

Отзыв официального оппонента

на диссертацию **БОБАКОВА АЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬЕВИЧА**

"Оптические исследования двойных звездных систем с миллисекундным пульсаром",

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Нейтронные звезды находятся на заключительной стадии эволюции массивных звезд после их взрывов в виде Сверхновых 2-го типа и характеризуются предельными значениями ряда физических параметров - плотности вещества, напряженности магнитного поля, углового момента вращения и др. Особый интерес представляют быстровращающиеся нейтронные звезды, принадлежащие к классу миллисекундных пульсаров, которые обнаруживаются вне областей образования молодых звезд, либо остатков Сверхновых, то есть имеют характерные времена жизни в миллиарды лет. Их быстрое вращение связывают с аккрецией на них вещества с компаньона в двойной системе. Среди систем с быстрыми пульсарами в двойных системах особый интерес представляют системы, в которых второй компаньон облучается пульсарным ветром и постепенно испаряется, теряя массу. Физические параметры таких систем и эволюционные процессы для них в настоящее время плохо изучены, в том числе и потому, что этот класс компактных источников имеет малую оптическую светимость и они являются предельно слабыми оптическими источниками на небе. Их исследования могут выполняться лишь с использованием крупных наземных оптических телескопов в сочетании с современными численными методами анализа их фотометрических кривых блеска и спектров. В связи с этим тематика представленной диссертации является чрезвычайно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, общим объемом 102 страницы, включая 30 рисунков, 11 таблиц и 134 ссылок на литературу.

Во **Введении** автор обосновывает актуальность темы диссертации, перечисляет цели работы, формулирует ее научную и практическую значимость. Перечисляются положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации работы. Отдельным пунктом освещен личный вклад автора.

Первая Глава является методической, в ней дан краткий обзор использованных для наблюдений телескопов, инструментов, и методов обработки и анализа оптических данных. Необходимо отметить, что в

процессе выполнения диссертационного исследования оптические наблюдения проводились на целой серии крупных телескопов – 10-м телескопе GTC на Канарских островах, 6.5-м телескопе Магеллан в Чили, а также на телескопах класса 1.5-2 метра в различных обсерваториях мира. Это обстоятельство является принципиально важным, так как работа основана на **новых и оригинальных** наблюдениях. Кроме того, дополнительно в работе были использованы открытые архивные данные оптических обзоров неба – PanSTARRS, SDSS, CSS, ZTF. Таким образом диссертационная работа имеет **хорошую экспериментальную базу** с точки зрения астрономических данных для их последующего комплексного анализа.

Вторая Глава посвящена анализу **впервые выполненных** спектроскопических наблюдений трех миллисекундных пульсаров – J0621+2514, PSRJ2302+4442, PSRJ2317+1439. Изначально эти пульсары были обнаружены путем поиска радиопульсаций у гамма-источников обсерватории Fermi. Оптический компаньон пульсара J0621 был исследован по фотометрическим данным обзоров PanSTARRS и SDSS, где он проявил себя в виде слабого источника $g \sim 22$ mag. Сравнение фотометрических данных с кривыми остывания белых карликов дало оценку температуры и массы. Более слабый в оптике ($r \sim 23.3$ mag) компаньон пульсара J2302 был обнаружен при наблюдениях на 10-м телескопе GTC. Оптический источник с $g \sim 22$ mag ассоциированный с пульсаром J2317 был отождествлен по наблюдениям на 3.9-м телескопе CNFT. Диссертантом был **впервые** выполнен детальный анализ спектров компаньонов трех двойных систем с пульсарами – белых карликов, по наблюдениям на 10.4-м телескопе GTC и им были существенно уточнены физические параметры компаньонов по сравнению с ранее опубликованными оценками, основанными только на фотометрических наблюдениях. В этом заключается **существенная новизна** полученных диссертантом результатов во 2-й Главе.

В третьей Главе выполнен анализ кривых блеска трех миллисекундных пульсаров, относящихся к типу “черных вдов”, **по новым, оригинальным** фотометрическим наблюдениям, выполненным на 10.4-м, 6.5-м и 2.1-м телескопах. **Обнаружено**, что кривые блеска двух источников J2017 и J1627 имеют амплитуды 2 звездные величины и симметричны относительно максимумов блеска. Цвета объектов изменяются с орбитальной фазой, что интерпретируется как разность температур между “ночной” и “дневной” сторонами компаньона пульсара. Такие подробные кривые блеска позволили диссертанту получить оценки характерных температур “ночной” и “дневной” сторон компаньонов. Для компаньона в системе J1513 **обнаружена значимая асимметрия** в кривой блеска, с быстрым ростом яркости и более плавным спадом, которая проявилась как постоянная характерная особенность на шкале времени в три года. Диссертантом обсуждаются различные физические модели и параметры для возможной интерпретации обнаруженного **интересного эффекта** в таких двойных системах.

Для определения физических параметров наблюдаемых систем диссертантом были выполнены численные расчеты с целью аппроксимации кривых блеска моделями прямого нагрева, в предположении чернотельного излучения единичными элементами поверхности компаньона. Полученные параметры систем позволили диссертанту сделать **убедительный вывод**, что все три системы принадлежат к классу “черных вдов”.

Четвертая глава посвящена исследованию нового оптического транзиента MASTER OT J072007.30+451611.6 (J0720), предварительно классифицированного как поляр с орбитальным периодом 1.5 часа. Для подтверждения природы этой системы в диссертационной работе были выполнены фотометрические и спектроскопические наблюдения J0720. По архивным данным ZTF был уточнен орбитальный период. Оригинальные, новые высокоточные кривые блеска были свернуты с этим периодом. Диссертантом **обнаружено**, что фазовые кривые блеска демонстрируют сильную асимметрию с быстрым нарастанием яркости, выраженным плато и последующим плавным падением блеска.

В отдельных разделах Главы 4 анализируются спектры объекта, полученные на 10.4-м телескопе в разных фазах блеска, и сделаны оценки основных параметров системы – масса ($0.09 \pm 0.05 M_{\odot}$), радиус ($0.17 \pm 0.02 R_{\odot}$) вторичного компаньона и наклонение орбиты $i = 48 \pm 12$ градусов (система является незатменной). По эмиссионным линиям в спектрах были построены доплеровские томограммы, которые показали наличие аккреционного потока и отсутствие аккреционного диска, что позволило диссертанту классифицировать этот источник как поляр.

В отдельном разделе Главы 4 анализируются рентгеновские данные, полученные для источника J0720 на телескопе eROSITA / SRG. Они позволили оценить **высокое отношение** потока в рентгеновском диапазоне к оптическому потоку $\log (F_x / F_{opt}) \sim -0.3 - 1.8$, что согласуется со значениями, характерными для полярных звезд. С другой стороны, отношение эквивалентных ширин линий HeII 4686 и H β < 0.4 на протяжении всего орбитального периода и не соответствует критериям для магнитных систем. Диссертантом делается пояснение, что излучение в линии HeII 4686 может быть подавлено низким темпом аккреции (определенным диссертантом по рентгеновским данным eROSITA), а для уточнения параметров системы необходимы дополнительные комплексные наблюдения системы, особенно в низком состоянии блеска.

В Заключение приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Оценивая диссертацию в целом, можно сделать вывод, что она представляет собой **емкое и содержательное** астрофизическое исследование с **новыми, оригинальными** и интересными научными результатами. Текст диссертации

достаточно краткий, но написан ясным языком, позволяющим понять основные результаты выполненного автором исследования.

К числу основных достоинств диссертации можно отнести следующие:

- 1) в работе интерпретируется **собственный, оригинальный** наблюдательный материал, полученный в течение нескольких лет с использованием крупнейших оптических телескопов мира, оснащенных самым современным научным оборудованием,
- 2) исследования охватывают интересный класс **уникальных** тесных двойных систем с миллисекундными пульсарами, интерпретация природы которых составляет давнюю нерешенную проблему. Результаты диссертанта являются важным и существенным шагом в решение этой задачи,

Достоверность полученных диссертантом результатов основана на отработанной и апробированной методике обработки данных, сравнением с результатами опубликованных данных для ряда общих объектов исследования, опубликованием результатов исследований в 4 статьях в ведущих международных журналах, с высоким уровнем экспертизы научных результатов статей. Апробация диссертационной работы была выполнена представлением результатов на 5 всероссийских и международных конференциях.

Представленная к защите диссертация не лишена и некоторых недостатков, основная их часть является терминологической, либо связана с опечатками в тексте:

1. Автореферат, стр. 4, 12-я строка сверху - “выше ядерной плотности $2,8 \times 10^{-14} \text{ г см}^{-3}$ ”,

Опечатка, в степени 14 напечатан минус, должно быть $2,8 \times 10^{14} \text{ г см}^{-3}$

2. Автореферат, стр. 9, рис. 1 - в потоках по оси Y - опечатка в степени плотности потока, то минус, то плюс
3. Глава 1, стр. 15 – в описании обработки фотометрических данных написано - “вычитание плоского поля” – неверная трактовка этой процедуры, так как учет попиксельной неравномерности чувствительности ПЗС-матрицы и эффектов виньетирования света в оптической системе телескопа осуществляется **делением** на кадры “плоского поля”, а не путем **вычитания**
4. В разделе 1.2.1 Астрометрия на стр. 15 не дается пояснение, что означает “мировая система координат”. Астрометрическая система привязана к какому либо каталогу положений небесных источников (GAIA, Hipparcos, радиоисточников без собственных движений ICRF)

5. Стр. 17 – во фразе “полученную в результате **светимость** в звездных величинах “ термин “**светимость** ” является некорректным, так как звездная величина является логарифмом от освещенности, создаваемой источником в поле ПЗС-матрицы. К светимости источника величина освещенности не имеет никакого отношения.
6. В Разделе 1.2.3 Спектроскопия, на стр. 17 написано – “Для определения параметров дисперсионного уравнения в наблюдаемом спектре лампы выбирается набор спектральных линий, положения которых сравниваются с их **теоретическими** положениями”. На самом деле используются таблицы опубликованных, экспериментально определенных **лабораторных длин волн** атомов и ионов, в зависимости от материала изготовления калибровочной лампы
7. Стр. 18 - “Полученные в результате этого спектр звезды-стандарта сравниваются с известным спектром **высокого разрешения** для этого объекта”. – На самом деле сравниваются с опубликованными (кем то ранее определенными) **внеатмосферными потоками** в континууме, получаемыми из спектров **низкого разрешения**
8. В Таблице 2.2 на стр. 27 в одна из колонок обозначена как “**Масса воздуха**”. Правильным термином является “**воздушная масса**” и она нормируется на единицу в направлении на зенит, так как абсолютное значение массы столба воздуха является модельно зависимой от параметров земной атмосферы
9. Чем объясняются различия в ширинах профилей водородных линий в наблюдаемом и теоретическом спектрах источника J0621 на Рис. 2.5, 2.6 ?
10. Почему на рис. 2.7 частота отсчетов по длине волны на нижней панели с невязками в несколько раз выше, чем в исходном наблюдаемом спектре ?
11. В подписи к Рис. 2.9 должно быть указано - диаграмма “**Цвет – абсолютная** звездная величина”, а не диаграмма “**Цвет – звездная величина**”
12. В Таблицах 3.1, 3.2, 3.3 **перепутаны** обозначения галактической долготы (l) и широты (b)
13. На Рис. 3.4 на кривых блеска наблюдаемые значения звездных величин в фильтре g на фазах фаз 0.8 – 1.2 лежат в диапазоне **27-29** звездных величин, что находится ниже чувствительности наземных оптических наблюдений даже на крупных телескопах. Насколько достоверны эти оценки блеска ?

14. Рис. 4.4 Чем вызвано специфическое распределение энергии в спектре источника J0702 в максимуме блеска с **завалом** в синей области спектра, может ли такой вид распределения энергии вызван дополнительным вкладом от циклотронных гармоник в красной области спектра ?

Указанные недостатки имеют технический характер, не умаляют научных достоинств диссертации, и не влияют на результаты, выносимые на защиту.

Результаты, полученные в диссертации Бобакова А.В. могут быть использованы в ГАИШ МГУ, САО РАН, ИНАСАН, КФУ, КраО, ГАО РАН и в других отечественных и зарубежных организациях, занимающихся исследованиями тесных двойных систем с нейтронными звездами.

Автореферат полностью соответствует структуре и содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационное исследование "Оптические исследования двойных звездных систем с миллисекундным пульсаром", отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,, а соискатель - **Бобаков Александр Васильевич**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 - физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент :

Главный научный сотрудник НИЛ астрофотометрии и звездных атмосфер, профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института Физики Казанского (Приволжского) федерального университета, доктор физ.-мат. наук, член – корр. РАН

Бикмаев Ильфан Фяритович

03 декабря 2025 года

Контактные данные
телефон (843)-292-77-97
электронный адрес:
ilfan.bikmaev@kpfu.ru

ул. Кремлевская, д. 18,
г. Казань, 420008

