ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Физический институт имени П.Н.Лебедева
Российской академии наук
Ф И А Н

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ФИАН
академик РАН, д.ф.-м.н.

Н.Н.Колачевский

119991, ГСП-1, Москва
Ленинский проспект, 53 ФИАН
Телефон: (499) 135 1429
(499) 135 4264
Телефакс: (499) 135 7880
http://www.lebedev.ru

Дата 19.10.2026 г.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу

Цыганкова Сергея Сергеевича

«Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Диссертация Цыганкова С.С. «Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (далее ИКИ РАН, ИКИ).

Актуальность темы диссертации. Диссертация С. С. Цыганкова посвящена одной из центральных проблем современной астрофизики высоких энергий — наблюдательной диагностике физических условий в окрестности аккрецирующих нейтронных звёзд с сильными магнитными полями. Прямое пространственное разрешение областей энерговыделения в таких системах недоступно, поэтому их геометрия, структура

магнитного поля и режимы аккреции должны восстанавливаться по совокупности спектральных, временных и поляризационных признаков.

Несмотря на более чем полувековую историю исследований рентгеновских пульсаров, физическая природа их континуальных спектров, механизм образования профилей импульса, топология магнитного поля вблизи поверхности нейтронной звезды и границы различных режимов аккреции остаются плохо определёнными. Особую актуальность этим задачам придают открытие пульсирующих ультраярких рентгеновских источников и появление рентгеновской поляриметрии, впервые обеспечившей независимый канал информации о геометрии систем и свойствах излучающих областей.

Актуальность диссертации определяется не только значимостью отдельных исследованных объектов, но и выбранным комплексным подходом. В работе объединены данные обсерваторий NuSTAR, Swift, INTEGRAL, XMM-Newton, NICER, RXTE, Chandra, «Спектр-РГ», IXPE и Gaia, а также методы широкополосной спектроскопии, анализа апериодической переменности, исследования переходов между режимами аккреции и рентгеновской поляриметрии. Такой подход позволяет сопоставлять независимые диагностические признаки и уменьшать неоднозначность интерпретаций.

Цель, объём и структура работы. Целью диссертации является определение физических механизмов формирования рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звёзд и получение количественных ограничений на геометрию областей энерговыделения, структуру магнитного поля и режимы аккреции на основе комплексного анализа спектральных, временных и поляризационных характеристик.

Диссертация представляет собой логически связанный труд, который состоит из введения, шести глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации и списка литературы. Полный объём составляет 221 страницу; работа содержит 85 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 550 наименований. На защиту вынесено девять положений.

Логика работы развивается от диагностики изменения геометрии излучающей области при изменении светимости и изучения дисково-магнитосферного взаимодействия к режимам аккреции при низкой светимости, формированию спектров и, наконец, к получению независимых ограничений из рентгеновской поляриметрии. Это обеспечивает внутреннее единство большого массива результатов, полученных в течение длительного исследовательского цикла.

Во введении дан обзор физики аккрецирующих рентгеновских пульсаров, обоснована актуальность темы, сформулированы цель, методы, научная новизна и значимость результатов, приведены сведения об апробации и кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе исследована зависимость энергии циклотронной линии от светимости пульсара V 0332+53. Показана связь измеряемой спектральной характеристики (циклотронной линии) с изменением геометрии области энерговыделения и проверяемыми предсказаниями моделей аккреционной колонки. Рассмотрены режим перехода между режимами докритической и сверхкритической аккреции и получена оценка критической светимости.

Во второй главе развивается диагностика структуры магнитного поля и внутренней области аккреционного диска по апериодической переменности рентгеновского потока. Исследуется связь частоты излома спектра мощности с характерным масштабом магнитосферы, анализируются пульсары Her X-1 и GRO J1744−28, а также возможность использовать отсутствие или наличие красного шума для проверки аккреционной природы излучения. Существенным достоинством главы является попытка извлечь физические ограничения из временных характеристик, независимых от циклотронной диагностики.

Третья глава посвящена эффекту «пропеллера». Рассмотрены данные о резких изменениях светимости 4U 0115+63, V 0332+53, SMC X-2, GRO J1750−27 и M82 X-2, а также возможность оценки магнитного поля по пороговой светимости перехода. Сопоставление такой оценки с другими способами измерения поля используется для обсуждения недипольных компонент у SMC X-3 и Swift J0243.6+6124. Кроме того, исследование 4U 0115+63 в спокойном состоянии позволяет разграничить аккреционное излучение и тепловое остывание нейтронной звезды.

В четвёртой главе по результатам длительного мониторинга GRO J1008−57 предложена модель устойчивой аккреции из холодного, частично рекомбинированного диска. Получены условия, при которых диск переходит в холодное состояние раньше, чем центробежный барьер прекращает аккрецию, и проведено сопоставление модели с выборкой Be-рентгеновских пульсаров. Эта часть работы особенно ценна тем, что предложенная физическая схема даёт наблюдаемые критерии и допускает проверку на новых объектах.

Пятая глава посвящена спектрам рентгеновских пульсаров при низких темпах аккреции. На примере GX 304−1 и ряда других источников показан переход от обычного пульсарного континуума к спектру с двумя широкими компонентами. Развита физическая модель, в которой мягкая и жёсткая составляющие связаны с различными группами затравочных фотонов и их переработкой в атмосфере замагниченной нейтронной звезды. Полученные результаты формируют основу для перехода от чисто феноменологических аппроксимаций к физическим моделям состояния низкой светимости.

В шестой главе выполнен систематический анализ поляриметрических наблюдений рентгеновских пульсаров обсерваторией IXPE. С использованием модели вращающегося вектора получены ограничения на геометрические параметры двенадцати систем; показано, что X Persei и GRO J1008−57 близки к ортогональным ротаторам; исследована возможная прецессия Her X-1. Установлена систематически низкая степень линейной поляризации по сравнению с простыми теоретическими предсказаниями. Для RX J0440.9+4431 и Swift J0243.6+6124 выявлена дополнительная практически фазонезависимая поляризованная компонента. Эта глава относится к наиболее новым и сильным частям диссертации и демонстрирует возможности поляриметрии как самостоятельного метода диагностики геометрии аккрецирующих пульсаров.

В заключении обобщены полученные результаты и сформулированы девять положений, выносимых на защиту.

Научная новизна и наиболее значимые результаты. Диссертация содержит крупную совокупность оригинальных результатов. К наиболее значимым из них следует отнести:

1. Получение наблюдательной оценки критической светимости V 0332+53 на основе эволюции циклотронной линии и развитие метода диагностики смены режима аккреции по зависимости ее энергии от светимости.
2. Развитие метода исследования масштаба магнитосферы, свойств внутреннего аккреционного диска и возможной сложной топологии магнитного поля по спектрам мощности рентгеновского излучения.
3. Систематическое исследование переходов в режим пропеллера у нескольких рентгеновских пульсаров и использование пороговой светимости как независимого средства оценки магнитного поля.

4. Построение модели устойчивой аккреции из холодного рекомбинированного диска, объясняющей длительную продолжительность состояний низкой светимости части Ве-рентгеновских пульсаров и дающей проверяемые критерии реализации такого режима.
5. Обнаружение перехода транзиентных пульсаров к характерному двухкомпонентному спектру при низкой светимости, систематизация этого спектрального состояния и развитие физической модели его формирования.
6. Получение по данным IXPE модельных ограничений на геометрию значительной выборки рентгеновских пульсаров, установление систематически низкой линейной поляризации и обнаружение дополнительной непульсирующей поляризованной компоненты в двух системах.

Новизна работы состоит не только в исследовании новых наблюдательных состояний и объектов, но и в объединении нескольких независимых диагностик. В ряде случаев расхождение оценок, полученных разными методами, само становится источником информации о структуре магнитного поля или геометрии аккреционного потока. Совокупность представленных результатов существенно расширяет возможности наблюдательного исследования областей, которые не могут быть непосредственно разрешены современными телескопами.

Личный вклад соискателя. С. С. Цыганков выступил инициатором и руководителем рассматриваемого цикла исследований, формулировал задачи отдельных этапов, руководил рядом наблюдательных программ на NuSTAR, Swift, NICER, XMM-Newton, INTEGRAL и IXPE, участвовал в анализе данных международных коллабораций и лично выполнял физическую интерпретацию результатов. В работах, выполненных учениками и молодыми исследователями под его руководством, вклад соискателя включал постановку задач, координацию, проверку результатов и подготовку публикаций. Из более чем 250 статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах в диссертацию включены 33 работы. Личный вклад соответствует уровню докторской диссертации.

Степень обоснованности и достоверности результатов. Достоверность основных результатов обеспечивается использованием данных ведущих рентгеновских обсерваторий, применением общепринятых процедур обработки и статистического анализа, а также сопоставлением независимых спектральных, временных и поляриметрических признаков. Многие выводы проверены на нескольких источниках или в нескольких эпохах наблюдений. Результаты прошли широкую апробацию на российских

и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно отражает структуру и содержание диссертации. Использованные результаты других исследователей сопровождаются ссылками на источники.

Научная значимость и рекомендации по использованию результатов. Полученные результаты имеют существенное значение для физики аккрецирующих нейтронных звёзд и астрофизики высоких энергий. Они уточняют границы режимов дисковой аккреции, расширяют набор способов оценки магнитного поля, дают наблюдательные ограничения на недипольные компоненты поля и геометрию областей энерговыделения, а также создают основу для интерпретации новых поляриметрических данных.

Предложенные методы и результаты могут использоваться в ИКИ РАН, ФИАН, ИНАСАН, ФТИ, ГАИШ МГУ и других организациях, занимающихся физикой компактных объектов; при планировании и анализе наблюдений действующих и будущих рентгеновских миссий; при разработке физических моделей переноса излучения в сильном магнитном поле; в специальных курсах по астрофизике высоких энергий и методам анализа астрономических данных.

Замечания и вопросы. Высокая оценка диссертации не исключает ряда содержательных и редакционно-методических замечаний.

1) Ряд выводов мог бы быть смягчен. Цыганков С.С. использует выражения «прямое определение», «впервые измерено». Например, в оригинальной работе (Doroshenko et al., MNRAS, 466, 2143, 2017) при определении критической светимости V 0332+53 отмечены большие ошибки в определении положительных наклонов зависимости, а статистическая значимость характеризуется как невысокая и требующая проверки. В диссертации выводы ужесточены и кажутся излишне категоричными.

При проверке работы пяти систем в режиме пропеллера надежное доказательство этого режима, есть, по-видимому, только для двух систем (4U 0115+63, V 0332+53), а для остальных правильнее было бы писать кандидаты на переход в режим пропеллера.

Полученные по данным IXPE ограничения являются одним из важнейших результатов работы, но они основаны на модели вращающегося вектора, предположениях о поляризационных модах и учёте дополнительных компонент. Термин «прямое измерение геометрии» следует использовать с оговоркой: непосредственно измеряются фазовые

зависимости параметров Стокса, а геометрические углы восстанавливаются в рамках модели.

2) Развёрнутый раздел о личном вкладе имеется в автореферате, но отсутствует как самостоятельный раздел диссертации. Для большого числа коллективных, включая коллаборационные, публикаций было бы правильнее связать личный вклад соискателя с результатами каждой главы.

3) В диссертации встречаются опечатки, стилистически неудачно выраженные мысли и другие ошибки в оформлении. Например:

«…что ожидается, что…» - стр.27;

«магнитных поле» - (полей) – стр.89;

«аккретирующее» - (аккрецирующее) – стр.99;

«несколько на» - (несколько единиц на) – стр.127;

«врящающихся» - (вращающихся) – стр.162;

«автроры» - (авторы) – стр.168;

«двойная система в Малом Магеллановом Облаке, которая была впервые обнаружена в работе [386]» - (полагаю, что система все-таки была обнаружена не в работе, а в наблюдениях. Правильный текст должен быть «первая публикация, о которой была в работе [386]») – стр.174;

На рис.2.5 синяя пунктирная линия обозначает частоту излома. Вписывание, которое показывает излом не приведено, а на взгляд этот излом не очевиден;

В формуле 6.2, по-видимому, потеряна двойка;

На некоторых рисунках (например, 6.18) часть подписей к шкалам нечитаемые.

Диссертационная работа С. С. Цыганкова «Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров» является завершённым научно-квалификационным исследованием, обладающим внутренним единством и содержащим совокупность новых научных результатов и положений, выдвинутых автором для публичной защиты. Работа решает важную научную проблему наблюдательной диагностики структуры магнитного поля, геометрии областей энерговыделения и режимов аккреции рентгеновских пульсаров. По масштабу, новизне и научной значимости совокупность результатов может быть квалифицирована как крупное научное достижение в области астрофизики аккрецирующих нейтронных звёзд.

Основные результаты достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли широкую апробацию. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Доклад С.С. Цыганкова был заслушан, обсуждён и одобрен на семинаре АКЦ ФИАН 12 октября 2026 года. Диссертация Сергея Сергеевича Цыганкова «Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «1.3.1 — физика космоса, астрономия».

Отзыв подготовлен доктором физ.-мат. наук, главным научным сотрудником ПРАО АКЦ ФИАН Сергеем Анатольевичем Тюльбашевым.

Главный научный сотрудник ПРАО АКЦ ФИАН, д.ф.-м.н. С.А. Тюльбашев

Руководитель АКЦ ФИАН, д.ф.-м.н. С.Ф. Лихачев

19.10.2026

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес: 119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Телефон: 8 (499) 132-65-54

Электронная почта: office@lebedev.ru

Руководитель ведущей организации: Колачевский Николай Николаевич