

На правах рукописи

Бобаков Александр Васильевич

Оптические исследования двойных звёздных
систем с миллисекундным пульсаром

Специальность 1.3.1 — физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2025

Работа выполнена в лаборатории прикладной математики и математической физики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

- Научный руководитель: Шибанов Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
- Научный консультант: Карпова Анна Викторовна,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
ФТИ им. А. Ф. Иоффе
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник НИЛ
астрофотометрии и звездных атмосфер КФУ,
профессор КФУ
Бикмаев Ильфан Фяритович,
кандидат физико-математических наук,
заместитель директора по
научной работе САО РАН
Колбин Александр Иванович
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Главная (Пулковская)
астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится на заседании диссертационного совета 34.01.04.25
при ФТИ им. А. Ф. Иоффе, по адресу:
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и
на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

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]. Первая НЗ была открыта как радиопульсар в 1967 году в Маллардской обсерватории [2]. Пульсары – это источники периодического излучения, которое наблюдается в основном в радио-, рентгеновском и гамма-диапазонах. Они формируются в результате сжатия массивных звезд ($8 - 25 M_{\odot}$) при взрывах сверхновых. Образующиеся в результате объекты обладают высокой скоростью вращения и мощным магнитным полем $10^8 - 10^{15}$ Гс. Такое поле приводит к формированию потоков высокоэнергетических заряженных частиц вблизи магнитных полюсов НЗ. Излучение от этих частиц является нетепловым и наблюдается на различных длинах волн от радио- до гамма-диапазона. При этом магнитная ось пульсара, как правило, не совпадает с его осью вращения, чем и объясняются наблюдаемые пульсации излучения.

В настоящее время известно около 4000 НЗ¹. Большинство из них были открыты как радиопульсары. Анализ пульсаций НЗ, или хронометрирование, 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 и позволяет с помощью различных моделей распределения электронов в Галактике оценить расстояние до пульсаров. 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 скорости изменения периода вращения пульсара можно оценить возраст пульсара и величину дипольной компоненты магнитного поля НЗ.

Помимо нетепловой компоненты излучения также существует и тепловая, излучаемая с поверхности НЗ, которая наблюдается чаще всего в рентгеновском, а также может проявляться в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [3]. Из анализа спектров этого излучения можно оценить температуру поверхности НЗ и горячих полярных шапок, подогреваемых обратным током релятивистских частиц из магнитосферы пульсара.

Среди пульсаров выделяют большую группу, порядка 13%, миллисекундных пульсаров (МСП). Эти объекты обладают периодами вращения меньше 30 мс и магнитными полями около $10^8 - 10^{10}$ Гс. Первый МСП, PSR 1937+21, был открыт с помощью обсерватории Аресибо в 1982 году [4]. 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. Для объяснения этого было выдвинуто предположение о том, что данный пульсар входит в двойную систему, прошедшую стадию аккреции вещества с нормальной звезды на нейтронную [5]. При аккреции вещества со звезды-компаньона период обращения пульсара уменьшается до миллисекундных значений, а звезда-донор эволюционирует в белый карлик (БК). На

¹<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

данный момент обнаружено около 770 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 [6]. 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 плотности $2,8 \times 10^{-14} \text{ г см}^{-3}$. Для наиболее точного определения массы пульсара в радиодиапазоне применяется эффект Шапиро [7], заключающийся в замедлении распространения электромагнитного сигнала от пульсара в гравитационном поле звезды-компаньона. Однако для таких измерений необходимы определённые условия, например, малое наклонение плоскости орбиты к лучу зрения наблюдателя и большие экспозиции. Также стоит отметить, что этот эффект зависит от массы компаньона: чем меньше масса компаньона, тем сложнее измерение этого эффекта. 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 исследования компаньонов МСП в оптическом диапазоне. Однако на данный момент это сделано лишь для небольшой части МСП.

Среди МСП выделяется особая группа из ~ 130 объектов, так называемые “паучьи” пульсары. Они представляют из себя тесные двойные системы, в которых компаньон нагревается пульсарным ветром и излучением. В результате звезда-компаньон постепенно испаряется. Эти системы в свою очередь подразделяются на “чёрные вдовы” (black widow, BW) и “австралийские вдовы” (redback, RB) [8]. Системы типа RB определяются массами компаньонов $0,1 - 1 M_{\odot}$ и орбитальными периодами менее 1 дня. Системы BW характеризуются схожими с RB орбитальными периодами, но значительно меньшими массами компаньонов $< 0,05 M_{\odot}$. Собственное вращение компаньона в таких системах синхронизировано с его орбитальным вращением, в результате чего нагрев 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 независимо оценивать массы НЗ. Нужно подчеркнуть, что теоретические модели предсказывают наличие наиболее тяжёлых НЗ (с массами $> 2M_{\odot}$) в таких системах [9], что подтверждается наблюдениями [10]. Поэтому поиск и исследование МСП в двойных системах критически важен для установления наиболее жёстких ограничений на максимальную массу НЗ в моделях сверхплотного вещества в их недрах.

Также стоит отметить, что эволюционные процессы для тесных двойных систем до сих пор изучены неполно. Существуют предположения, что одиночные МСП формируются в результате полного испарения компаньона в системах типа BW, в то время как другие модели предсказывают, что

продолжительность этого процесса может превысить Хаббловское время [11]. Кроме того, не ясна связь между BW и RB: могут ли RB переходить в BW или они являются отдельными направлениями эволюции тесных двойных систем с МСП [12]. Для подтверждения этих гипотез необходимы оптические наблюдения звёзд-компаньонов. Этим определяется актуальность данной работы.

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

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Подготовка заявок на проведение оптических фотометрических и спектроскопических наблюдений перспективных МСП на различных телескопах.
2. Обработка и анализ 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 параметров систем.
5. Анализ оптических кривых блеска систем для оценок масс компонентов системы.

Научная новизна. Работа основана на оригинальных оптических наблюдениях компаньонов МСП, в том числе на крупнейших телескопах с использованием новейших инструментов. Также использовались данные обзоров неба.

Для компаньонов МСП PSR J2317+1439, PSR J0621+2514 и PSR J2302+4442 впервые проведена оптическая спектроскопия, по результатам которой подтверждена их принадлежность к классу БК, а также получены независимые оценки их эффективных температур. Для PSR J0621+2514 получены независимые оценки массы компаньона и расстояния до этой двойной системы. Также впервые была проведена многополосная фотометрия трёх оптических источников, находящихся в двойных системах с МСП PSR J1513–2550, PSR J2017–1614 и PSR J1627+3218. На основе фотометрии выполнена оценка масс компонент этих систем, а также ряда других параметров. Эти объекты были надёжно ассоциированы с пульсарами класса “чёрная вдова”. Кроме того, найдены необычные колебания яркости в кривой блеска для пульсара J1513–2550, что делает его уникальным объектом для дальнейшего изучения. Впервые проведены фазово-разрешенные спектроскопические и многополосные фотометрические исследования оптического транзиента MASTER OT J072007.30+451611.6. Анализ полученных данных позволил подтвердить что этот объект является полярком с необычно большой орбитальной переменностью блеска. Также измерено отношение эквивалентных ширин эмиссионных линий.

Достоверность полученных результатов. Спектроскопические и фотометрические данные, использованные в работе, получены с помощью крупнейших телескопов и современных инструментов, установленных на них. Обработка и анализ наблюдательных данных проведены с использованием современных программных пакетов. Оценки параметров объектов получены на основе апробированных численных моделей. По возможности выполнено сравнение результатов 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, включающих НЗ.
3. Результаты исследований тесных двойных систем с компактными объектами могут помочь при разработке новых моделей их эволюции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компаньоны МСП PSR J2317+1439, PSR J0621+2514 и PSR J2302+4442 являются белыми карликами с водородными атмосферами. При этом компаньоны пульсаров J2317+1439 и J0621+2514 имеют гелиевые ядра, а время их остывания $\lesssim 2$ млрд лет. Оценка температуры для компаньона J0621+2514 составила 8600 ± 200 К, для компаньона J2317+1439 она лежит в диапазоне 7400–12500 К, а для компаньона J2302+4442 получен верхний предел $T_{eff} < 6000$ К. Независимая оценка расстояния до J0621+2514 составила $1,1 \pm 0,3$ кпк.
2. Три МСП пульсара PSR J1513–2550, PSR J2017–1614 и PSR J1627+3219 надежно идентифицированы в оптическом диапазоне и классифицированы как “черные вдовы”. Отношения масс компонент этих двойных систем составили 0.017(2), 0.012(1) и 0.017(2), соответственно. Выполнены оценки расстояний, наклонов орбит, степеней заполнения полостей Роша и эффективных температур поверхности компаньонов.
3. Оптическая кривая блеска компаньона пульсара J1513–2550 демонстрирует устойчивую асимметрию на масштабе трех лет и возможно показывает колебания малой амплитуды.
4. Установление принадлежности оптического источника MASTER OT J072007.30+451611.6 к классу полярных и верхнее ограничение эквивалентных ширин эмиссионных линий $H\beta$ и $HeII$ 4686 Å величиной $< 0,4$.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2021 по 2025 годы и опубликованы в 4 статьях в реферируемых журналах и в тезисах 5 конференций.

Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях:

1. «Астрофизика высоких энергий» HEA2022, Москва, ИКИ РАН, 19–22.12.2022 (стендовый доклад);

2. «Физика нейтронных звёзд» PNS2023, Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе, 10–14.07.2023 (стендовый доклад);
3. «Астрофизика высоких энергий» HEA2023, Москва, ИКИ РАН, 18–21.12.2023 (стендовый доклад);
4. «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр» VAK2024, Нижний Архыз, САО РАН, 25–31.08.2024 (стендовый доклад);
5. «Астрофизика высоких энергий» HEA2024, Москва, ИКИ РАН, 23–26.12.2024 (стендовый доклад);

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

Личный вклад. Соискатель выполнил обработку оптических фотометрических и спектроскопических данных, полученных для каждого объекта. Кроме того, совместно с соавторами, он произвел анализ и моделирование полученных кривых блеска и спектров исследованных объектов. В положениях, выносимых на защиту, вклад автора является определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации – 102 страницы текста с 30 изображениями и 11 таблицами. Список литературы содержит 134 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, показаны достоверность, научная значимость и новизна выполненной работы и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору использованных в работе телескопов и инструментов, а также методов обработки и анализа данных. Наблюдения проводились на 10-метровом телескопе GTC (Большой Канарский телескоп), 6,5-метровом телескопе Magellan-1, 2,1- и 1,5-метровых телескопах Мексиканской национальной астрономической обсерватории (OAN-SPM), и на 1,5-метровых телескопах Майданакской высокогорной обсерватории (MAO) и обсерватории Ассы-Тургень (АТО). Использованы также архивные данные обзоров неба Pan-STARRS, SDSS, CSS и ZTF.

Во второй главе приведены результаты спектроскопических исследований трех компаньонов МСП пульсаров J0621+2514 (J0621), PSR J2302+4442 (J2302) и PSR J2317+1439 (J2317) в оптическом диапазоне.

В разделе 2.1 описаны предшествовавшие исследования пульсаров. Все три МСП были обнаружены в рамках поиска радиопульсаций неассоциированных гамма-источников обсерватории Fermi. Возможный оптический компаньон пульсара J0621 ($g' = 22^m$) наблюдался в рамках обзоров Pan-STARRS и SDSS, а сравнение его фотометрических данных с кривыми остывания БК позволило оценить его температуру $T_{eff} = 10000 \pm 2000$ К и массу $M \lesssim 0,5 M_{\odot}$ [13]. Оптический компаньон пульсара J2302 с $r \approx 23,3^m$ был обнаружен на GTC [14]. Оценки его параметров составили $T_{eff} = 6300^{+1000}_{-800}$ К и $M \approx 0,5 M_{\odot}$. Оптический источник ($g \approx 22^m$) на положении пульсара J2317 найден телескопом CFHT [15]. Для него было получено $T_{eff} = 8100 \pm 500$ К и $M \approx 0,4 M_{\odot}$.

В разделах 2.2 и 2.3 представлены обработка и анализ оптических спектров компаньонов пульсаров, полученных на телескопе GTC (рис.1). В спек-

трах компаньонов J0621 и J2317 обнаружены абсорбционные линии бальмеровской серии, что говорит о наличии у них водородной атмосферы. В спектре J2302 спектральные линии не наблюдались, однако форма континуума также соответствует БК с водородной атмосферой. Аппроксимация полученных спектров моделью излучения БК с водородной атмосферой позволила провести независимую оценку температур этих объектов. Для J0621 она оказалась равна $T_{eff}^{J0621} = 8600 \pm 200$ К. Температура компаньона J2317 лежит в диапазоне 7400 – 12500 К. Для компаньона J2302 получен верхний предел $T_{eff}^{J2302} < 6000$ К. Помимо этого для компаньона пульсара J0621 получена независимая оценка расстояния $D_{J0621} = 1,1 \pm 0,3$ кпк.

В разделе 2.4 представлены основные результаты проведенной работы. Выполнено сравнение фотометрических данных с кривыми остывания БК для различных расстояний (рис. 2). При этом для источников J2317 и J2302 оценки расстояния получены из хронометрирования. Положение J0621 на диаграмме соответствует БК с гелиевым ядром. Для компаньона J2317 теоретическое соотношение массы и орбитального периода [16] указывает на массу БК $M_{J2317} \approx 0,2 M_{\odot}$. Это значение также согласуется с положением на диаграмме цвет–звёздная величина для расстояния 2 кпк в случае БК с гелиевым ядром. Для БК J0621 и J2317 получено ограничение возраста остывания $\lesssim 2,0$ млрд лет.

В третьей главе представлен анализ кривых блеска трех МСП пульсаров J2017–1614 (J2017), J1513–2550 (J1513) и J1627+3219 (J1627), относящихся к “черным вдовам”.

В разделе 3.1 приведено описание предыдущих исследований рассмотренных объектов. Все три пульсара были обнаружены в рамках поиска периодических радиопульсаций от неассоциированных источников из каталога обсерватории Fermi. Оптический компаньон пульсара J2017 был впервые обнаружен в рамках фотометрического исследования на 2,4-метровом телескопе обсерватории MDM. Полученная кривая блеска в фильтре R показала сильную переменность с амплитудой $\sim 3^m$. При этом в максимуме блеска яркость объекта составила $R \approx 21,8^m$, а в минимуме – $R \gtrsim 24^m$. Возможный компаньон пульсара J1513 может быть ассоциирован с источником PSO J228.3472–25,8420 из каталога Pan-STARRS. Его яркость в фильтре i составляет 22^m . Оптический компаньон пульсара J1627 был ранее неизвестен. Детальные оптические исследования J1513, J2017 и J1627 до сих пор не проводились.

В разделе 3.2 описываются новые наблюдения, проведенные в рамках данной работы. Фотометрические наблюдения компаньонов J1627 и J2017 проходили на GTC с использованием быстрого фотометра HiPERCAM. Для них получены кривые блеска в пяти фильтрах системы super SDSS u_s , g_s , r_s , i_s и z_s . Источник J1513 наблюдался на Magellan-1 и 2,1-метровом телескопе OAN-SPM. Кривые блеска приведены на рис. 3.

В разделах 3.3 и 3.4 описан анализ кривых блеска и обсуждены результаты. Кроме того, в разделе 3.4 приведены результаты рентгеновских исследований. Кривые блеска J2017 и J1627 довольно симметричны относительно максимума яркости и имеют амплитуды $\approx 2^m$. По мере движения системы к минимуму блеска цвета объектов смещаются в красную сторону, что показывает разницу между температурами “дневной” и “ночной” сторон компаньона

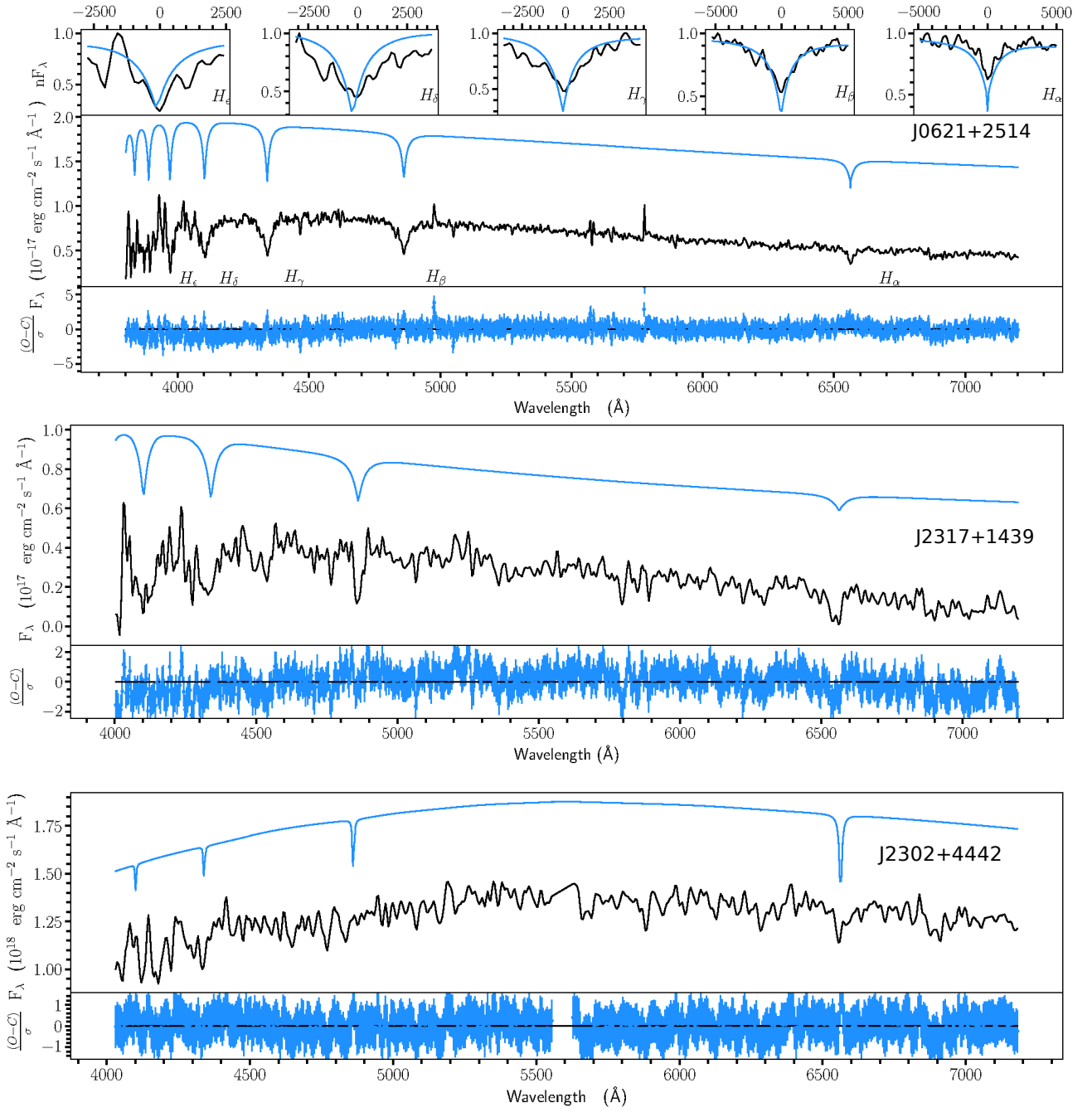


Рис. 1: На всех изображениях спектр объекта показан черной линией, модель – синей линией, а на нижних панелях показано отклонение модельных спектров от наблюдавшихся в единицах σ . Модельный спектр на всех изображениях искусственно сдвинут относительно наблюдавшегося. Для компаньона J0621 на верхних панелях, для наглядности, показаны отдельные спектральные линии.

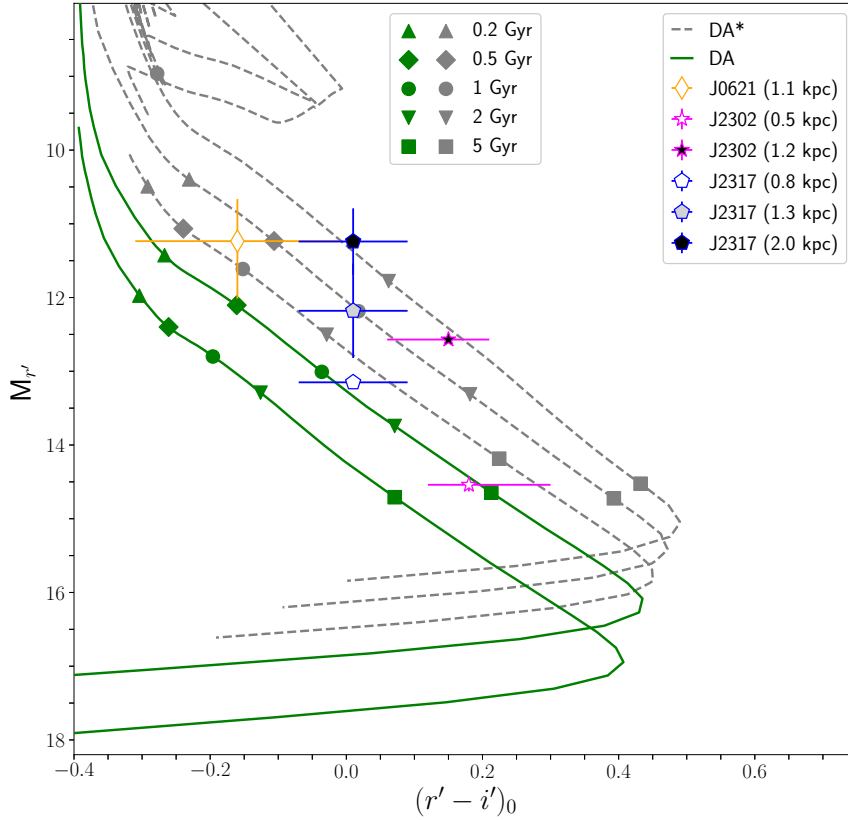


Рис. 2: Диаграмма цвет-звёздная величина с теоретическими кривыми остывания БК с водородными атмосферами. Кривые для БК с гелиевыми ядрами и массами 0,1821, 0,2724 и 0,4352 $M_\odot$ [17] показаны штриховыми серыми линиями, а для БК с СО ядрами и массами 0,6 и 1 $M_\odot$ [18, 19, 20] – сплошными зелёными линиями. Массы растут от верхней кривой до нижней. Расстояния до объектов показаны разными символами в верхнем правом углу. Кроме того, указаны времена остывания.

пульсара. В минимуме кривой блеска яркость компаньонов падает ниже предела детектирования.

Кривые блеска компаньона J1513 сложнее. Они демонстрируют значительную асимметрию с быстрым ростом яркости и последующим более плавным спадом. Эта особенность проявляется как в наблюдениях OAN-SPM, так и в данных Magellan-1, проведенных с разницей примерно в три года. Иными словами, это свойство сохраняется достаточно долго. Для объяснения асимметрии, обнаруженной в некоторых других паучьих системах, были предложены различные модели: холодные пятна на поверхности звезды-компаньона, вызванные ее магнитной активностью [21]; асимметричный нагрев от ударной волны, образованной взаимодействием ветров пульсара и компаньона (IBS; [22]), а также перераспределение тепла по поверхности компаньона за счет конвекции и диффузии [23]. Какая из этих идей действительно применима для описания J1513 – не понятно. Кроме того, обнаружены слабые 15-минутные колебания с амплитудой $\sim 0,^m1$, которые наблюдаются в фильтре r' на восходящей части кривой блеска в диапазоне 0,1 – 0,6 орбитальных фаз. Они присутствуют и в кривой блеска в фильтре R , хотя и с меньшей значимостью. Также были получены кривые блеска нескольких изолированных звезд в поле J1513. Отсутствие в них мелкомасштабных колебаний свидетельствует, что наблюдаемые колебания J1513 обусловлены процессами в двойной системе, а не эффектами земной атмосферы. Для других подобных систем таких вариаций пока не обнаружено.

Для определения параметров системы была проведена аппроксимация полученных кривых блеска моделью прямого нагрева, описанной в работе [24]. При этом предполагалось, что каждый элемент поверхности компаньона излучает как абсолютно чёрное тело.

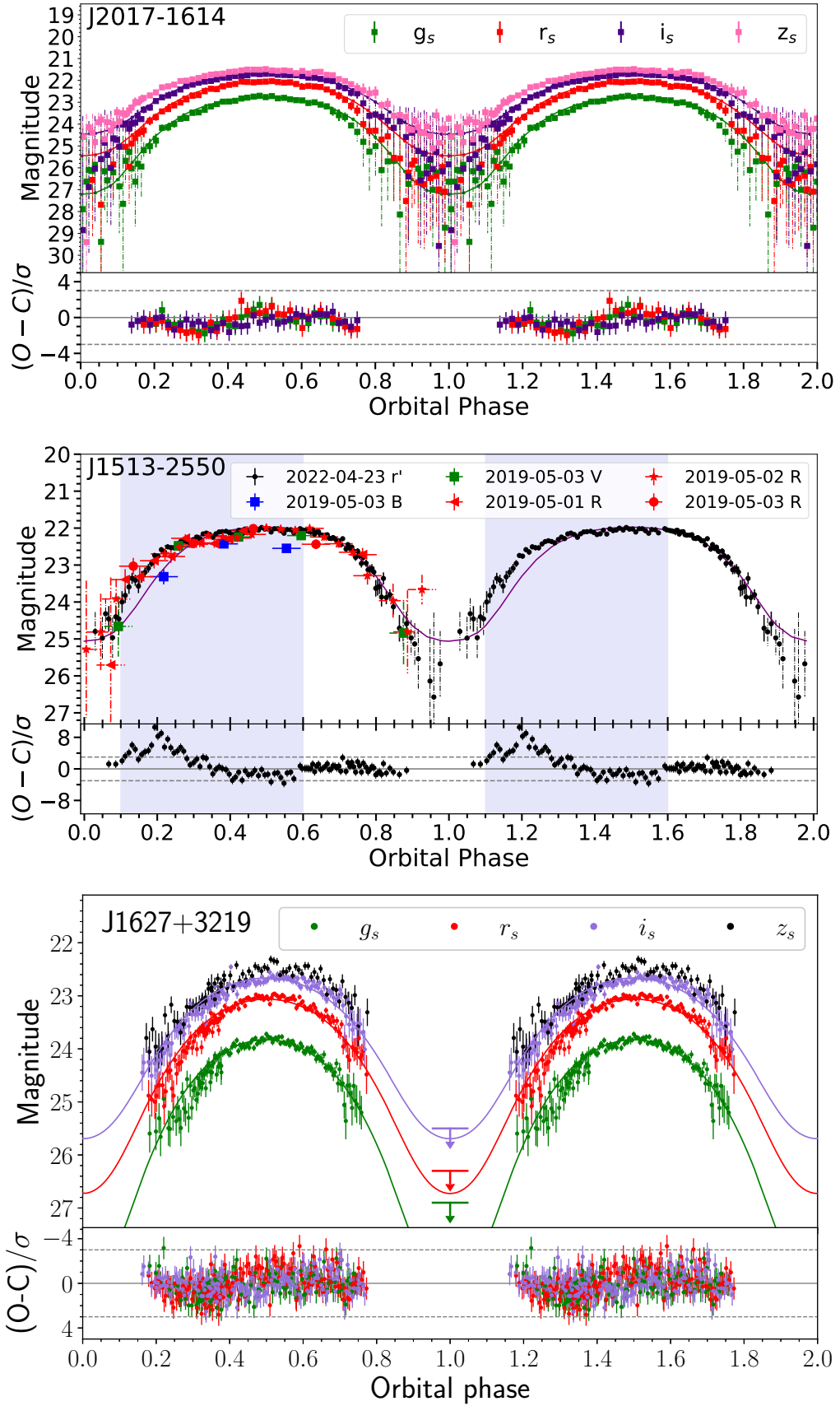


Рис. 3: Кривые блеска компаньонов пульсаров J2017, J1513 и J1627. На всех изображениях нижняя панель показывает отклонение модели прямого нагрева от наблюдательных данных в единицах стандартной ошибки σ . Сплошными линиями на верхних панелях показаны модели, полученные в результате аппроксимации. Точки с ошибками (штриховые линии), которые лежат ниже порога детектирования, при аппроксимации не использовались.

Таблица 1: Результаты аппроксимации кривых блеска J2017, J1513 и J1627.

	J2017	J1513	J1627
Избыток цвета $E(B - V)$, з.в.	$0,09^{+0,03}_{-0,01}$	$0,07^{+0,03}_{-0,04}$	0,051(25)
Расстояние D , кпк	$2,40^{+0,10}_{-0,05}$	1,95(5)	4,6(2)
Масса пульсара M_p , $M_\odot$	2,4(6)	$1,7^{+1,0}_{-0,6}$	$2,7^{+0,3}_{-1,0}$
Отношение масс $q = M_c/M_p$	0,017(2)	0,012(1)	0,017(2)
Температура “ночной” стороны T_n , 10^3 К	$3,0^{+0,2}_{-0,1}$	3,2(1)	2,7(3)
Наклонение i , град.	67^{+10}_{-7}	70^{+20}_{-15}	54^{+10}_{-4}
Степень заполнения полости Роша f	0,84(6)	$1,0^{+0,0}_{-0,1}$	0,71(7)
Коэффициент облучения $K_{\text{итг}}$, 10^{20} эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$	0,7(1)	0,6(1)	2,4(2)

Для объектов J2017 и J1627 использованы только кривые блеска в фильтрах g_s , r_s и i_s , поскольку приближение черного тела плохо описывает наблюдаемое распределение спектральной энергии в более широком диапазоне. Выбранная модель не включает компоненты, которые могли бы описать асимметрию и мелкомасштабные вариации кривой блеска. Поэтому для предварительного ограничения параметров системы J1513 проводилась аппроксимация только гладкой части кривой блеска в фильтре r' и в диапазоне орбитальных фаз $\phi \in [0,6; 1,0]$. При этом не учитывались кривые блеска, полученные в фильтрах V, B и R, так как они содержат слишком мало фотометрических точек, а некоторые из них лежат в диапазоне фаз с вариациями. Для всех объектов из рассмотрения были убраны точки, лежащие ниже, чем 3σ , от предела детектирования.

Параметрами аппроксимации были: избыток цвета $E(B - V)$; расстояние D ; масса пульсара M_p ; угол наклона орбиты i ; коэффициент облучения $K_{\text{итг}}$, определяющий нагрев компаньона; степень заполнения полости Роша компаньона f и температура “ночной” стороны компаньона T_n . Масса компаньона M_c определялась функцией масс, которая была получена из радиоданных и связывает M_p , M_c и i .

Кривые блеска J1627 и J2017 довольно симметричны и имеют один пик за период с амплитудой $\approx 2^m$, что также позволяет идентифицировать эти системы как BW [25]. Система J1513 также является “паучьим” пульсаром, но с асимметричной оптической кривой блеска. Простая модель прямого нагрева компаньона не воспроизводит асимметрию. Тем не менее, для получения первых оценок моделью аппроксимировалась только часть кривой блеска без мелкомасштабных колебаний. Результаты моделирования этих кривых приведены в табл. 1.

В разделе 3.5 приведены результаты и основные выводы третьей главы.

Четвертая глава посвящена исследованию недавно открытого оптического транзиента MASTER OT J072007.30+451611.6 (J0720), предварительно классифицированного ранее как поляр – двойную систему, где одной из компонент является БК с сильным (10 – 100 МГс) магнитным полем.

В разделе 4.1 описаны результаты предыдущих исследований J0720. Согласно данным, полученным в рамках каталинского обзора неба, J0720 демонстрирует сильную переменность $\lesssim 2^m$ с периодом $P_b = 0,0627887$ д. =

1,50693 ч. [26]. Столь высокая амплитуда переменности блеска в оптическом диапазоне нетипична для полярных, но характерна ($\approx 2^m - 4^m$) для рассмотренных ранее “паучьих” систем [27]. Кроме того, оптический спектр J0720, полученный в рамках обзора LAMOST, демонстрирует относительно узкие эмиссионные Бальмеровские линии. Обычно это – признак аккреции. Однако это же может указывать на принадлежность к “паучьей” системе: в спектрах некоторых из них также наблюдаются сильные эмиссионные линии водорода и гелия [25].

В разделе 4.2 проанализированы оптические фазово-разрешенные спектроскопические и фотометрические исследования, выполненные для подтверждения природы J0720.

Фотометрия J0720 проводилась с использованием разных оптических телескопов, а спектроскопия – с использованием GTC. Первые наблюдения были выполнены в феврале 2024 года с использованием спектрометра OSIRIS+ и дифракционной решетки R1000B. В результате были получены четыре последовательных спектра со спектральным разрешением 5,4 Å. Следующие наблюдения прошли в ноябре 2024 года с помощью того же инструмента с решетками R2000B и R2500R. В результате были получены десять последовательных снимков, равномерно распределенных по орбитальному периоду для каждой решетки. Итоговое спектральное разрешение составило 4,4 Å (R2000B) и 3,4 Å (R2500R).

В разделе 4.3 дан анализ полученных и архивных данных J0720. Архивные фотометрические наблюдения J0720 охватывают временной интервал с 2005 по 2025 год. В них выделяются состояния с высокой ($MJD \approx 53400 - 56000$ и $58200 - 60500$) $\approx 3^m - 4^m$ и низкой ($MJD \approx 56000 - 57000$) амплитудами переменности (см. рис. 4). Такое поведение типично для магнитных катаклизмических переменных [28], но тогда еще не было известно для систем типа BW.

Кроме того, на основании архивных данных был подтвержден орбитальный период $P_b = 1,506928(24)$ ч. Свернутые с этим периодом кривые блеска имеют согласованную форму (рис. 4) и демонстрируют сильную асимметрию с быстрым нарастанием яркости, выраженным плато с продолжительностью $\approx 0,4P_b$ и низкоамплитудным мерцанием в области максимальной яркости, а также последующим плавным спадом, длящимся $\approx 0,4P_b$.

В разделе 4.3.2 показано, что все спектры получены в высоком состоянии. Объект демонстрирует значительную переменность континуума с наибольшей амплитудой в диапазоне 5000 – 7000 Å, которая уменьшается к более синей и более красной частям спектра и исчезает ниже 4000 Å.

Спектры содержат сильные эмиссионные спектральные линии серии Бальмера и более слабые эмиссионные линии HeI и HeII (рис. 5). Максимумы эмиссионных линий демонстрируют сильную синусоидальную зависимость от фазы. Линии имеют сильно переменные асимметричные профили, указывающие на наличие как минимум двух компонент. Такие профили с двумя или тремя компонентами характерны для полярных [29]. Для описания этих профилей была использована модель, представляющая из себя комбинацию двух функций Гаусса, одна из которых “широкая” и интенсивная, а другая “узкая” и меньшей интенсивности. Полученные кривые радиальных скоростей имеют близкие амплитуды. При этом они сдвинуты на 0,25 орбитальной фазы.

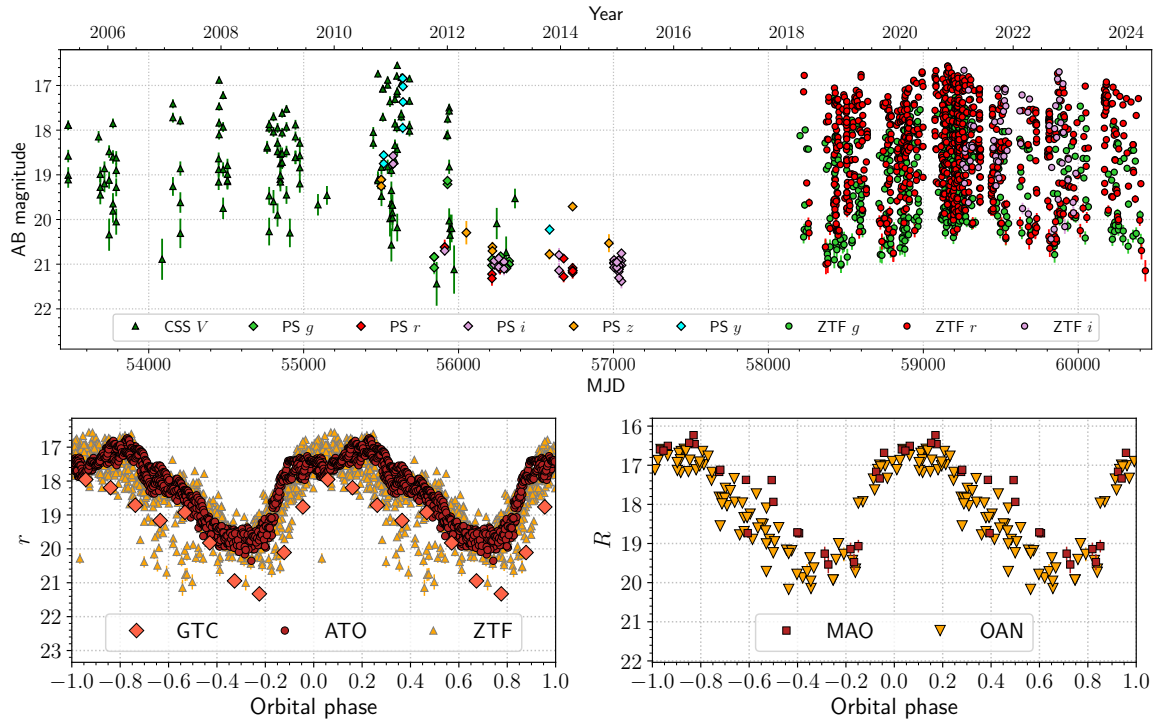


Рис. 4: Кривые блеска, полученные на разных телескопах. Вверху: кривые блеска, определенные по данным различных оптических обзоров (PS = Pan-STARRS). Внизу: кривые блеска, свернутые с орбитальным периодом, по данным оригинальных наблюдений. Внизу слева также представлена кривая блеска, полученная из спектроскопических данных GTC.

Интенсивности и ширины на полувысоте каждой из компонент меняются с орбитальным периодом незначительно. В полярах узкие компоненты спектральных линий возникают вблизи точки Лагранжа $L1$, а широкие компоненты – в области взаимодействия аккреционного потока и магнитного поля БК [30].

В разделе 4.3.3 приведена оценка основных параметров двойной системы. Для этого использовалась средняя для объектов этого класса масса БК $M_{БК} = 0,8 M_{\odot}$. С помощью выражений из работы [31] были оценены масса $M_c = 0,09 \pm 0,05 M_{\odot}$ и радиус компаньона $R_c = 0,17 \pm 0,02 R_{\odot}$. Предполагая, что узкая компонента $H\alpha$ формируется вблизи точки $L1$, и используя измеренную амплитуду кривой радиальных скоростей и массу компонент, было оценено наклонение системы $i = 48 \pm 12$ град.

В разделе 4.3.4 рассмотрены доплеровские томограммы, полученные на основе спектральных данных методом максимальной энтропии [32]. Эти томограммы представлены на рис. 6. На томограмме для линий $H\alpha$ видны компактная и протяженная яркие области. При построении томограмм начальная фаза считалась свободным параметром и выбиралась так, чтобы максимум компактной области находился в точке $L1$. Такое соответствует началу баллистического потока и наблюдается у затменных полярных звезд (см., например, [29, 33]). При этом протяженная область излучения расположена между баллистической траекторией и границей полости Роша для БК, а ее максимум смещен на $\approx 0,25 P_b$ относительно точки $L1$. Аналогичная картина получена и для других Бальмеровских линий и линий HeI .

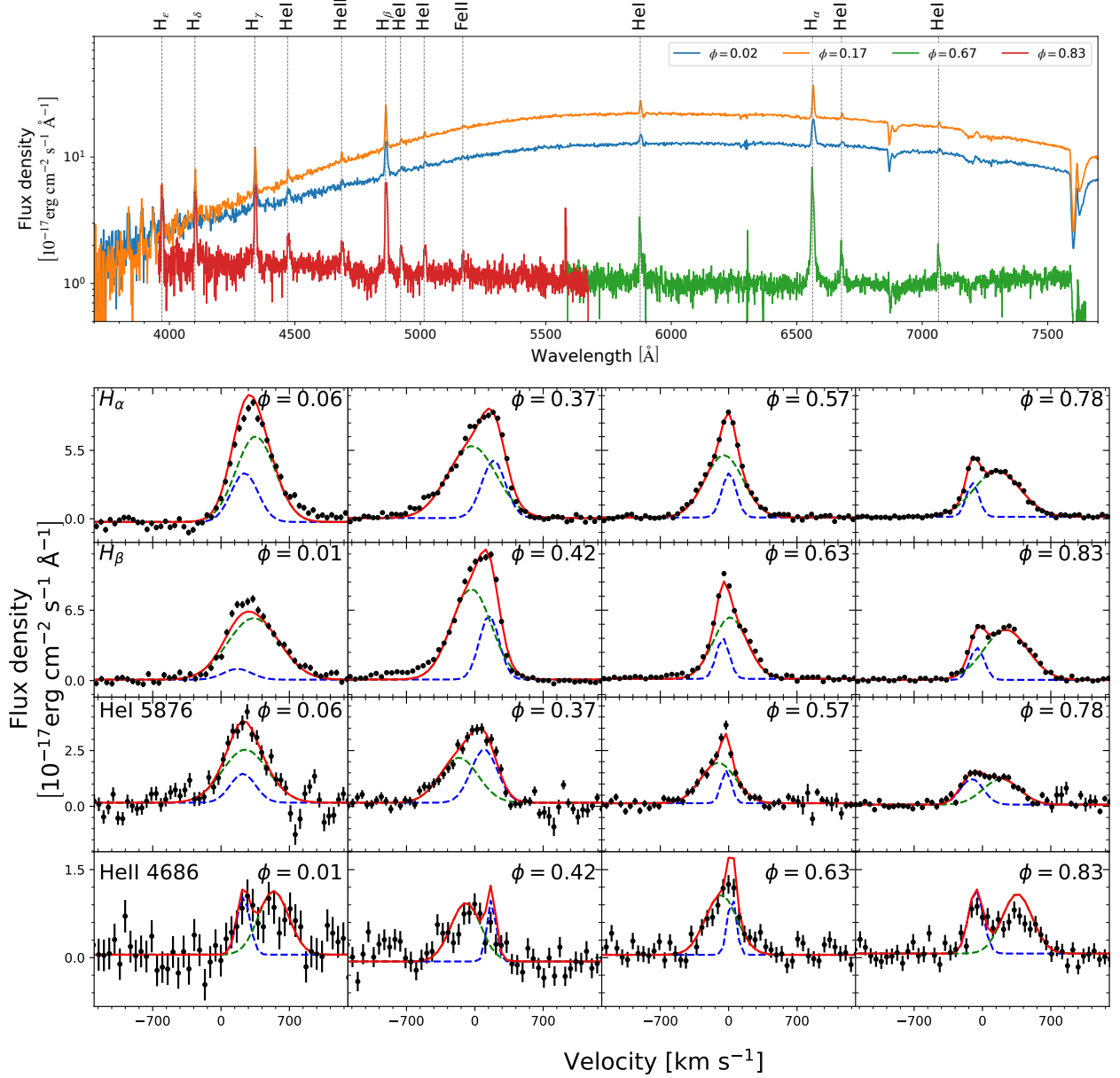


Рис. 5: Сверху: спектры источника J0720, полученные для различных орбитальных фаз. Снизу: профили спектральных линий для различных фаз (чёрные точки). Красным показана двухкомпонентная модель, зеленая штриховая линия соответствует “широкой” компоненте, а синяя – “узкой”.

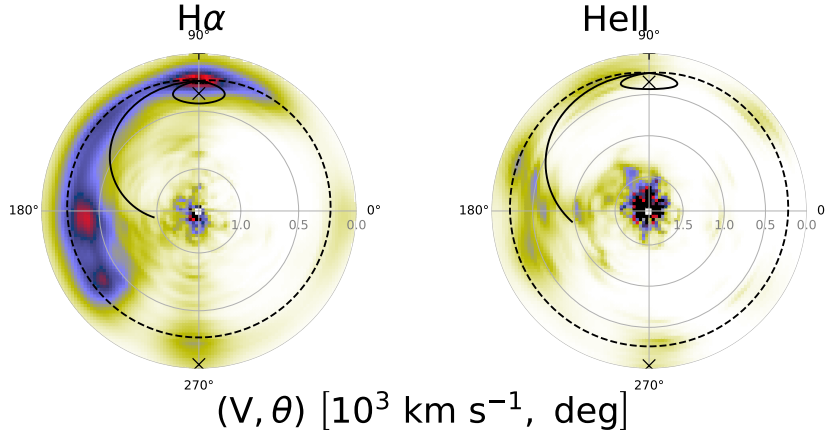


Рис. 6: Доплеровские томограммы в инвертированном пространстве скоростей, построенные для линий $H\alpha$ (слева) и $HeII$ 4686 (справа). Замкнутыми линиями показаны полости Роша для БК (штриховая) и компаньона (сплошная), сплошной кривой обозначена баллистическая траектория, а центры масс обозначены символами $\times$. Для их построения были использованы оценки масс, радиусов и наклона, рассмотренные в разделе 4.3.3.

В отличие от водородных линий Бальмера и линий HeI на томограмме линии $HeII$ 4686 Å нет яркого пятна в районе точки $L1$: для формирования последней линии необходимы высокие энергии, достигаемые лишь в области взаимодействия аккреционного потока с магнитным полем БК.

В разделе 4.3.5 рассмотрены рентгеновские данные J0720, полученные на телескопе eROSITA. Оценено отношение потоков в рентгеновском и оптическом диапазонах, $\log(F_X/F_{opt}) \sim -0,3 - 1,8$, что согласуется со значениями, наблюдаемыми для полярных.

Полученные результаты описаны в разделах 4.4 и 4.5. Приведены оценки эквивалентных ширин и дано их сравнение с типичными значениями для магнитных катаклизмических переменных. Отмечено, что на протяжении всего орбитального периода отношение эквивалентных ширин $EW(HeII\ 4686)/EW(H\beta) \lesssim 0,4$ не удовлетворяет критерию Сильбера для магнитных систем [34].

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы:

1. Впервые проведен анализ спектроскопических данных компаньонов трёх миллсекундных пульсаров: J0621+2514, J2302+4442 и J2317+1439, наблюдавшихся на телескопе GTC. В спектрах компаньонов пульсаров J0621+2514 и J2317+1439 обнаружены абсорбционные линии серии Бальмера, которые указывают, что эти объекты являются БК с водородными атмосферами. Аппроксимация этих спектров теоретическими моделями позволила показать, что их температуры поверхности лежат в диапазонах 8400 – 8800 К и 7400 – 12500 К, соответственно. В спектре компаньона J2302+4442 из-за низкого соотношения сигнал – шум выделить спектральные линии не удалось. Тем не менее, его широкополосные величины и форма континуума позволили отнести его к семейству БК с водородными атмосферами. Его эффективная температура составила

$T_{eff} < 6000$ К. Также получена оценка расстояния для компаньона пульсара J0621, $1,1 \pm 0,3$ кпк. На основании полученных спектров и оценок расстояния показано, что этот объект является БК с гелиевым ядром. Для J2317 разрешение спектров не позволило независимо оценить расстояние. Оценка массы этого объекта, полученная на основе теоретического соотношения массы и орбитального периода компаньона, составила $M_{J2317} \approx 0,2M_{\odot}$. Это позволило предположить наличие у БК в J2317 гелиевого ядра. Кроме того, получены оценки возрастов компаньонов пульсаров J0621 и J2317 ($\lesssim 2,0$ млрд лет).

2. Проведено фазово-разрешенное многополосное фотометрическое исследование трёх миллисекундных пульсаров, J1513–2550, J2017–1614 и J1627+3219, относящихся к системам типа “чёрная вдова”. Кривые блеска компаньонов пульсаров J2017–1614 и J1627+3219 довольно симметричны, что позволило провести их аппроксимацию моделью прямого нагрева. Получены первые оценки параметров систем: расстояния до них, наклона и массы компонент. Оценки указывают, что массы нейтронных звезд могут быть существенно выше канонической массы. Кривая блеска J1513–2550 показывает сильную асимметрию, сохраняющуюся на протяжении более трёх лет. Отмечена возможность наличия слабых колебаний кривой блеска этого объекта с амплитудой $\sim 0,^m1$ и периодом ≈ 15 минут.
3. По данным оптических спектроскопических и фотометрических наблюдений проведено исследование оптического источника MASTER OT J072007.30+451611.6. Подтверждены орбитальный период и амплитуда переменности кривой блеска $\approx 3^m$. Ранее этот объект был классифицирован как поляр, однако столь высокая переменность нетипична для таких систем и позволяла предположить его принадлежность к классу “пульсаров-пауков”. Проведённое исследование исключило эту возможность и позволило однозначно отнести этот объект к полярам. Обнаружены высокое и низкое состояние источника со спектрами, которые содержат эмиссионные линии $H\beta$, HeI и слабые линии HeII. Спектральные линии демонстрируют сложную структуру, описываемую моделью из двух гауссиан. Построены доплеровские томограммы и сделаны выводы о пространственном распределении вещества в этой системе. Полученная оценка отношения эквивалентных ширин $EW(HeII\ 4686)$ и $EW(H\beta)$, $\lesssim 0,4$ необычна для систем такого типа.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1 Bobakov A. V., Karpova A. V., et al., Optical spectral observations of three binary millisecond pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Vol. 524. – no. 3 – 3357-3365;
- A2 Bobakov A. V., Kirichenko A. Yu., et al., Two black widow pulsars in the optical and X-rays // Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Vol. 690. – A173;

- A3 Bobakov A. V., Zharikov S. V., et al., MASTER OT J072007.30+451611.6: a polar with strong optical variability and suppressed HeII emission // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2025. – Vol. 541. – no. 4 – 3468–3478;
- A4 Bobakov A. V., Kirichenko A., et al., Studying the black widow pulsars PSR J0312-0921 and PSR J1627+3219 in the optical and X-rays // Astronomy & Astrophysics. DOI:10.1051/0004-6361/202556620

Литература, цитируемая в автореферате

1. Baade W., Zwicky F. Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays // Phys. Rev. — 1934. — Vol. 46, no. 1. — P. 76–77. — Publisher: American Physical Society.
2. Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H. et al. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source (Reprinted from Nature, February 24, 1968) // Nature. — 1969. — Vol. 224, no. 5218. — P. 472.
3. Pavlov G. G., Stringfellow G. S., Cordova F. A. Hubble Space Telescope Observations of Isolated Pulsars // ApJ. — 1996. — Vol. 467. — P. 370.
4. Backer D. C., Kulkarni Shrinivas R., Heiles Carl et al. A millisecond pulsar // Nature. — 1982. — Vol. 300, no. 5893. — P. 615–618.
5. Bisnovatyi-Kogan G. S., Komberg B. V. Pulsars and close binary systems // Soviet Astronomy. — 1974. — Vol. 18. — P. 217.
6. Manchester R N. Pulsar timing and its applications // JoP Conference Series. — 2017. — Vol. 932. — P. 012002.
7. Shapiro Irwin I. Fourth Test of General Relativity // Phys.Rev. Letters. — 1964. — Vol. 13, no. 26. — P. 789–791.
8. Roberts Mallory S. E. Surrounded by spiders! New black widows and redbacks in the Galactic field // Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years / Ed. by Joeri van Leeuwen. — Vol. 291 of IAU Symposium. — 2013. — Mar. — P. 127–132.
9. Özel Feryal, Freire Paulo. Masses, Radii, and the Equation of State of Neutron Stars // ARA&A. — 2016. — Vol. 54. — P. 401–440.
10. Linares M. Super-Massive Neutron Stars and Compact Binary Millisecond Pulsars // Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources - XIII. 3-8 June 2019. Palermo. — 2020. — P. 23.
11. Benvenuto O. G., De Vito M. A., Horvath J. E. Understanding the Evolution of Close Binary Systems with Radio Pulsars // ApJ. — 2014. — Vol. 786, no. 1. — P. L7.
12. Chen Hai-Liang, Chen Xuefei, Tauris Thomas M., Han Zhanwen. Formation of Black Widows and Redbacks—Two Distinct Populations of Eclipsing Binary Millisecond Pulsars // ApJ. — 2013. — Vol. 775, no. 1. — P. 27.

13. Karpova A. V., Zyuzin D. A., Shibano Yu. A. et al. Optical Identification of the Millisecond Pulsar J0621+2514 // PASA. — 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 // MNRAS. — 2018. — Vol. 480, no. 2. — P. 1950–1955.
15. Dai S., Smith M. C., Wang S. et al. The Identification of the White Dwarf Companion to the Millisecond Pulsar J2317+1439 // ApJ. — 2017. — Vol. 842, no. 2. — P. 105.
16. Tauris Thomas M., Savonije Gerrit J. Formation of millisecond pulsars. I. Evolution of low-mass X-ray binaries with $P_{\text{orb}} > 2$ days. — Vol. 350. — P. 928–944. — eprint: astro-ph/9909147.
17. 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 // A&A. — 2013. — Vol. 557. — P. A19.
18. Holberg J. B., Bergeron P. Calibration of Synthetic Photometry Using DA White Dwarfs // AJ. — 2006. — Vol. 132. — P. 1221–1233.
19. Kowalski P. M., Saumon D. Found: The Missing Blue Opacity in Atmosphere Models of Cool Hydrogen White Dwarfs // ApJ. — 2006. — Vol. 651. — P. L137–L140.
20. Tremblay P.-E., Bergeron P., Gianninas A. An Improved Spectroscopic Analysis of DA White Dwarfs from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 4 // ApJ. — 2011. — Vol. 730. — P. 128.
21. 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 // MNRAS. — 2021. — Vol. 502, no. 1. — P. 915–934.
22. Romani Roger W., Sanchez Nicolas. Intra-binary Shock Heating of Black Widow Companions // ApJ. — 2016. — Vol. 828, no. 1. — P. 7.
23. Kandel D., Romani Roger W. Atmospheric Circulation on Black Widow Companions // ApJ. — 2020. — Vol. 892, no. 2. — P. 101.
24. Zharikov S., Kirichenko A., Zyuzin D. et al. Optical detection of the black widow binary PSR J2052+1219 // MNRAS. — 2019. — Vol. 489, no. 4. — P. 5547–5555.
25. 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 // ApJ. — 2022. — Vol. 941, no. 2. — P. 199.
26. Denisenko D. MASTER OT J072007.30+451611.6: Cataclysmic Variable with an Extreme Hot Spot // The Astronomer’s Telegram. — 2018. — Vol. 11626. — P. 1.

27. Mata Sánchez D., Kennedy M. R., Clark C. J. et al. A black widow population dissection through HiPERCAM multi-band light curve modelling // MNRAS. — 2023. — Vol. 520, no. 2. — P. 2217–2244.
28. Latham D. W., Liebert J., Steiner J. E. The 1980 low state of AM Her. // ApJ. — 1981. — Vol. 246. — P. 919–934.
29. Schwöpe A. D., Mantel K. H., Horne K. Phase-resolved high-resolution spectrophotometry of the eclipsing polar HU Aquarii. // A&A. — 1997. — Vol. 319. — P. 894–908.
30. Schwöpe A. D., Horne K., Steeghs D., Still M. Dissecting the donor star in the eclipsing polar HU Aquarii // A&A. — 2011. — Vol. 531. — P. A34.
31. Smith D. A., Dhillon V. S. The secondary stars in cataclysmic variables and low-mass X-ray binaries // MNRAS. — 1998. — Vol. 301, no. 3. — P. 767–781.
32. Spruit H. C. Fast maximum entropy Doppler mapping // arXiv e-prints. — 1998. — P. astro-ph/9806141.
33. Salvi Nikita, Ramsay Gavin, Cropper Mark et al. Indirect imaging of the accretion stream in eclipsing polars - IV. V895 Cen // MNRAS. — 2002. — Vol. 331, no. 2. — P. 488–494.
34. Silber Andrew D. Studies of an X-Ray Selected Sample of Cataclysmic Variables. // Ph.D. thesis / Massachusetts Institute of Technology. — 1992.