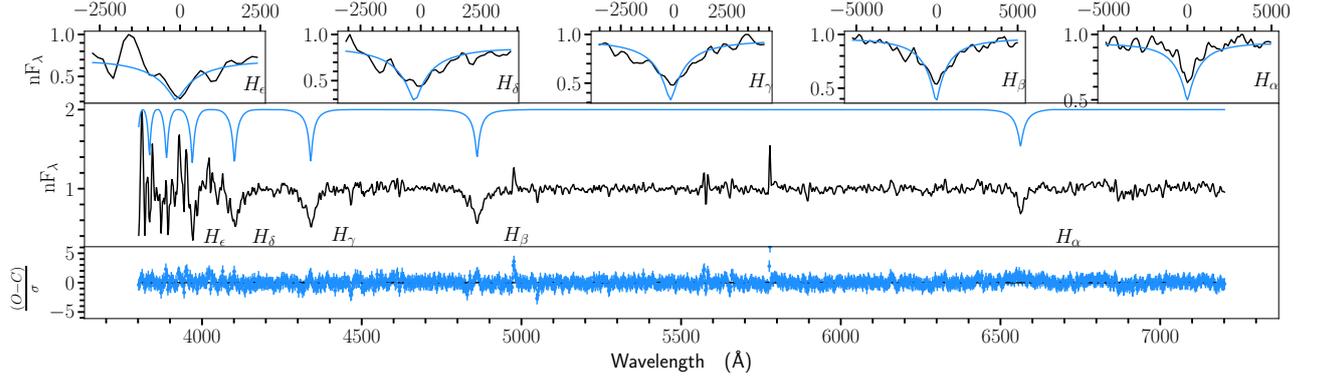


Рисунок 5: На верхних и средней панелях нормированный спектр компаньона J0621 показан черной линией, а синими – нормированная модель излучения с параметрами  $\log(g) = 6,5$ ,  $T_{\text{eff}} = 8600$  К сдвинутая на 1,0. Невязка в единицах  $\sigma$  представлена на нижнем изображении. На верхних панелях представлены выделенные регионы Бальмеровских спектральных линий

нение цвета  $E(B - V)$ . В результате наши оценки составили  $D = 1100 \pm 300$  пк и  $E(B - V) = 0,19 \pm 0,02$ , что соответствует  $\chi^2 = 0,4$  для 1380 (*dof*) (см. рис. 6).

## J2302 и J2317

В спектрах J2302 и J2317 ОСШ не позволяет разрешить Бальмеровские линии для обоих объектов. Из-за этого нельзя получить убедительные оценки  $T_{\text{eff}}$  и  $\log(g)$ . Поэтому для аппроксимации спектров этих объектов мы зафиксировали  $D$  в нормировочном множителе  $(R/D)^2$  модели на значениях, полученных из радиоданных, представленных в табл. 1. Значения  $E(B - V)$  были взяты из соотношения избыток цвета – расстояние для принятых  $D$ . Далее, учитывая соотношение масса-радиус для БК, мы связали радиус с  $\log(g)$ . В результате для каждого из объектов мы нашли температуру и поверхностную гравитацию для трех возможных значений расстояния (табл. 3). Используя результаты подгонки, мы можем ограничить массы БК. Для диапазона расстояний J2317  $M_{\text{J2317}} = 0,11 - 0,53 M_{\odot}$ . Для J2317 значение температуры достигает минимального допустимого значения для моделей атмосферы, поэтому мы определили только верхние пределы для разных расстояний.

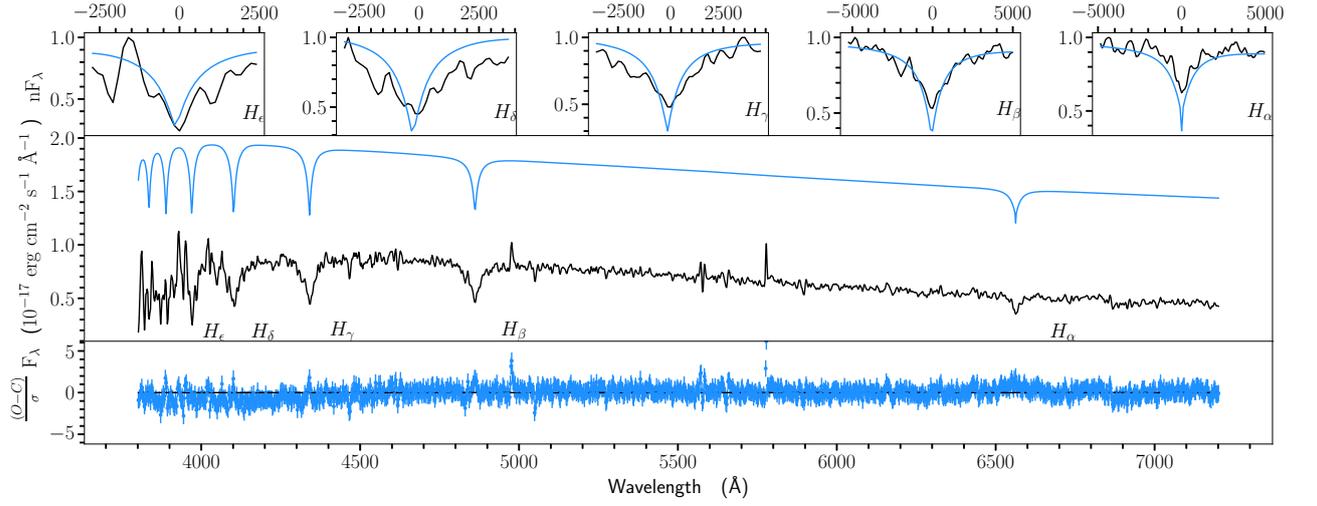


Рисунок 6: Изображение повторяет рис. 5, но для случая ненормированного спектра. Модель на центральной панели сдвинута относительно спектра компаньона на  $10^{-17}$  эрг  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{Å}^{-1}$ . Нормировочный множитель для модели соответствует  $D = 1100$  пк и  $E(B - V) = 0,19$ .

Таблица 3: Параметры компаньонов пульсара, полученные в результате аппроксимации моделью излучения БК. Для J2317 и J2302 параметры получены при фиксированных возможных расстояниях.

$D$ (кпк)	$E(B - V)$	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log(g)$	$M_c$ ( $M_{\odot}$ )	$R_c$ ( $R_{\odot}$ )
J0621					
$1,1 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,02$	$8600 \pm 200$	$6,5 \pm 0,8$	$0,09^{+0,26}_{-0,06}$	$0,028^{+0,010}_{-0,012}$
J2302					
0,5	$0,12 \pm 0,04$	$< 5500$	$8,1 \pm 1,0$	$0,64^{+0,60}_{-0,44}$	$0,012^{+0,009}_{-0,006}$
0,9	$0,13 \pm 0,02$	$< 5500$	$6,8 \pm 1,0$	$0,16^{+0,37}_{-0,12}$	$0,024^{+0,020}_{-0,010}$
1,2	$0,18 \pm 0,02$	$< 6000$	$< 6,5$	$< 0,09$	$> 0,028$
J2317					
0,8	$0,05 \pm 0,02$	$10500 \pm 2000$	$8,6 \pm 1$	$0,53^{+0,60}_{-0,37}$	$0,012^{+0,009}_{-0,006}$
2,0	$0,05 \pm 0,02$	$9600 \pm 2000$	$7,0 \pm 1$	$0,14^{+0,33}_{-0,10}$	$0,022^{+0,014}_{-0,009}$
2,2	$0,05 \pm 0,02$	$9400 \pm 2000$	$6,8 \pm 1$	$0,11^{+0,27}_{-0,08}$	$0,025^{+0,015}_{-0,010}$

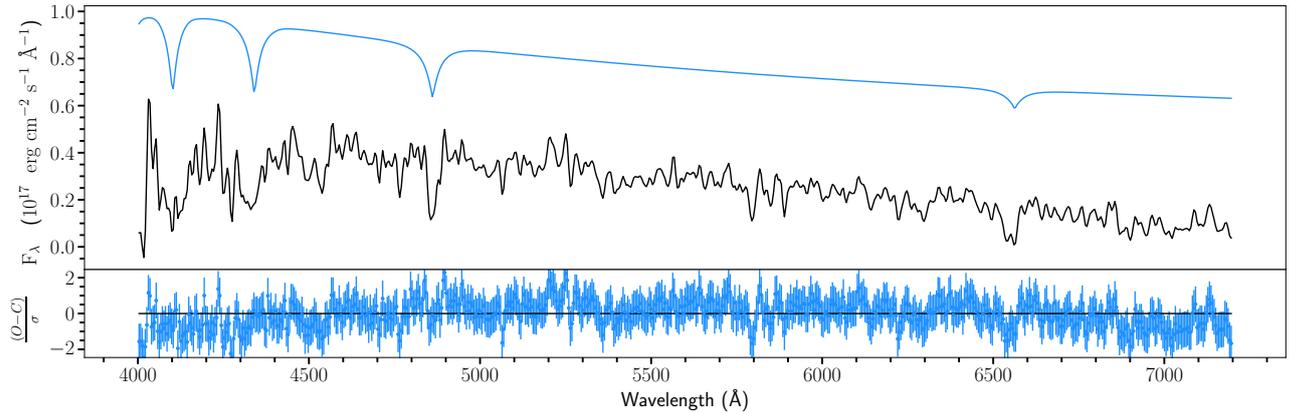


Рисунок 7: Итоговый спектр компаньона J2317 и наилучшая модель для фиксированного расстояния  $D = 830$  пк, показанные на верхней панели черной и голубой линией, соответственно. Модель для наглядности сдвинута на  $0,5 \times 10^{-17}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$  Å $^{-1}$ . Невязка в единицах  $\sigma$  представлена на нижнем изображении.

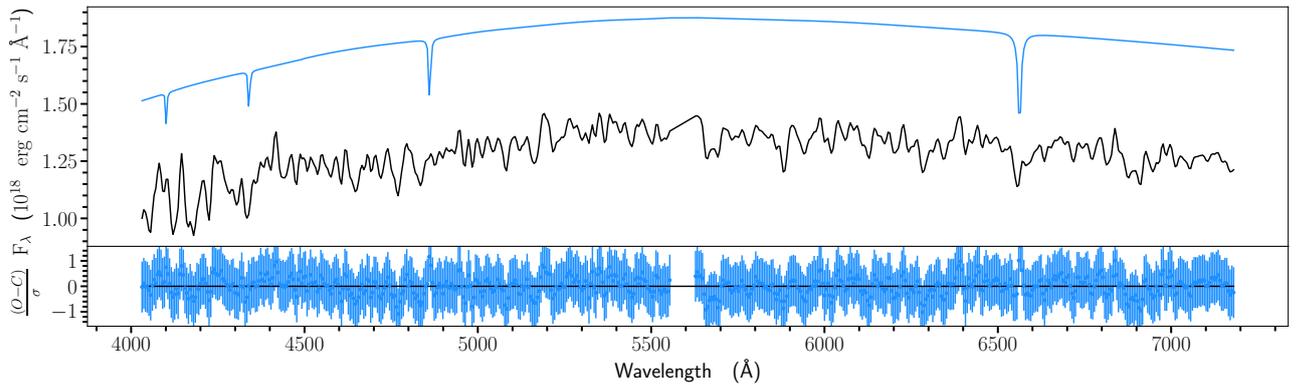


Рисунок 8: Итоговый спектр компаньона J2317 и наилучшая модель для фиксированного расстояния  $D = 900$  пк. Показаны на верхней панели черной и голубой линией соответственно. Модель для наглядности сдвинута на  $0,5 \times 10^{-18}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$  Å $^{-1}$ . Невязка в единицах  $\sigma$  представлена на нижнем изображении.

### 0.1.3 Результаты

Линии поглощения Бальмера, обнаруженные в спектрах компаньонов J0621 и J2317, ясно показывают, что они являются БК с водородной атмосферой. В спектре компаньона J2302 спектральные линии не наблюдаются, тем не менее, он может быть описан самой холодной из имеющихся теоретических моделей водородных атмосфер, поэтому можно сделать вывод, что он также может быть отнесен к семейству БК с водородными атмосферами.

Компаньоны J0621 и J2317 относительно горячие, и обладают температурами  $T_{eff}$  в диапазонах 8400–8800 и 7400–12500 К, соответственно, в то время как компаньон J2302 значительно холоднее ( $T_{eff} < 6000$  К). Температура J0621 согласуется с грубыми оценками, полученными в работе [13] по фотометрическим данным, однако её неопределенность значительно меньше. Спектральные данные для компаньона J2302 полностью исключают температуры выше 6000 К, которые допускались в оценках, основанных на фотометрии [14]. Спектральная температура J2317 согласуется с фотометрической [12], хотя её неопределенность остается довольно большой.

Качество спектра компаньона J0621 позволило нам независимо оценить расстояние до него  $D_{J0621} = 1,1 \pm 0,3$  кпк. Это значение согласуется на уровне  $\sim 2\sigma$  с значением  $\approx 1,6$  кпк, полученным на основании радиоданных и модели распределения Галактической электронной плотности [31], и не согласуется с  $\approx 2,3$  кпк, полученным с помощью модели [32]. На основании полученного нами расстояния и соответствующего ему значения  $E(B - V)$ , а также звездной величины мы поместили этот объект на диаграмму цвет–звездная величина (CMD). Это позволило сравнить полученную величину с теоретическими кривыми остывания для БК. Согласно рисунку 9. Значение на диаграмме соответствует белому карлику с гелиевым ядром и массой, лежащей в диапазоне  $0,16 - 0,35 M_{\odot}$ . Из спектральных данных мы определили массу компаньона для J0621 с большой неопределенностью, тем не менее верхняя граница нашей оценки  $\approx 0,35 M_{\odot}$  лежит в диапазоне значений, полученном на основании кривых остывания для белого карлика с гелиевым ядром. Также, используя кривые остывания, мы определили возраст остывания  $\lesssim 2$  млрд. лет.

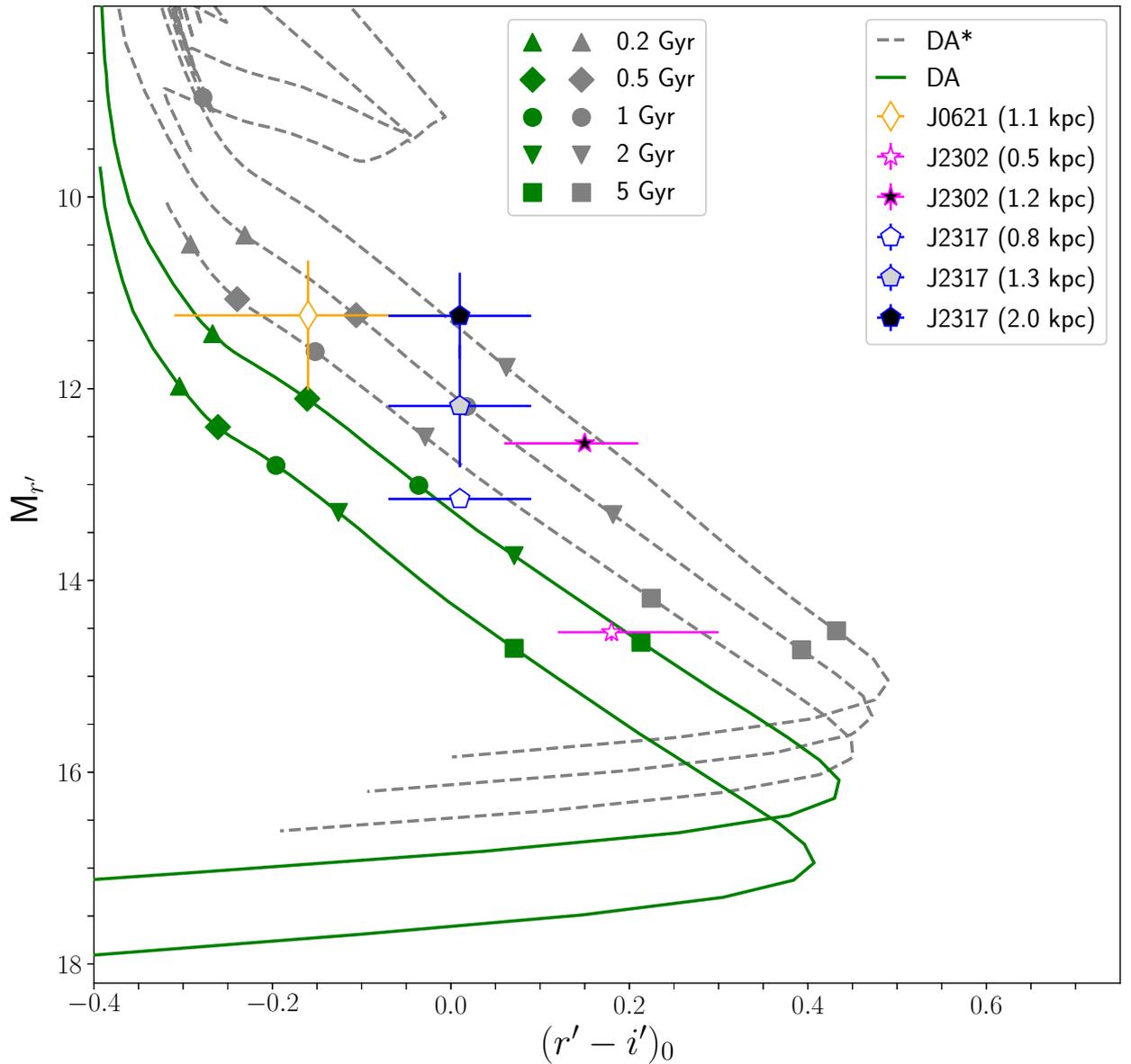


Рисунок 9: Диаграмма цвет–звёздная величина с теоретическими кривыми остывания БК. Пунктирной линией представлены модели соответствующие водородным атмосферам и масса 0,1821, 0,2724 и 0,4352  $M_{\odot}$  [33], зелёной сплошной линией показаны модели для БК с водородной атмосферой и СО ядром и массами 0,6 и 1  $M_{\odot}$  [34, 35, 36]. Массы увеличиваются от нижней до верхней кривой. Положения компаньонов показаны различными символами, согласно легенде на изображении. На изображении также указаны времена остывания.

Для двух других объектов определение параметров по кривым остывания невозможно ввиду большой неопределённости расстояния до них, поэтому нельзя сделать однозначного вывода о составе ядер этих компаньонов.

Тем не менее, для компаньона J2317 теоретическое соотношение массы и орбитального периода предсказывает массу компаньона  $M_{J2317} \approx 0,2 M_{\odot}$ , которая лежит в диапазоне, полученном нами из спектроскопии. Это значение также согласуется с положением на диаграмме цвет–звёздная величина для расстояния 2 кпк. и случая белого карлика с гелиевым ядром. Возраст в таком случае можно определить как  $\lesssim 2$  млрд. лет. А значит, в два раза большая оценка расстояния для этого объекта, полученная в работе [12] из фотометрических данных  $D = 1,3_{-0,3}^{+0,4}$  кпк. не согласуется с теоретическими предсказаниями, а потому большая оценка расстояния может быть более релевантна. Стоит также отметить, что для этого расстояния консервативная оценка возраста охлаждения  $0,5$  млрд. лет  $\lesssim t_{cool} \lesssim 2,5$  млрд. лет, в то время как оценка [12]  $t_{cool} \sim 11$  млрд. лет. Такое значение кажется слишком большим для температуры белого карлика  $T_{eff} \sim 10000$  К. Это расхождение, вероятно, связано с тем, что возраст в моделях [37] отсчитывается от нулевого возраста главной последовательности, и для получения реальных возрастов охлаждения необходимы определенные поправки.

Большая неопределенность массы компаньона J2302, полученная с помощью спектроскопии, не позволяет нам определить химический состав его ядра. На данном этапе для этой БК допускается наличие как гелиевого, так и углеродного ядра.

В случае J0621 мы также определили радиальные скорости для двух спектров на разных орбитальных фазах. Чтобы оценить потенциальный разброс амплитуды радиальных скоростей, мы аппроксимировали полученные точки скорости синусоидальной функцией

$$V = K_c \cos(2\pi\phi) + \gamma, \quad (3)$$

где  $V$  – радиальная скорость,  $K_c$  – полуамплитуда радиальных скоростей,  $\phi$  – фаза, а  $\gamma$  – системная скорость. В результате  $2\sigma$  диапазон для  $K_c$  и  $\gamma$  составил  $175$ – $536$  км с<sup>-1</sup> и  $27$ – $148$  км с<sup>-1</sup> соответственно. Такие большие неопределенности в основном обусловлены наличием только двух точек наблюдения. Тем

не менее, диапазон  $\gamma$  согласуется с наблюдаемым распределением скоростей для пульсаров в двойных системах [38]. Учитывая период  $P_b$  и функцию масс  $f_M$ , полученную из радионаблюдений (табл. 1), полуамплитуда радиальной скорости пульсара  $K_p$  может быть оценена как

$$K_p = P_b \sqrt[3]{2\pi G f_M} = 22 \text{ км с}^{-1}, \quad (4)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная. Отсюда отношение масс компонент двойной системы

$$\frac{M_p}{M_c} \equiv \frac{K_p}{K_c} \in (7, 9, 24, 2). \quad (5)$$

С другой стороны, можно воспользоваться выражением, связывающим  $K_c$  и  $K_p$ ,  $f_M$  и  $M_c$

$$K_c = K_p \sqrt{M_c \sin^3(i) f_M^{-1} - 1}, \quad (6)$$

где  $i$  – наклонение системы. Основываясь на оценке массы, полученной из спектроскопии  $M_c = 0,09_{-0,06}^{+0,26} M_\odot$ , можно установить верхний предел на  $K \leq 260 \text{ км с}^{-1}$  при наклонении  $i \leq 90$  град. Кривая лучевой скорости, соответствующая этой верхней границе, показана пунктирной линией на рис. 10. Как видно, эта линия согласуется с модельной лучевой скоростью в пределах  $2\sigma$ . Однако соответствующая верхняя граница отношения масс равна 11,7, что примерно в два раза ниже, чем полученная в результате аппроксимации. Для наших оценок  $M_c$  более высокие значения отношения масс не согласуются с  $f_M$  для любого  $i$ . Это сильно ограничивает ожидаемую кривую лучевых скоростей и приводит к консервативному верхнему пределу массы нейтронной звезды в системе  $\lesssim M_\odot$ .

Неопределенности этих оценок, основанных только на двух измерениях, велики, но, тем не менее, могут быть полезны для будущих определений масс компаньона и пульсара. Наши наблюдения показали, что измерения кривой радиальных скоростей для J0621 возможны с помощью большого телескопа и спектроскопии среднего разрешения. Такие данные могут значительно улучшить наши знания о параметрах системы, включая надежные ограничения на массы компаньона и нейтронной звезды. Более глубокая фотометрия помогла бы лучше определить его эволюционную стадию, а более точные измерения расстояния были бы также полезны для этого и двух других компаньонов,

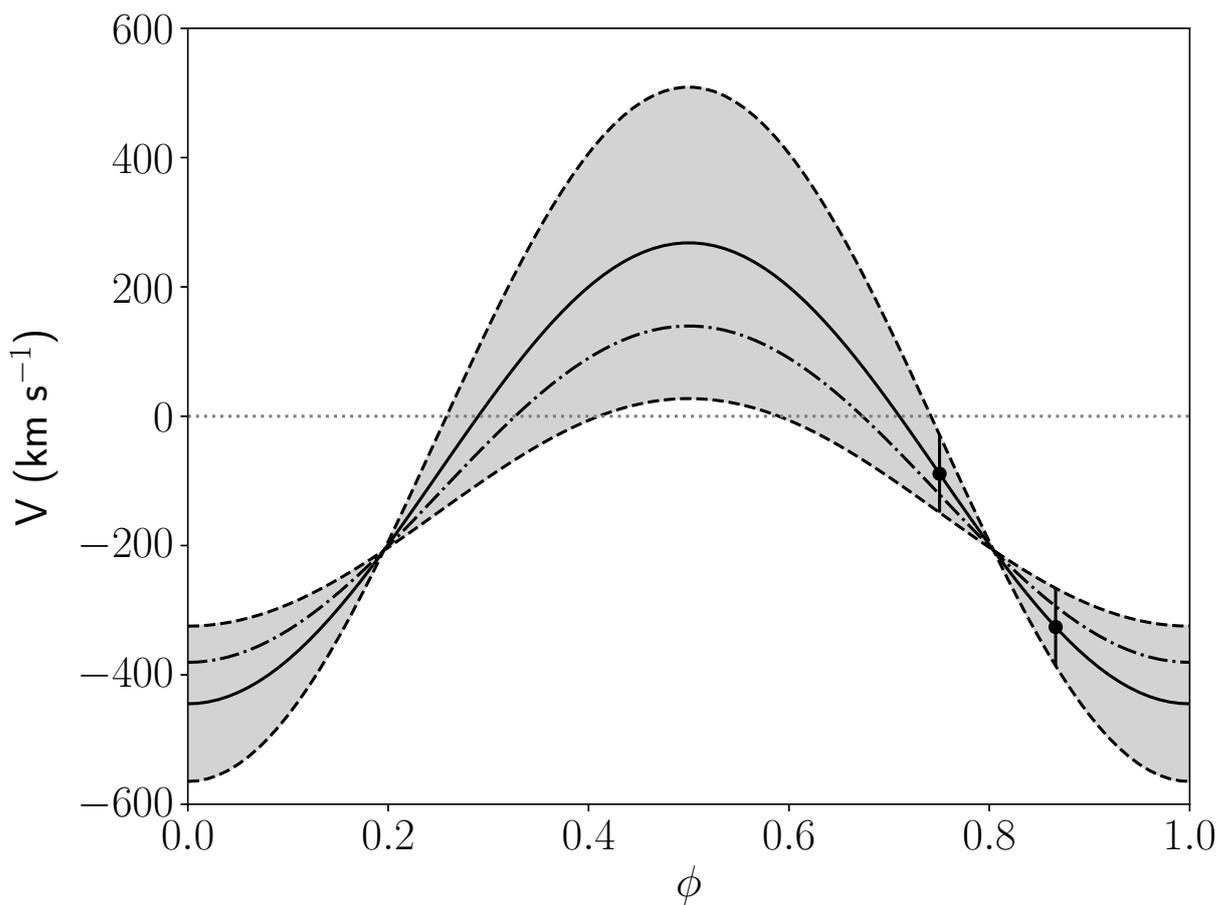


Рисунок 10: Радиальные скорости, измеренные для компаньона J0621, – черные точки с усами  $2\sigma$ , сплошная черная линия соответствует модели проведенной через центральные значения скоростей, а пунктирные – через  $2\sigma$  пределы.

для которых необходима спектроскопия более высокого разрешения, чтобы получить более убедительные ограничения на их параметры.

## 0.2 Две чёрные вдовы

Два пульсара J2017–1614 (J2017), J1513–2550 (J1513) были обнаружены с помощью радиотелескопа обсерватории Грин-Бэнк в рамках поиска не ассоциированных источников из каталога обсерватории Fermi. Их параметры приведены в таблице [??](#). После обнаружения в радиодиапазоне пульсаций с периодом собственного вращения они также были найдены в гамма-диапазоне [\[39\]](#). Также для обоих МСП в ряде наблюдений в радиодиапазоне видны затмения.

Оптический компаньон пульсара J2017 был впервые обнаружен в рамках фотометрического исследования на 2,4-метровом телескопе обсерватории Китт-Пик (MDM). Полученная кривая блеска в фильтре  $R$  показала сильную переменность с амплитудой  $\sim 3$  з.в. в диапазоне от  $R \approx 21,8$  з.в. до  $R \gtrsim 24$  з.в. и периодом  $\approx 2,3$  часа, который согласуется с орбитальным периодом, полученным из радиоданных.

Возможный компаньон пульсара J1513 может быть ассоциирован с источником PSO J228.3472–25.8420 из каталога DR2 телескопа Pan-STARRS. Его яркость в фильтре  $i$  составляет 22 з.в.

Детальные оптические исследования J1513 и J2017 до сих пор не проводились. В этой главе рассматриваются многополосные фотометрические наблюдения с целью определения параметров объектов.

Таблица 4: Параметры пульсаров J1513 и J2017 из работы Сапра-арса [16] и каталогов ATNF и третьего пульсарного каталога Fermi LAT [40].

МСП	J0621	
Прямое восхождение $\alpha$ (J2000)	$20^{\text{h}}17^{\text{m}}46^{\text{s}}.1478(8)$	$15^{\text{h}}13^{\text{m}}23^{\text{s}}.32059(6)$
Склонение $\delta$ (J2000)	$-16^{\circ}14'15''.51(5)$	$-25^{\circ}50'31''.285(3)$
Галактическая широта $l$ , град.	27,314	338,820
Галактическая долгота $b$ , град.	-26,220	26,964
Период обращения $P$ , мс.	$2,3142872649224(4)$	$2,1190675651177(1)$
Производная периода $\dot{P}$ , $\text{с с}^{-1}$	$2,45(5) \times 10^{-21}$	$21,61(2) \times 10^{-21}$
Орбитальный период $P_b$ , дней	$0,0978252578(4)$	$0,1786354505(8)$
Время восходящего узла $T_{\text{asc}}$ , MJD	$56704,756314(2)$	$56728,4539340(6)$
Функция масс $f_M$ , $M_{\odot}$	$9,334(3) \times 10^{-6}$	$2,2874(1) \times 10^{-6}$
Мера дисперсии DM, пк $\text{см}^{-3}$	$25,4380(4)$	$46,86(7)$
Расстояние $D_{\text{UMW16}}$ , кпк	1,4	4,0
Расстояние $D_{\text{NE2001}}$ , кпк	1,1	2,0
Характеристический возраст $\tau_c \equiv P/2\dot{P}$ , млрд. лет	15,0	1,55
Темп потери энергии вращения $\dot{E}$ , эрг $\text{с}^{-1}$	$7,8 \times 10^{33}$	$9,0 \times 10^{34}$
Минимальная масса компаньона $M_{\text{c, min}}$ , $M_{\odot}$	0,03	0,02
Собственное движение по прямому восхождению $\mu_{\alpha} \cos \delta$ , мсд в $\text{год}^{-1}$	-	-6,3(1)
Собственное движение по склонению $\mu_{\delta}$ , мсд в $\text{год}^{-1}$	-	-3,5(4)

## 0.2.1 Наблюдения и обработка данных

### 0.2.2 J2017

Фазово-разрешенные фотометрические наблюдения поля J2017 были выполнены 7 сентября 2021 года с помощью прибора HiPERCAM [41, 42, 43] на 10,4-метровом телескопе GTC. HiPERCAM – особый инструмент, позволяющий проводить одновременные фотометрические наблюдения в пяти ( $u_s$ ,  $g_s$ ,  $r_s$ ,  $i_s$  и  $z_s$ ) высокопроизводительных фильтрах “супер” SDSS.

Для каждого из фильтров было получено 79 изображений с индивидуальным временем экспозиции 140 с. Поле зрения (FoV) составляло  $2,8 \times 1,4$  угловые секунды<sup>2</sup>, размер пикселя получаемого изображения соответствует 0,081 угловой секунды. Погодные условия во время наблюдения объекта были фотометрическими. Журнал наблюдений приведён в таблице 5.  $u_s = 24,9–25,2$  з.в.,  $g_s = 23,5–25,0$  з.в.,  $r_s = 23,3–24,5$  з.в.,  $i_s = 22,7–24,2$  з.в. и  $z_s = 23,0–24,3$  Мы провели первичную обработку данных согласно процедуре, описанной в работе [41], которая включает в себя вычитание темновых кадров и коррекцию плоского поля. Также, используя файлы, полученные с сайта HiPERCAM, мы произвели вычитание “плохих” пикселей на изображениях. Кроме того, мы проделали процедуру коррекции искажений, вызванных интерференцией на ПЗС-матрице для изображений в полосах  $i_s$  и  $z_s$ , где они проявляются сильнее всего. Пример изображения в фильтре  $r_s$  представлен на рис. 11.

Используя алгоритм оптимальной фотометрии [44], мы измерили инструментальные звёздные величины компаньона J2017 и десятка ярких звёзд в поле зрения телескопа, чьи величины доступны в каталоге Pan-STARRS [25]. Чтобы избежать проблем с определением центра компаньона при снижении соотношения сигнала к шуму ниже 5, его положение определялось относительно близкой звезды. Для поправки полученных величин на атмосферное поглощение мы использовали коэффициенты поглощения, измеренные для GTC  $k_{u_s} = 0,48$ ,  $k_{g_s} = 0,17$ ,  $k_{r_s} = 0,1$ ,  $k_{i_s} = 0,05$  и  $k_{z_s} = 0,05$ . Калибровка по потоку проводилась с помощью спектрофотометрических стандартов WD1606+422 и WD2047+3725 [43], наблюдавшихся в ту же ночь и с теми же установками телескопа, что и объект. Для устранения возможных систе-

матических ошибок и учёта вариаций нуль-пункта во время наблюдений мы использовали методику, описанную в работе [45], и упомянутые выше звёзды Pan-STARRS. Средние величины которых сравнивались с каталожными, приведёнными к фильтрам SDSS с помощью фотометрического уравнения из работы [46]. В результате значения нуль-пункта для каждого из фильтров составили  $z_{u_s} = 27,30(5)$ ,  $z_{g_s} = 27,80(5)$ ,  $z_{r_s} = 27,65(5)$ ,  $z_{i_s} = 27,41(5)$  и  $z_{z_s} = 27,06(5)$ . Мы также оценили  $3\sigma$  пределы чувствительности для каждого из фильтров, которые менялись в диапазонах:  $u_s = 24,9\text{--}25,2$  з.в.,  $g_s = 23,5\text{--}25,0$  з.в.,  $r_s = 23,3\text{--}24,5$  з.в.,  $i_s = 22,7\text{--}24,2$  з.в. и  $z_s = 23,0\text{--}24,3$  з.в.

На всех изображениях в фильтре  $u_s$  яркость источника находилась ниже предела чувствительности. В результате мы получили четыре кривые блеска в фильтрах  $g_s$ ,  $r_s$ ,  $i_s$  и  $z_s$ .

## J1513

Фотометрические наблюдения поля пульсара J1513 проходили с использованием 2,1-метрового телескопа Мексиканской национальной астрономической обсерватории Сан-Педро-Мартин (OAN-SPM) и на 6,5-метровом телескопе Magellan-1.

Наблюдения OAN-SPM проводились в фильтрах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  и  $I$  с помощью прибора “Rueda Italiana” в течение трёх ночей в мае 2019 года. Поле зрения детектора составляло  $6 \times 6$  угловых минут<sup>2</sup>. Масштаб пикселя при этом 0,34 угловых секунды в режиме бинирования пикселей ПЗС-матрицы  $2 \times 2$ . Наблюдения на Magellan-1 проводились в фильтре  $r'$  системы SDSS с помощью прибора IMACS в рамках одной ночи в апреле 2022 года. Масштаб пикселя составлял 0,111 угловых секунд. Объект располагался на третьей ПЗС-матрице с полем зрения  $3,8 \times 7,5$  угловых минут<sup>2</sup>. Во время наблюдений погодные условия были фотометрическими. Журнал всех наблюдений приведён в таблице 5.

Для каждого набора данных с помощью пакета прикладных программ IRAF была проведена стандартная обработка, включающая коррекцию теневых токов, коррекцию плоского поля и удаление космических лучей. Процедура учёта искажений, вызванных интерференцией на ПЗС-матрице, была

применена к изображениям OAN-SPM в фильтре  $I$ , где этот эффект наиболее заметен.

Астрометрическая калибровка была проведена с помощью 12 звёзд из астрометрического каталога Gaia DR2 [47]. В результате формальная точность астрометрической привязки составила  $\Delta\alpha \lesssim 0,08$  угловых секунд и  $\Delta\beta \lesssim 0,08$  угловых секунд для Magellan-1 и  $\Delta\alpha \lesssim 0,04$  угловых секунд и  $\Delta\beta \lesssim 0,04$  для OAN-SPM.

Пример изображения поля пульсара J1513, полученного на Magellan-1 в фильтре  $r'$ , представлен на рис. 12. Координаты предположительного компаньона пульсара совпадают с положением, полученным в радиодиапазоне, что подтверждает их связь.

Фотометрические калибровки проводились с использованием спектрофотометрических стандартов, наблюдавшихся в те же ночи, что и исследуемый объект. Для этого в данных с телескопа Magellan-1 в качестве стандартов использовались три звезды из поля PG 1525-071 [48], а также коэффициент поглощения атмосферы  $k_{r'} = 0,1$ , измеренный командой IMACS. В результате нуль-пункт оказался равен  $r' = 28,15(1)$  з.в. а  $3\sigma$  предел чувствительности соответствовал  $\approx 24,8$ . Для данных OAN-SPM использовался стандарт PG1323 и коэффициенты поглощения  $k_B = 0,25$  з.в.,  $k_V = 0,14$  з.в.,  $k_R = 0,07$  з.в. и  $k_I = 0,06$  з.в. взятые с сайта телескопа. В результате нуль-пункты составили  $z_R = 24,96(2)$  з.в.,  $z_B = 24,91(3)$  з.в.,  $z_V = 25,16(2)$  з.в., и  $z_I = 24,15(2)$  з.в., а  $3\sigma$  пределы чувствительности составили  $\approx 23,6$  з.в.,  $\approx 24,1$  з.в.,  $\approx 23,8$  з.в., и  $\approx 22,0$  з.в. соответственно.

Для полученных данных мы провели стандартную апертурную фотометрию исследуемого источника, а также нескольких звёзд в поле. Значения апертур для извлечения потока мы выбирали согласно алгоритму оптимальной фотометрии [44]. Для учёта возможных статистических ошибок кривые блеска звёзд из поля сравнивались с их каталожными значениями.

Таблица 5: Журнал наблюдения J2017 и J1513.

MJD	Дата	Фильтр	Время наблюдения, с	Воздушная масса	Качество изображения, сек. дуги	Бининг
<b>J2017 / GTC</b>						
59464,91	2021-09-07	$u_s$	79×140	1,41–1,83	0,6–1,3	1×1
		$g_s$	79×140			1×1
		$r_s$	79×140			1×1
		$i_s$	79×140			1×1
		$z_s$	79×140			1×1
<b>J1513 / OAN-SPM 2,1-m</b>						
58604,81	2019-05-01	$R$	17×600	1,9–2,2	1,9–2,4	2×2
58605,78	2019-05-02	$R$	22×600	2,0–2,4	1,7–1,8	2×2
58606,78	2019-05-03	$B$	5×600	2,0–2,4	1,9–2,6	2×2
		$V$	5×600			2×2
		$R$	5×600			2×2
		$I$	5×600			2×2
<b>J1513 / Magellan-1</b>						
59692,23	2022-04-23	$r'$	64×50	1,0–1,2	0,4–0,6	1×1
59692,34	2022-04-23	$r'$	57×50	1,2–1,7	0,4–0,5	2×2

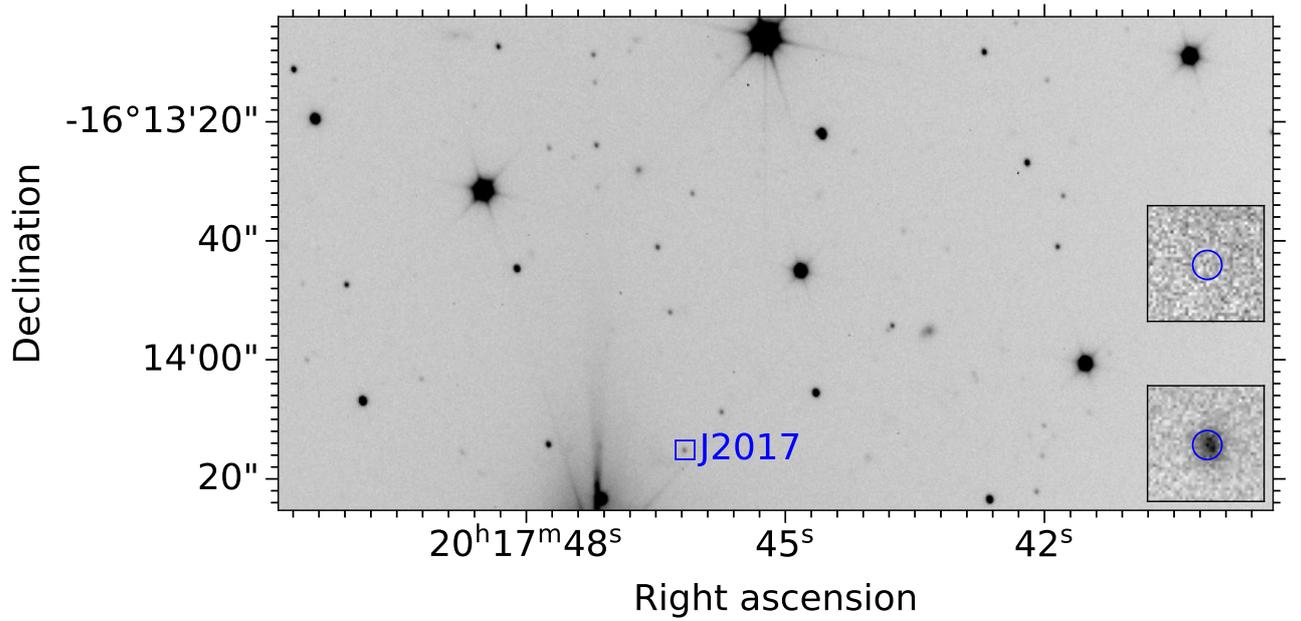


Рисунок 11: Поле пульсара J2017 размера  $2,8 \times 1,4$  секунд дуги<sup>2</sup>, полученное с помощью HiPERCAM в фильтре  $r_s$ . Во врезках приведены окрестности пульсара в минимуме и максимуме яркости компаньона

### 0.2.3 Анализ данных

Полученные в результате оптические кривые блеска, поправленные на барицентр Солнечной системы и свёрнутые с орбитальным периодом, представлены на рис. 13, 14. Кривые блеска демонстрируют сильную переменность  $\gtrsim 2$  з.в. с одним пиком за период. Такое поведение характерно для чёрных вдов [49, 50], нагреваемых пульсарным ветром, что также подтверждает связь этих объектов с рассматриваемыми миллисекундными пульсарами.

Кривые блеска J2017 симметричны относительно максимума яркости, где цветовые индексы равны  $g_s - r_s = 0,7$ ,  $r_s - i_s = 0,4$  и  $i_s - z_s = 0,2$ . Цвета смещаются в красную сторону по мере движения системы к минимуму блеска, что показывает разницу между “дневной” и “ночной” температурами компаньона пульсара. В минимуме кривой блеска яркость компаньона падает ниже определенного нами предела чувствительности, что не позволяет проводить фотометрические измерения.

Кривые блеска J1513 более сложные. Они демонстрируют значительную асимметрию с быстрым ростом яркости и последующим более плавным спадом. Мы также отмечаем наличие слабых колебаний яркости на коротком

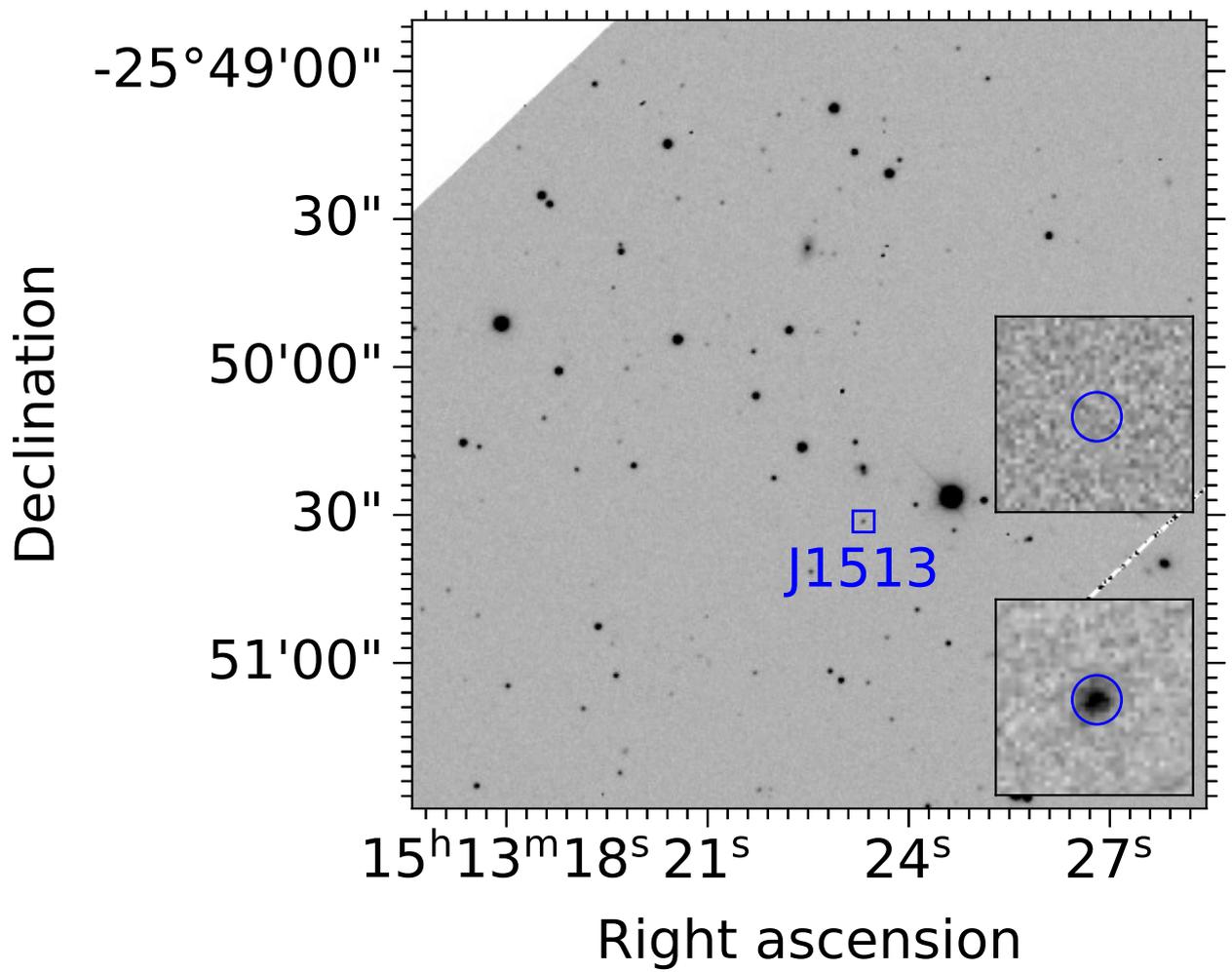


Рисунок 12: Поле пульсара J2017 размера  $2,7 \times 2,7$  секунд дуги<sup>2</sup> полученное с помощью Magellan-1 в фильтре  $r'$ , Во врезках приведены окрестности пульсара в минимуме и максимуме яркости компаньона

временном интервале с амплитудой  $\sim 0,1$  з.в., которые наблюдаются в фильтре  $r'$  на восходящей части кривой блеска в диапазоне  $0,1-0,6$  орбитальных фаз. Они также присутствуют в кривой блеска в фильтре  $R$  фильтре, хотя и с меньшей значимостью из-за худшего временного разрешения и чувствительности. Этот эффект не наблюдается в оставшемся диапазоне  $0,6-1,0$  фаз для обоих фильтров. Чтобы проверить, не вызваны ли они атмосферными эффектами, мы построили кривые блеска нескольких изолированных звезд с величинами в пределах  $r = 17,8-20,0$  з.в. в поле J1513. В них подобное изменение яркости отсутствует. По этой причине мы пришли к выводу, что рассматриваемые колебания вызваны физико-химическими процессами, протекающими в двойной системе.

Для получения параметров системы мы произвели аппроксимацию кривых блеска моделью прямого нагрева, состоящей из пульсара и нагретого пульсарным ветром компаньона. Подробно модель и метод аппроксимации описаны в работах [51, 52]. В этой модели предполагается, что каждый элемент поверхности излучает планковский спектр с температурой, меняющейся от элемента к элементу. Такая модель позволяет воспроизводить симметричные кривые блеска, однако не позволяет описывать отклонения от симметрии.

В случае J2017 мы использовали только кривые блеска в фильтрах  $g_s$ ,  $r_s$  и  $i_s$ , поскольку приближение чёрного тела плохо описывает наблюдаемое распределение спектральной энергии в широком спектральном диапазоне от фильтра  $g_s$  до  $z_s$ . Используемая модель не включает компоненты, которые могли бы описать асимметрию и мелкомасштабные вариации кривой блеска, поэтому для предварительного ограничения параметров системы J1513 мы проводили аппроксимацию только гладкой части кривой блеска в  $r'$  фильтре и диапазоне орбитальных фаз  $\phi [0,6, 1,0]$ . В процессе мы не учитывали другие диапазоны, так как их соответствующие кривые блеска содержат слишком мало фотометрических точек, а некоторые из них лежат в диапазоне фаз с вариациями. Для обоих объектов мы исключили из моделирования точки, лежащие ниже  $3\sigma$  предела чувствительности прибора.

Параметрами аппроксимации были избыток цвета  $E(B - V)$ , расстояние  $D$ , масса пульсара  $M_p$ , угол наклона орбиты  $i$ , коэффициент поглощения  $K_{\text{irr}}$ , определяющий нагрев компаньона, степень заполнения полости Роша

компаньона  $f$ , и температура “ночной” стороны компаньона  $T_n$ . Масса компаньона  $M_c$ , или отношение масс  $q = M_c/M_p$ , определялась функцией масс (табл. ??), которая связывает  $M_p$ ,  $M_c$  и  $i$ . Допустимый диапазон  $E(B-V)$  был ограничен полным межзвездным поглощением в Галактике в направлениях пульсаров ( $\approx 0,12$  з.в., [53]). Мы также предполагали, что массы пульсаров лежат в диапазоне от  $1,4 M_\odot$  до  $3,0 M_\odot$ . В качестве нулевой гипотезы для параметров бралось случайное значение в пределах естественных физических ограничений. Для поиска минимума функции  $\chi^2$  использовался метод градиентного спуска. Полученные параметры для обоих пульсаров представлены в табл. 6, а наилучшие модели показаны сплошными линиями на рис. 13.

Кривые блеска J2017 прекрасно описываются моделью с  $\chi^2 = 59,6$  для 99 (*dof*). Отклонения данных от модели находятся в пределах  $2\sigma$  (рис. 13, сверху), а параметры подгонки согласуются с ожидаемыми для чёрных вдов.

Напротив, J1513 демонстрирует кривые блеска, не характерные для большинства компаньонов “пауков” (см. обсуждение ниже). Формально подгонка части кривой блеска приемлема, с  $\chi^2 = 69,4$  для 44 *dof*. Однако, как видно из нижней панели рис. 14, наблюдаемая кривая блеска находится сильно выше относительно симметричной модели в диапазоне  $\phi \sim 0,1-0,35$ , что указывает на наличие какого-то дополнительного источника излучения в этом диапазоне. Кроме того, существуют упомянутые выше мелкомасштабные вариации яркости, которые заслуживают отдельного анализа.

Для изучения вариаций мы нормировали кривую блеска на крупномасштабные колебания, связанные с орбитальным движением. Для этого мы описали кривую блеска в диапазоне фаз  $\phi [0, 1, 0, 6]$  для фильтра  $r'$  полиномом Чебышева низкого порядка [54] и вычли эту аппроксимацию из кривой блеска. Результат представлен на верхней панели рис. 15. Нормированная кривая блеска показывает периодическое изменение яркости в течение примерно 75 минут между орбитальными фазами  $\sim 0,15$  и  $0,45$ . Для поиска этой периодичности мы провели анализ методом Ломба-Скаргла [55, 56], предоставляемый пакетом `astropy`. Самый большой пик в спектре мощности соответствует периоду  $P_V \approx 15,3$  мин (рис. 15, средняя панель). Для оценки погрешности спектра мощности мы использовали эквивалент метода бутстреп. Мы смоделировали 10000 кривых блеска, случайным образом разбросанных в пределах

$\pm 1\sigma$  погрешности, предполагая нормальное распределение вероятности. В результате мы получили периодограммы для каждой из симулированных кривых. Затем распределение периодограммы для каждого частотного бина было аппроксимировано функцией Гаусса, максимальное положение и ширина которой были отнесены к наиболее вероятному значению спектра мощности и его ошибке в бине, соответственно.

Рассчитанная вероятность ложного определения пика 15,3 мин составляет  $\approx 0,46$ , что делает его сомнительным. Однако мы построили спектры мощности не постоянной опорной звезды и постоянную функцию для того же временного диапазона, что и для J1513. При этом мы не обнаружили там никаких признаков 15,3-минутного периода. Это указывает на то, что 15,3-минутный пик в кривой блеска не возникает из-за систематической ошибки метода.

Кроме того, мы аппроксимировали данные константой, а затем синусоидальной функцией с 15,3-минутным периодом и сдвинутой на постоянную величину. В результате последней мы получили  $\chi^2 = 24,1$  для 30 *dof* и среднюю амплитуду  $\approx 0,08$  з.в. (см. рис. 15, верхняя панель). С постоянной моделью мы получили немного худшее, но тоже приемлемое соответствие с  $\chi^2 = 33,3$  для 32 *dof*.

*F*-тест, примененный для сравнения двух моделей, дал вероятность  $\approx 8 \times 10^{-3}$  случайного улучшения синусоидальной модели по сравнению с прямой, что указывает на недостаточность описания данных с помощью константы. Кривая блеска, свёрнутая с полученным периодом, показана на нижней панели рис. 15, вместе с синусоидальной моделью с наилучшими параметрами. Оставшаяся часть нормированной кривой блеска показывает только стохастические колебания той же амплитуды и никаких признаков периодичности. Тем не менее, можно сделать вывод, что хотя мелкомасштабная переменность выделяется в рассматриваемом фазовом интервале, её кажущаяся периодичность имеет низкую статистическую значимость  $\approx 2,5\sigma$  и для её подтверждения необходимы новые наблюдения.

Таблица 6: Результаты аппроксимации кривых блеска J2017 and J1513.

	J2017	J1513
$E(B - V)$ , з.в.	$0,09^{+0,03}_{-0,01}$	$0,07^{+0,03}_{-0,04}$
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 $T_n$ , $10^3$ К	$3,0^{+0,2}_{-0,1}$	3,2(1)
Наклонение $i$ , град.	$67^{+10}_{-7}$	$70^{+20}_{-15}$
Степень заполнения полости Роша $f$	0,84(6)	$1,0^{+0,0}_{-0,1}$
Коэффициент облучения $K_{\text{irr}}$ , $10^{20}$ эрг $\text{см}^{-2}$ $\text{с}^{-1}$ $\text{ср}^{-1}$	2*0,7(1)	2*0,6(1)
Вычисляемые параметры		
Масса компаньона $M_c$ , $M_\odot$	0,041	0,020
Радиус компаньона $R_c^x$ , $R_\odot$	0,122	0,114
Радиус компаньона $R_c^y$ , $R_\odot$	0,169	0,151
Минимальная ‘дневная’ температура $T_d^{\text{min}}$ , $10^3$ К	3,3	3,2
Максимальная ‘дневная’ температура $T_d^{\text{max}}$ , $10^3$ К	5,9	5,4
Эффективность облучения $\eta$	0,6	0,05

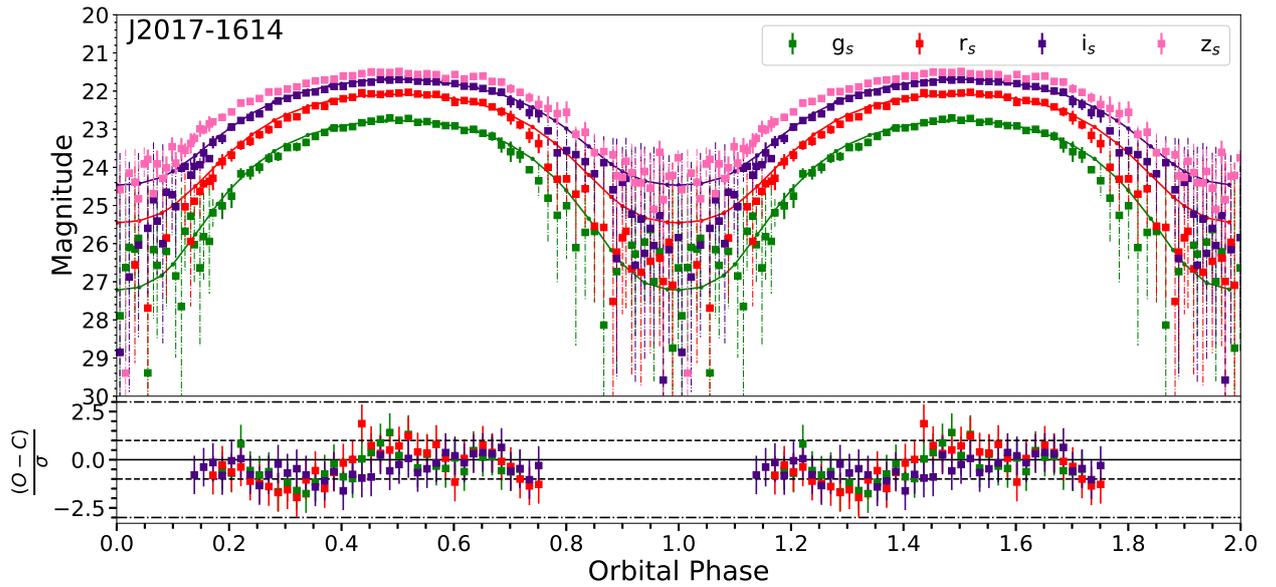


Рисунок 13: Модельные и наблюдаемые кривые блеска компаньона пульсара J2017, свёрнутые с орбитальным периодом. На нижней панели представлена невязка в единицах  $\sigma$ .

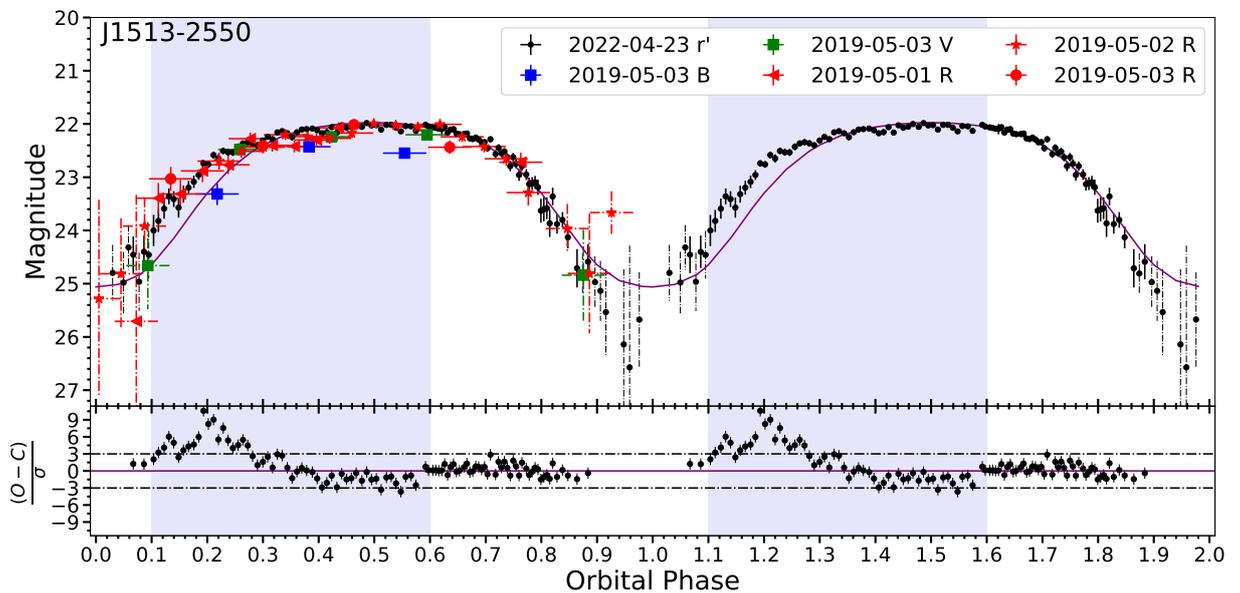


Рисунок 14: Кривые блеска J1513, свёрнутые с орбитальным периодом и приведенные к АВ фотометрической системе. Сиреновой сплошной линией показана модельная кривая блеска закрашенными полосами показаны области, где наблюдаются колебания яркости. На нижней панели представлена невязка в единицах  $\sigma$ .

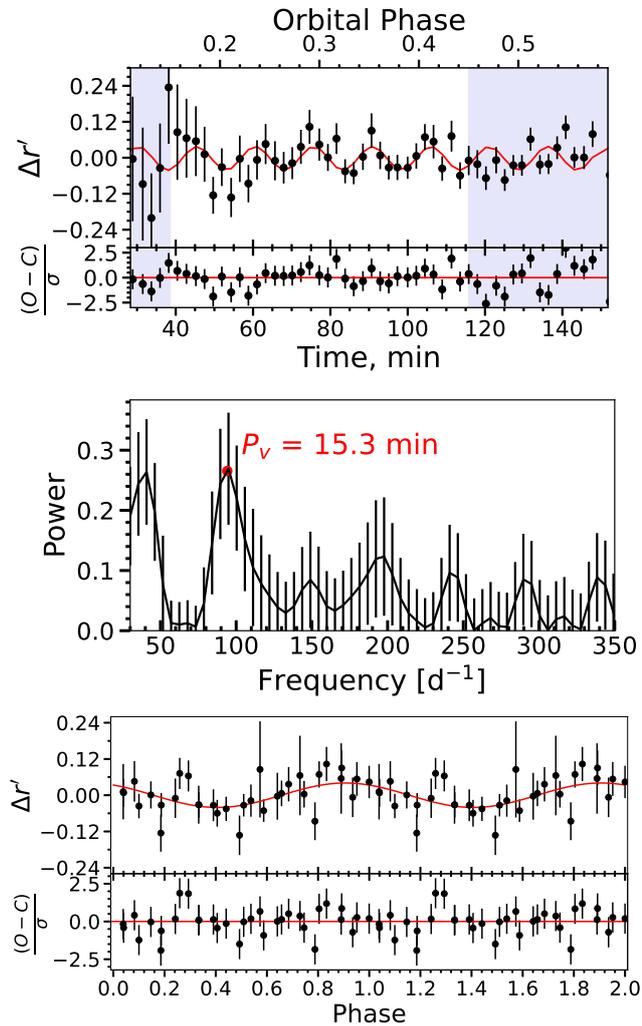


Рисунок 15: Результаты анализа мелкомасштабных колебаний кривой блеска J1513. *Верхняя панель:* Нормированная на колебания вызванные орбитальным движением кривая блеска J1513 показана черными точками с усами. Сплошная линия соответствует синусоидальной функции с периодом 15,3 мин. Синими полосами показаны области исключенные при поиске периодичности. *Средняя панель:* черными точками с вертикальными усами показан спектр мощности нормированной кривой блеска. Красной точкой отмечен наибольший пик соответствующий периоду 15,3 минут. *Нижняя панель:* Нормированная кривая блеска свернутая с периодом 15,3 минут.

## 0.2.4 Результаты

### J2017

J2017 принадлежит к классу короткопериодичных систем и демонстрирует оптические кривые блеска, типичные для “пульсаров-пауков”. Моделирование оптических данных показало, что масса компаньона мала ( $\approx 0.04 M_{\odot}$ ), что подтверждает природу J2017 как черной вдовы. Оценка массы нейтронной звезды в системе оказалась больше канонической массы  $1,4 M_{\odot}$ . Отношение температур “ночной” стороны и “дневной” стороны  $T_n/T_d \sim 2$ , что является типичным для “черных вдов” (например [50]). Расстояние,  $D = 2,40^{+0,10}_{-0,05}$  кпк, больше, чем оценки расстояния по мере дисперсии (Таблица 5). Это подтверждает, что расстояния по мере дисперсии до пульсаров-пауков систематически меньше, чем расстояния, полученные другими методами [57]. Значение  $E(B - V)$  согласуется с ожидаемым значением  $0,11^{+0,01}_{-0,02}$  з.в., полученным для пульсара и его расстояния с помощью 3D карты галактической пыли [53].

### J1513

J1513 также является паучьим пульсаром, но с асимметричной оптической кривой блеска. Эта особенность проявляется как в наблюдениях OAN-SPM, так и в данных Магеллана-1, проведённых с разницей примерно в три года, что указывает на то, что это свойство сохраняется. Простая модель прямого нагрева компаньона не может воспроизвести асимметрию. Существует ряд других паучьих систем, демонстрирующих подобное поведение, например, BW J1311–3430 [58], BW J1653–0158 [59], BW J1810+1744 [60], RB J2039–5617 [61], и RB J2339–0533 [62]. Для объяснения асимметрии были предложены различные модели: холодные пятна на поверхности звезды-компаньона, вызванные её магнитной активностью [61], асимметричный нагрев от ударной волны между компонентами системы (IBS; [63]), а также перераспределение тепла по поверхности компаньона за счёт конвекции и диффузии [64, 65]. Неясно, какая из этих идей действительно применима для описания J1513. Возможное присутствие загадочных периодических колеба-

ний яркости с амплитудой  $\sim 0,1$  з. в. и периодичностью  $\sim 15$  мин на кривой блеска в  $\sim 0,15-0,45$  орбитальных фаз (рис. 15), также усложняет теоретическое описание кривой блеска. Для других подобных систем таких вариаций пока не обнаружено.

Отмеченные ранее колебания могут быть объяснены вспышечной активностью J1513, которая наблюдается в некоторых других “паучьих” системах (например [58, 66, 67, 68]). Однако наблюдаемая периодичность ставит это предположение под сомнение, поскольку вспышечная активность является стохастическим процессом. В случае с нашими данными неясно, всегда ли эти вариации проявляются в одних и тех же орбитальных фазах.

С другой стороны, если эти вариации будут доказаны в будущем, то их можно будет объяснить колебаниями горячего пятна компаньона, подобными колебаниям, наблюдающимся в солнечных пятнах [69, 70]). Горячее пятно может также образовываться за счет частиц ударной волны, перенаправленных к полюсам компаньона его магнитным полем (см. рис. 3 в [71]).

Хотя используемая симметричная модель не описывает кривые блеска J1513 во всем диапазоне орбитальных фаз, она дает предварительные ограничения на параметры системы. Ночная и дневная температуры близки к полученным для J2017 (табл. 6). Оценка расстояния до J1513 составляет около 2 кпк, что близко к значению, полученному с помощью модели NE2001. С учетом собственного движения пульсара,  $\mu = 7,2(2)$  мсд в год, тангенциальная скорость составляет  $v_t = 68$  км с<sup>-1</sup>, что согласуется с распределением скоростей для МСП [72]. Оценка межзвездного поглощения для пульсара меньше максимального значения в этом направлении,  $0,12_{-0,01}^{+0,02}$  з.в., полученного из карты пыли [53].

## Выводы

В работе впервые были проведены оптические спектроскопические наблюдения компаньона пульсаров J0621, J2302 и J2317. Мы определили, что компаньоны J0621 и J2317, являются БК с водородной атмосферой. Используя модели излучения атмосфер БК, мы оценили их температуры, массы, возраста и расстояния до них.

Мы впервые провели многополосную оптическую фотометрию двух чёрных вдов, J2017 и J1513. Это позволило нам уверенно определить компаньона последней вдовы. Оба объекта демонстрируют схожие амплитуды орбитальной модуляции блеска,  $\gtrsim 2$  з.в. Однако если кривые блеска J2017 симметричны, то J1513 демонстрирует сильную асимметрию и периодические колебания неизвестного происхождения.

Моделирование кривой блеска позволяет получить параметры компаньонов J2017 и J1513 (массы, радиусы, температуры и степени заполнения полости Роша), сравнимые со значениями, полученными для других Чёрных вдов (например, [52, 67, 50]). Наклонения систем составляют около 70 град., что согласуется с наблюдаемыми нерегулярными затмениями радиоизлучения пульсаров.

# Литература

1. Srinivasan G., Bhattacharya D., Muslimov A. G., Tsygan A. J. A novel mechanism for the decay of neutron star magnetic fields. — Vol. 59. — P. 31–38.
2. Landau L., Peierls R. [Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie](#). — Vol. 69, no. 1. — P. 56–69.
3. Baade W., Zwicky F. [Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays](#). — Vol. 46, no. 1. — P. 76–77. — Publisher: American Physical Society.
4. Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H. et al. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source (Reprinted from Nature, February 24, 1968) // . — 1969. — Vol. 224, no. 5218. — P. 472.
5. Backer D. C., Kulkarni Shrinivas R., Heiles Carl et al. [A millisecond pulsar](#). — Vol. 300, no. 5893. — P. 615–618.
6. Bisnovatyi-Kogan G. S., Komberg B. V. Pulsars and close binary systems. — Vol. 18. — P. 217.
7. Smarr L. L., Blandford R. [The binary pulsar - Physical processes, possible companions, and evolutionary histories](#). — Vol. 207. — P. 574.
8. Boriakoff V., Buccheri R., Fauci F. Discovery of a 6.1-ms binary pulsar PSR1953 + 29. — Vol. 304, no. 5925. — P. 417–419.
9. Segelstein D. J., Rawley L. A., Stinebring D. R. et al. [New millisecond pulsar in a binary system](#). — Vol. 322, no. 6081. — P. 714–717.
10. Manchester R. N. [Pulsar timing and its applications](#). — Vol. 932. — P. 012002.
11. Shapiro Irwin I. [Fourth Test of General Relativity](#). — Vol. 13, no. 26. — P. 789–791.
12. Dai S., Smith M. C., Wang S. et al. The Identification of the White Dwarf Companion to the Millisecond Pulsar J2317+1439 // . — 2017. — Vol. 842, no. 2. — P. 105.
13. Karpova A. V., Zyuzin D. A., Shibanov Yu. A. et al. Optical Identification of the Millisecond Pulsar J0621+2514 // . — 2018. — Vol. 35. — P. e028.

14. Kirichenko A. Yu, Zharikov S. V., Zyuzin D. A. et al. Optical identification of the binary companion to the millisecond PSR J2302+4442 with the Gran Telescopio Canarias // . — 2018. — Vol. 480, no. 2. — P. 1950–1955.
15. Ray P. S., Abdo A. A., Parent D. et al. Radio Searches of Fermi LAT Sources and Blind Search Pulsars: The Fermi Pulsar Search Consortium // arXiv e-prints. — 2012. — P. arXiv:1205.3089.
16. Sanpa-arsa S. Searching for New Millisecond Pulsars with the GBT in Fermi Unassociated Sources // Ph.D. thesis / University of Virginia. — 2016. — URL: [https://libraetd.lib.virginia.edu/public\\_view/0k225b07h](https://libraetd.lib.virginia.edu/public_view/0k225b07h).
17. Cognard I., Guillemot L., Johnson T. J. et al. Discovery of Two Millisecond Pulsars in Fermi Sources with the Nançay Radio Telescope // . — 2011. — Vol. 732, no. 1. — P. 47.
18. Camilo F., Nice D. J., Taylor J. H. Discovery of Two Fast-rotating Pulsars // . — 1993. — Vol. 412. — P. L37.
19. Smith David A., Guillemot Lucas, Kerr Matthew et al. Gamma-ray pulsars with Fermi // arXiv e-prints. — 2017. — P. arXiv:1706.03592.
20. Abdollahi S., Acero F., Baldini L. et al. Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog // . — 2022. — Vol. 260, no. 2. — P. 53.
21. Gómez-González V. M. A., Mayya Y. D., Rosa-González D. Wolf-Rayet stars in M81: detection and characterization using GTC/OSIRIS spectra and HST/ACS images // . — 2016. — Vol. 460, no. 2. — P. 1555–1566.
22. Oke J. B. Absolute Spectral Energy Distributions for White Dwarfs // . — 1974. — Vol. 27. — P. 21.
23. Oke J. B. Faint Spectrophotometric Standard Stars // . — 1990. — Vol. 99. — P. 1621.
24. Abdurro'uf, Accetta Katherine, Aerts Conny et al. The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data // . — 2022. — Vol. 259, no. 2. — P. 35.
25. Flewelling H. A., Magnier E. A., Chambers K. C. et al. The Pan-STARRS1 Database and Data Products // . — 2020. — Vol. 251, no. 1. — P. 7.
26. Koester D. White dwarf spectra and atmosphere models // . — 2010. — Vol. 81. — P. 921–931.
27. Koester D. White dwarf spectra and atmosphere models. — Vol. 81. — P. 921–931.

28. Green Gregory M., Schlafly Edward, Zucker Catherine et al. [A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS](#). — Vol. 887, no. 1. — P. 93. — Publisher: American Astronomical Society.
29. Fitzpatrick E. L., Massa Derck, Gordon Karl D. et al. An Analysis of the Shapes of Interstellar Extinction Curves. VII. Milky Way Spectrophotometric Optical-through-ultraviolet Extinction and Its R-dependence // . — 2019. — Vol. 886, no. 2. — P. 108.
30. Carvalho G. A., Marinho R. M., Malheiro M. General relativistic effects in the structure of massive white dwarfs // *General Relativity and Gravitation*. — 2018. — Vol. 50, no. 4. — P. 38.
31. Cordes J. M., Lazio T. J. W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations. — Published: `\textit{ArXiv e-prints astro-ph/0207156}`.
32. Yao J. M., Manchester R. N., Wang N. A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances. — Vol. 835. — P. 29.
33. Althaus Leandro G., Miller Bertolami Marcelo M., Córscico Alejandro H. New evolutionary sequences for extremely low-mass white dwarfs. Homogeneous mass and age determinations and asteroseismic prospects // . — 2013. — Vol. 557. — P. A19.
34. Holberg J. B., Bergeron P. Calibration of Synthetic Photometry Using DA White Dwarfs // . — 2006. — Vol. 132. — P. 1221–1233.
35. Kowalski P. M., Saumon D. Found: The Missing Blue Opacity in Atmosphere Models of Cool Hydrogen White Dwarfs // . — 2006. — Vol. 651. — P. L137–L140.
36. Tremblay P.-E., Bergeron P., Gianninas A. An Improved Spectroscopic Analysis of DA White Dwarfs from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 4 // . — 2011. — Vol. 730. — P. 128.
37. Althaus L. G., Miller Bertolami M. M., Córscico A. H. New evolutionary sequences for extremely low-mass white dwarfs. Homogeneous mass and age determinations and asteroseismic prospects. — Vol. 557. — P. A19.
38. Hobbs G., Lorimer D. R., Lyne A. G., Kramer M. A statistical study of 233 pulsar proper motions // . — 2005. — Vol. 360, no. 3. — P. 974–992.
39. Sanpa-arsa S. Searching for New Millisecond Pulsars with the GBT in Fermi Unassociated Sources.

40. Smith D. A., Abdollahi S., Ajello M. et al. The Third Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars // . — 2023. — Vol. 958, no. 2. — P. 191.
41. Dhillon Vikram S., Marsh Thomas R., Bezawada Naidu et al. HiPERCAM: a high-speed quintuple-beam CCD camera for the study of rapid variability in the universe // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI / Ed. by Christopher J. Evans, Luc Simard, Hideki Takami. — Vol. 9908 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2016. — P. 99080Y.
42. Dhillon Vik, Dixon Simon, Gamble Trevor et al. First light with HiPERCAM on the GTC // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII / Ed. by Christopher J. Evans, Luc Simard, Hideki Takami. — Vol. 10702 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2018. — P. 107020L.
43. Dhillon V. S., Bezawada N., Black M. et al. HiPERCAM: a quintuple-beam, high-speed optical imager on the 10.4-m Gran Telescopio Canarias // . — 2021. — Vol. 507, no. 1. — P. 350–366.
44. Naylor Tim. An optimal extraction algorithm for imaging photometry // . — 1998. — Vol. 296, no. 2. — P. 339–346.
45. Honeycutt R. K. CCD Ensemble Photometry on an Inhomogeneous Set of Exposures // . — 1992. — Vol. 104. — P. 435.
46. Tonry J. L., Stubbs C. W., Lykke K. R. et al. [THE Pan-STARRS1 PHOTOMETRIC SYSTEM](#) // The Astrophysical Journal. — 2012. — apr. — Vol. 750, no. 2. — P. 99.
47. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // . — 2018. — Vol. 616. — P. A1.
48. Landolt Arlo U. UBVRI Photometric Standard Stars in the Magnitude Range 11.5  $\leq$  V  $\leq$  16.0 Around the Celestial Equator // . — 1992. — Vol. 104. — P. 340.
49. Draghis Paul, Romani Roger W., Filippenko Alexei V. et al. Multiband Optical Light Curves of Black-widow Pulsars // . — 2019. — Vol. 883, no. 1. — P. 108.
50. Mata Sánchez D., Kennedy M. R., Clark C. J. et al. A black widow population dissection through HiPERCAM multi-band light curve modelling // . — 2023. — Vol. 520, no. 2. — P. 2217–2244.

51. Zharikov S., Tovmassian G., Aviles A. et al. The accretion disk in the post period-minimum cataclysmic variable SDSS J080434.20 + 510349.2 // . — 2013. — Vol. 549. — P. A77.
52. Zharikov S., Kirichenko A., Zyuzin D. et al. Optical detection of the black widow binary PSR J2052+1219 // . — 2019. — Vol. 489, no. 4. — P. 5547–5555.
53. Green Gregory M., Schlafly Edward, Zucker Catherine et al. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS // . — 2019. — Vol. 887, no. 1. — P. 93.
54. Chebyshev P. L. Théorie des mécanismes connus sous le nom de parallélogrammes. — St.-Pétersbourg : Imprimerie de l'Académie impériale des sciences, 1853.
55. Lomb N. R. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data // . — 1976. — Feb. — Vol. 39, no. 2. — P. 447–462.
56. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. // . — 1982. — Dec. — Vol. 263. — P. 835–853.
57. Koljonen Karri I. I., Linares Manuel. A Gaia view of the optical and X-ray luminosities of compact binary millisecond pulsars // . — 2023. — Vol. 525, no. 3. — P. 3963–3985.
58. Romani Roger W., Filippenko Alexei V., Silverman Jeffrey M. et al. PSR J1311-3430: A Heavyweight Neutron Star with a Flyweight Helium Companion // . — 2012. — Vol. 760, no. 2. — P. L36.
59. Nieder L., Clark C. J., Kandel D. et al. Discovery of a Gamma-Ray Black Widow Pulsar by GPU-accelerated Einstein@Home // . — 2020. — Vol. 902, no. 2. — P. L46.
60. Romani Roger W., Kandel D., Filippenko Alexei V. et al. PSR J1810+1744: Companion Darkening and a Precise High Neutron Star Mass // . — 2021. — Vol. 908, no. 2. — P. L46.
61. Clark C. J., Nieder L., Voisin G. et al. Einstein@Home discovery of the gamma-ray millisecond pulsar PSR J2039-5617 confirms its predicted redback nature // . — 2021. — Vol. 502, no. 1. — P. 915–934.
62. Kandel D., Romani Roger W., Filippenko Alexei V. et al. Heated Poles on the Companion of Redback PSR J2339-0533 // . — 2020. — Vol. 903, no. 1. — P. 39.

63. Romani Roger W., Sanchez Nicolas. Intra-binary Shock Heating of Black Widow Companions // . — 2016. — Vol. 828, no. 1. — P. 7.
64. Kandel D., Romani Roger W. Atmospheric Circulation on Black Widow Companions // . — 2020. — Vol. 892, no. 2. — P. 101.
65. Voisin Guillaume, Kennedy M. R., Breton R. P. et al. A model for redistributing heat over the surface of irradiated spider companions // . — 2020. — Vol. 499, no. 2. — P. 1758–1768.
66. Halpern Jules P. Optical Light Curve of 4FGL J0935.3+0901: A Flaring Black Widow Candidate // . — 2022. — Vol. 932, no. 1. — P. L8.
67. Swihart Samuel J., Strader Jay, Chomiuk Laura et al. A New Flaring Black Widow Candidate and Demographics of Black Widow Millisecond Pulsars in the Galactic Field // . — 2022. — Vol. 941, no. 2. — P. 199.
68. Zyuzin D. A., Kirichenko A. Yu, Karpova A. V. et al. Nature of 4FGL J1838.2+3223: A flaring 'spider' pulsar candidate // . — 2024. — Vol. 527, no. 3. — P. 6712–6721.
69. Kolobov D. Y., Chelpanov A. A., Kobanov N. I. Peculiarity of the Oscillation Stratification in Sunspot Penumbrae // . — 2016. — Vol. 291, no. 11. — P. 3339–3347.
70. Sych Robert. MHD Wave in Sunspots // Geophysical Monograph Series. — 2016. — Vol. 216. — P. 467–487.
71. Sanchez Nicolas, Romani Roger W. B-ducted Heating of Black Widow Companions // . — 2017. — Vol. 845, no. 1. — P. 42.
72. Hobbs G., Lorimer D. R., Lyne A. G., Kramer M. A statistical study of 233 pulsar proper motions // . — 2005. — Vol. 360, no. 3. — P. 974–992.