

На правах рукописи



ЦЫГАНКОВ Сергей Сергеевич

**НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА
ГЕОМЕТРИИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ
И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РЕНТГЕНОВСКИХ
ПУЛЬСАРОВ**

Специальность:

1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный консультант: **Лутовинов Александр Анатольевич**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент
РАН, ИКИ РАН, заместитель директора по научной
работе

Официальные оппоненты: **Бисикало Дмитрий Валерьевич**
доктор физико-математических наук, академик РАН,
заместитель научного руководителя — главный учёный
секретарь Национального центра физики и математики,
главный научный сотрудник Института астрономии
Российской академии наук (ИНАСАН)

Кочаровский Владимир Владиленович
доктор физико-математических наук, академик РАН,
заведующий отделом астрофизики и физики космической
плазмы Федерального исследовательского центра
Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук (ИПФ РАН)

Черепашук Анатолий Михайлович доктор физико-
математических наук, академик РАН, заведующий
отделом звездной астрофизики и научный руководитель
Государственного астрономического института
имени П. К. Штернберга Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН)

Защита диссертации состоится **20 ноября 2026 г. в 11 ч 00 мин**
на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 в конференц-зале ИКИ РАН
по адресу: Москва, Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд А2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/tsygankov.htm>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32,
ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.481.01
кандидат физико-математических наук



А. Ю. Ткаченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование физики аккрецирующих нейтронных звезд с сильными магнитными полями на протяжении многих десятилетий остается одним из наиболее приоритетных направлений рентгеновской астрофизики. Нейтронные звезды представляют собой уникальные природные лаборатории, где материя находится в условиях экстремальной плотности, сверхсильной гравитации и магнитных полей, достигающих значений 10^{12} – 10^{14} Гс. Понимание процессов, происходящих в таких системах, имеет фундаментальное значение не только для астрофизики, но и для физики элементарных частиц, квантовой электродинамики и физики плазмы, поскольку позволяет тестировать поведение вещества и излучения в режимах, недостижимых в земных лабораторных условиях.

Несмотря на более чем полувековую историю изучения рентгеновских пульсаров, в этой области сохраняется ряд фундаментальных противоречий и нерешенных вопросов. Одной из наиболее острых проблем является отсутствие глубокого физического описания формы энергетического спектра этих объектов. На протяжении последних пятидесяти лет в практике анализа данных доминирует так называемая «стандартная» или классическая пульсарная спектральная модель — феноменологическое описание в виде степенного закона с экспоненциальным завалом в области высоких энергий. Однако, несмотря на то, что эта модель удовлетворительно описывает большинство наблюдательных данных, она остается чисто математической аппроксимацией, лишенной глубокого физического обоснования. Мы до сих пор не имеем полноценной самосогласованной теории, которая могла бы предсказать форму континуума, исходя из первых принципов взаимодействия плазмы с излучением в сильном магнитном поле. Эта ситуация подчеркивает критическую необходимость в новых методах диагностики, которые позволили бы связать наблюдаемые макроскопические параметры с микрофизикой процессов в излучающих областях.

Аналогичная ситуация сложилась и в области интерпретации временных характеристик излучения. Профили импульса рентгеновских пульсаров демонстрируют поразительное разнообразие и сложность, меняясь в зависимости от светимости источника и энергетического диапазона. Попытки теоретически объяснить структуру этих профилей предпринимаются многие десятилетия, однако до сих пор не увенчались окончательным успехом. Проблема здесь носит фундаментальный характер: профиль импульса напрямую содержит в себе информацию о физике переноса излучения в сильно замагниченной плазме, где сечения взаимодействия фотонов с веществом критически зависят от направления распространения и состояния поляризации. Без точного знания геометрии излучающей области

и ориентации магнитной оси относительно наблюдателя расшифровка этой информации остается практически невозможной задачей.

В связи с этим измерение структуры магнитного поля нейтронных звезд приобретает особую актуальность. Это необходимо не только для построения моделей излучающих областей, но и для понимания фундаментальных вопросов формирования и эволюции магнитных полей в нейтронных звездах в целом. Мы сталкиваемся с необходимостью выяснить, как начальное магнитное поле нейтронной звезды трансформируется в процессе аккреции, какую роль играют мультиполярные компоненты поля вблизи поверхности и как они влияют на динамику падения вещества. Исследование крупномасштабной структуры поля и его локальных неоднородностей является ключом к пониманию формирования наблюдаемых свойств сильно замагниченных нейтронных звезд.

Центральным звеном в решении этих проблем становится определение конфигурации излучающих зон — «горячих пятен» или «аккреционных колонок». Переход между этими режимами определяется достижением критической светимости, при которой давление излучения становится достаточным для остановки падающего вещества в радиационной ударной волне. Экспериментальное определение этого порога и изучение его зависимости от параметров системы (например, от величины магнитного поля) — актуальнейшая задача, позволяющая напрямую зондировать структуру аккреционного потока. Особую остроту этот вопрос приобрел с открытием пульсирующих ультраярких рентгеновских источников PULX (*англ.* Pulsating Ultraluminous X-ray sources), светимость которых превышает эддингтоновский предел для нейтронной звезды в десятки и сотни раз, что ставит под сомнение классические модели аккреции и требует пересмотра представлений о топологии поля.

Важнейшим прорывом последних лет, определившим новый этап в актуальности темы диссертации, стало появление прецизионной рентгеновской поляриметрии. Именно поляризационные измерения становятся тем недостающим звеном, которое позволяет снять вырожденность между геометрическими параметрами системы и физическими характеристиками излучения. Поляриметрия дает возможность напрямую измерить геометрические параметры системы: углы наклона оси вращения и магнитного диполя к лучу зрения, что ранее было доступно лишь косвенным и часто неоднозначным методам. Информация о поляризации излучения позволяет разделить эффекты, связанные с геометрической конфигурацией системы, и эффекты, обусловленные физикой взаимодействия излучения с веществом в сильном поле. Таким образом, комплексное использование спектральных, временных и поляриметрических данных, реализованное в данной работе, представляет собой наиболее современный и перспективный подход к диагностике экстремальных физических условий вблизи поверхности нейтронных звезд.

Актуальность работы также обусловлена необходимостью систематизации и интерпретации колоссального объема данных, накопленного современными обсерваториями (такими как NuSTAR (*англ.* Nuclear Spec-

troscopic Telescope Array), Swift, INTEGRAL (*англ.* INTErNational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), NICER (*англ.* Neutron star Interior Composition Explorer), XMM-Newton (*англ.* X-ray Multi-Mirror Mission), Chandra, RXTE (*англ.* Rossi X-ray Timing Explorer), «Спектр-РГ» и IXPE (*англ.* Rossi X-ray Timing Explorer)), в рамках единой физической парадигмы. Развитие методов наблюдательной диагностики, представленное в диссертации, позволяет не только уточнить параметры конкретных источников, но и заложить основу для создания физически обоснованных моделей нового поколения, способных прийти на смену упрощенным феноменологическим подходам прошлых десятилетий. Это имеет решающее значение для прогресса всей рентгеновской астрономии и понимания фундаментальных законов природы в условиях сверхсильных магнитных полей.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является определение физических механизмов формирования рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд и получение количественных ограничений на геометрию областей энерговыделения, структуру магнитного поля и режимы аккреции на основе комплексного анализа спектральных характеристик излучения, его временной переменности и поляризационных свойств в широком диапазоне энергий и темпов аккреции вещества.

Методы исследования

Методологическую основу диссертационной работы составляет комплексный подход к анализу наблюдательных данных, полученных с помощью ведущих мировых рентгеновских обсерваторий последних десятилетий. Основной массив данных был получен в ходе реализации собственных наблюдательных программ автора и анализа архивных данных космических обсерваторий NuSTAR, Swift, INTEGRAL, XMM-Newton, NICER, RXTE, Chandra, «Спектр-РГ» и IXPE. Использование данных обсерватории Gaia позволило существенно уточнить расстояния до исследуемых систем, что критически важно для корректного определения абсолютной светимости источников.

В работе применен широкий спектр методов спектрального анализа, включая широкополосную спектроскопию в диапазоне от долей до сотен килоэлектронвольт. Для описания энергетических спектров использовались как стандартные феноменологические модели, так и физические модели, предложенные в диссертации и позволяющие получить информацию о параметрах плазмы в излучающей области и свойствах межзвездной среды. Особое внимание уделялось анализу линий циклотронного поглощения, в частности эволюции их параметров в зависимости от светимости.

Для изучения структуры магнитного поля и параметров аккреционного диска применялся анализ аperiодической переменности рентгеновского потока, основанный на расчете и аппроксимации спектров мощности. Это позволило выявить вклад недипольных компонент поля и диагностировать переходы системы в режим «пропеллера» при низких темпах аккреции.

Принципиально новым элементом методологии стало использование данных рентгеновской поляриметрической обсерватории IXPE. Анализ поляризационных свойств проводился с использованием формализма параметров Стокса (I , Q , U), а для определения геометрических параметров (угла наклона оси вращения и магнитного диполя) применялась модель вращающегося вектора (RVM). Комплексный анализ спектральных, временных и поляриметрических характеристик существенно снижает модельную вырожденность и создает основу для построения самосогласованной физической картины процессов, протекающих вблизи поверхности нейтронных звезд в различных режимах аккреции.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые результаты, расширяющие представления о механизмах формирования рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд и диагностике геометрии областей энерговыделения. Основные элементы научной новизны заключаются в следующем:

- Проведено комплексное исследование спектральных, временных и поляризационных характеристик аккрецирующих рентгеновских пульсаров, основанное на систематическом анализе наблюдений современных космических обсерваторий. В отличие от большинства предыдущих работ, в которых указанные характеристики рассматривались раздельно, в диссертации реализован единый подход, позволяющий сопоставлять результаты различных методов диагностики и формировать согласованную физическую интерпретацию наблюдаемых свойств источников.
 - Получены новые количественные ограничения на параметры аккреционных режимов и характеристики формирования спектров излучения при различных уровнях светимости источников. Проведен анализ эволюции спектральных параметров и линии циклотронного поглощения, позволивший уточнить связь наблюдаемых характеристик излучения с физическими условиями и геометрией излучающих областей.
 - Развита методика анализа временных характеристик излучения аккрецирующих пульсаров и получены новые ограничения на конфигурацию магнитного поля нейтронных звезд и физических условий в аккреционном диске.
- С использованием данных рентгеновской поляриметрии впервые проведено систематическое исследование фазовой зависимости параметров поляризации аккрецирующих пульсаров, позволившее напрямую диагностировать ориентацию крупномасштабного магнитного поля нейтронной звезды относительно наблюдателя.
- Впервые выявлено наличие непульсирующей поляризованной компоненты рентгеновского излучения, интерпретируемой как результат рассеяния излучения в протяженных аккреционных структурах. Данный результат указывает на многокомпонентную природу поля-

ризационного сигнала и вводит дополнительный геометрический масштаб в интерпретацию наблюдений.

- Показано, что энергетическая зависимость степени и угла поляризации несет информацию о механизмах формирования излучения и может использоваться как независимый инструмент разделения вкладов различных физических процессов, дополняющий спектральный анализ.

Совокупность полученных результатов формирует основу для дальнейшего совместного использования методов рентгеновской поляриметрии, спектроскопии и временного анализа в качестве полноценного диагностического метода исследования аккрецирующих нейтронных звезд.

Научная и практическая ценность работы

Научная значимость диссертационного исследования заключается в создании методологической базы для диагностики физических условий в экстремальных условиях вблизи поверхности нейтронных звезд. Результаты работы вносят значительный вклад в понимание физики взаимодействия замагниченной плазмы с мощными полями излучения, что имеет ключевое значение для развития теории аккреции.

В работе реализован комплексный подход к анализу наблюдений, объединяющий спектральные, временные и поляризационные методы исследования. Такой подход позволил сформировать согласованную физическую картину процессов аккреции в условиях сильных магнитных полей и показать диагностические возможности совместного использования различных типов наблюдений. Полученные результаты способствуют развитию теоретических моделей переноса излучения в замагниченной плазме, формирования спектров излучения, процессов нагрева и остывания коры нейтронной звезды, формирования и эволюции магнитного поля нейтронной звезды, переходов аккреционного диска между различными физическими состояниями, а также его взаимодействия с магнитосферой нейтронной звезды.

Научная значимость работы также связана с развитием рентгеновской поляриметрии как нового направления наблюдательной астрофизики. Продемонстрирована возможность использования фазово-зависимых поляризационных измерений для определения ориентации дипольной компоненты магнитного поля нейтронной звезды относительно наблюдателя. Полученные результаты создают основу для дальнейшего применения поляриметрических наблюдений в исследованиях компактных объектов и служат вкладом в интерпретацию данных современных и будущих космических миссий. Выявление непульсирующей поляризованной компоненты излучения и установление ее связи с рассеянием в аккреционных структурах расширяет понимание механизмов формирования наблюдаемого сигнала и вводит дополнительные ограничения на геометрию и пространственное распределение вещества вблизи источника. Эти результаты имеют фундаментальное значение для дальнейшего развития моделей аккреции в двойных системах.

Практическая ценность работы заключается в разработке и применении методов обработки и анализа наблюдательных данных, которые могут использоваться при интерпретации результатов текущих и будущих рентгеновских наблюдений. Полученные алгоритмы и процедуры анализа спектральных, временных и поляризационных характеристик применимы в широком круге задач астрофизики высоких энергий. Результаты диссертации используются при подготовке и проведении научных исследований в области астрофизики компактных объектов, а также в образовательной деятельности при чтении курсов, посвященных методам анализа наблюдательных данных и физике нейтронных звезд. Полученные выводы представляют интерес для специалистов, работающих в области теоретической и наблюдательной астрофизики, и могут служить основой для дальнейших исследований процессов аккреции и взаимодействия излучения с веществом в экстремальных физических условиях.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты получены либо автором лично, либо под его непосредственным научным руководством, либо при его определяющем участии в составе международных исследовательских групп. Личный вклад автора заключается в следующем:

- *Научное руководство и постановка задач.* Автор выступил инициатором и руководителем представленного в работе цикла исследований. Им лично сформулированы цели и задачи всех этапов работы. Часть результатов, вошедших в диссертацию, получена под научным руководством автора его аспирантами и молодыми исследователями; при этом автор осуществлял постановку задач, координацию исследований и ключевую интерпретацию полученных данных.
- *Роль в международных проектах.* В ряде работ, выполненных в составе широких международных коллабораций (в частности, в рамках миссии IXPE), автор принимал ключевое участие в планировании наблюдений, а также в подготовке публикаций, касающихся физики аккрецирующих нейтронных звезд. Личный вклад автора в этих работах заключался в проведении независимого анализа и интерпретации полученных результатов.
- *Сбор данных и интерпретация результатов.* Автор являлся руководителем серии наблюдательных программ на обсерваториях NuSTAR, Swift, NICER, XMM-Newton, INTEGRAL и IXPE. Анализ данных и физическая интерпретация всех представленных в диссертации результатов, а также формулировка положений, выносимых на защиту, выполнены автором лично.
- *Подготовка публикаций.* Автор принимал ведущее участие в написании и редактировании всех статей по теме диссертации. В работах, где первыми авторами выступали ученики автора, его вклад заключался в общей координации исследований, верификации результатов и подготовке итоговых текстов для публикации в высокорейтинговых рецензируемых журналах.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на **семинарах** в ИКИ РАН, Дублинском городском университете (DCU (*англ.* Dublin City University), Дублин, Ирландия, 2025 г.), Институте физики высоких энергий (ИНЕР (*англ.* Institute of High Energy Physics), Пекин, Китай, 2025 г.), Университете Турку (*фин.* Turun yliopisto, Финляндия, 2025 г.), Институте Макса Планка для радиоастрономии (MPIfR (*нем.* Max-Planck-Institut für Radioastronomie), Бонн, Германия, 2024 г.), Университете Тель-Авива (TAU (*англ.* Tel Aviv University), Израиль, 2020 и 2023 гг.), Университете имени Бен-Гуриона ((*англ.* Ben-Gurion University), Бен Шева, Израиль, 2023 г.), Еврейском Университете в Иерусалиме (HUJI (Ha-Universita ha-Ivrit bi-Yerushalayim), Израиль, 2023 и 2024 гг.), Тюбингенском университете имени Эберхарда и Карла ((*нем.* Eberhard Karls Universität Tübingen), Германия, 2016, 2019 и 2023 гг.), Саутгемптонском университете ((*англ.* University of Southampton), Великобритания, 2022 г.), Университете Лейдена (Нидерланды, 2019), Стокгольмском университете ((*англ.* Stockholm University), Швеция, 2017 г.), а также международных научных **конференциях** «Физика нейтронных звезд» (Санкт-Петербург, Россия, 2017, 2023, 2026 гг.), Всероссийских конференциях «Астрофизика высоких энергий: сегодня и завтра» (Москва, 2015, 2016, 2017, 2023 гг.), “Continuous Gravitational Waves and Neutron Stars” (Ганновер, Германия, 2024 г.), “Unveiling the Dynamic and Energetic Universe with Insight-HXMT for Six Years and Beyond” (Жухай, Китай, 2024 гг.), “INTEGRAL 20 years” (Дармштадт, Германия, 2022 г.), “Tuorla-Tartu annual meeting 2021” (Турку, Финляндия, 2021 г.), EWASS “From X-ray pulsars to pulsating ULXs: Accretion onto highly magnetized neutron stars” (Лион, Франция, 2019 г.), “X-ray topics in Astronomy: from history to the future” (Тюбинген, Германия, 2019 г.), “Stars, planets and their magnetic fields” (Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.), “Time for accretion” (Сигтуна, Швеция, 2018 г.), “Astronomers’ Days” (Куусамо, Финляндия, 2018 г.), “Physical Days 2018” (Турку, Финляндия, 2018 г.), “Be/X-ray binary workshop (BEXRB2017)” (Ираклион, Греция, 2017 г.), “Joint Workshop on Compact Objects (JWCO)” (Стамбул, Турция, 2017 г.), “Gamma-Ray Astrophysics in Multi-Wavelength Perspective” (Амстердам, Нидерланды, 2016 г.), “Nordita workshop on accretion onto magnetized neutron stars” (Стокгольм, Швеция, 2016 г.), “The New High Energy Sky after a Decade of Discoveries” (Рим, Италия, 2015 г.), “40th COSPAR General Assembly” (Москва, Россия, 2014 г.), “European Week of Astronomy and Space Science” (Турку, Финляндия, 2013 г.).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации 221 страница текста с 85 рисунками и 15 таблицами. Список литературы содержит 550 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию физических процессов формирования рентгеновского излучения аккрецирующих сильно замагниченных нейтронных звезд в рентгеновских пульсарах на основе анализа наблюдений космических обсерваторий и разработке методов диагностики геометрии излучающих областей и структуры магнитных полей таких объектов.

Во введении диссертации представлен обзор современного состояния исследований аккрецирующих нейтронных звезд, обоснована актуальность изучения процессов взаимодействия вещества с экстремально сильными магнитными полями.

Первая глава посвящена исследованию конфигурации областей формирования рентгеновского излучения в аккрецирующих рентгеновских пульсарах и измерению критической светимости, определяющей переход между различными режимами торможения аккреционного потока.

Наличие циклотронных линий поглощения в спектрах рентгеновских пульсаров предоставляет наиболее модельно-независимый метод оценки напряженности магнитного поля в областях генерации излучения вблизи поверхности нейтронной звезды. Однако структура этих областей и механизмы формирования циклотронных особенностей остаются недостаточно определенными. Ситуация существенно усложняется при изменении темпа аккреции, которое приводит к изменению светимости и, следовательно, к перераспределению радиационного давления, действующего на аккреционный поток.

При достижении некоторой характерной светимости давление излучения становится достаточным для остановки вещества над поверхностью нейтронной звезды, что приводит к формированию радиационно доминированной аккреционной колонки. Эта светимость определяется как критическая и зависит от параметров магнитного поля, геометрии канала аккреции и свойств рассеяния фотонов в сильно замагниченной плазме. Изменение геометрии эмиссионной области при переходе через критическую светимость проявляется наблюдательно через изменение зависимости энергии циклотронной линии от светимости источника. Теоретически ожидается, что в докритическом режиме энергия линии возрастает с ростом светимости, тогда как в сверхкритическом режиме отмечается обратная зависимость, обусловленная изменением высоты области формирования излучения.

В главе выполнено исследование этой зависимости для рентгеновского пульсара V 0332+53 на основе широкополосных наблюдений, проведенных в ходе гигантской вспышки 2015 г. и последующих наблюдений при более низкой светимости. Были использованы несколько наблюдений космической обсерватории NuSTAR, дополненные мониторинговыми данными Swift/BAT (*англ.* Burst Alert Telescope), что позволило охватить широкий диапазон светимости источника. Спектральный анализ пока-

зал наличие выраженной антикорреляции энергии циклотронной линии с потоком при высокой светимости, согласующейся с изменением высоты аккреционной колонки. Однако при переходе к низким значениям светимости обнаружено нарушение этой зависимости: энергия линии перестает уменьшаться и демонстрирует положительную корреляцию со светимостью (рис. 1). Наблюдаемое поведение соответствует ожидаемому переходу между режимами аккреции и указывает на достижение критической светимости. Аппроксимация полученных зависимостей позволила впервые измерить значение критической светимости в рентгеновских пульсарах, которое составило $L_{crit} \sim 0,7 \cdot 10^{37}$ эрг/с, что согласуется с теоретическими оценками условий формирования аккреционной колонки.

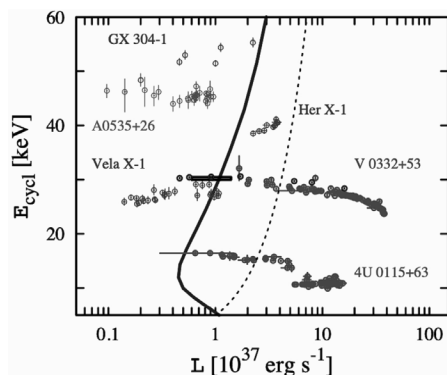


Рис. 1. Энергия циклотронной линии как функция светимости для источников, для которых в литературе сообщалось либо о корреляции, либо об антикорреляции. Темные кружки соответствуют данным обсерватории NuSTAR для транзитного пульсара V 0332+53; черный прямоугольник — измеренному значению критической светимости; сплошная кривая — теоретическому предсказанию для критической светимости из работы (Муштуков и др., 2015), пунктирная — из работы (Бекер и др., 2012)

Таким образом, результаты главы демонстрируют, что анализ зависимости циклотронной энергии от светимости предоставляет собой эффективный инструмент диагностики структуры аккреционной колонки и позволяет непосредственно измерять критическую светимость нейтронной звезды. Полученные результаты подтверждают теоретические представления о переходе между режимами торможения аккреционного потока и дают новые ограничения на геометрию областей формирования рентгеновского излучения.

Во второй главе диссертации описывается возможность использования аperiодической переменности рентгеновского излучения для диагностики структуры магнитного поля нейтронных звезд и свойств внутренней области аккреционного диска.

Апериодическая переменность является фундаментальным проявлением нестационарности аккреционного потока и формируется на различных радиусах диска. В аккрецирующих системах с сильным магнитным полем внутренний край диска определяется взаимодействием с магнитосферой компактного объекта, что приводит к характерным особенностям спектров мощности — прежде всего появлению излома на частоте, связанной с динамическими масштабами вблизи магнитосферного радиуса. Наблюдения показывают, что такие изломы присутствуют у широкого класса рентгеновских пульсаторов и позволяют использовать их как диагностический инструмент для изучения структуры магнитного поля и аккреционного потока.

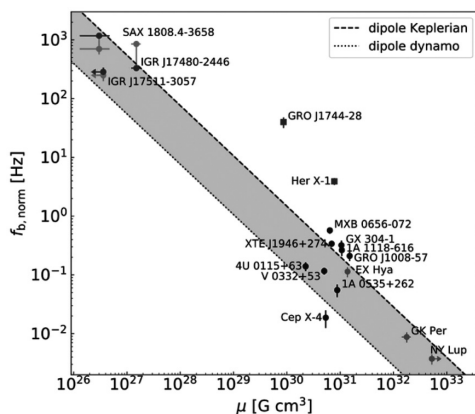


Рис. 2. Частота изломов f_b в спектрах мощности пульсаторов разных классов, построенная в зависимости от их магнитных моментов μ . Различные символы обозначают различные типы объектов: кружки соответствуют миллисекундным пульсарам, рентгеновским пульсарам и промежуточным полярам. Квадраты — это источники, не вписывающиеся в рамки простого магнитосферного обрезания диска дипольным магнитным полем. Серая полоса показывает теоретическое предсказание для вероятного диапазона частот изломов: верхний предел (штриховая линия) — это кеплеровская частота на магнитосферном радиусе для чисто дипольного поля. Нижний предел (пунктирная линия) показывает частоту динамо, оцененную как одна десятая от кеплеровской частоты для дипольной конфигурации поля

В работе разработан и применен метод интерпретации спектров мощности, позволяющий получать независимые ограничения на геометрию магнитосферы и вклад недипольных компонент поля. Показано, что форма спектра мощности чувствительна к положению внутреннего радиуса диска и, следовательно, к закону убывания магнитного поля с расстоянием. Анализ ряда источников продемонстрировал, что предположение о чисто дипольной структуре поля не всегда согласуется с наблюдениями (рис. 2). В частности, при применении метода к рентгеновским пульсарам Her X-1 и GRO J1744–28 выявлены признаки сложной конфигурации магнитного

поля с существенной квадрупольной компонентой. Наличие такой компоненты приводит к уменьшению эффективного магнитосферного радиуса по сравнению с дипольным случаем.

Дальнейший анализ показал, что отклонение формы спектра мощности GRO J1744–28 от стандартного ломаного степенного закона свидетельствует об измененной структуре внутренней области диска. Это согласуется со сценарием, в котором при высокой светимости диск переходит в режим доминирования радиационного давления. Независимое подтверждение такого перехода получено из зависимости частоты излома спектра мощности от светимости: измеренная зависимость описывается степенным законом с индексом $\gamma = 0,21 \pm 0,02$, что существенно отличается от ожиданий для стандартного тонкого диска и указывает на изменение динамики внутренней области аккреционного потока.

Таким образом, временной анализ позволил не только ограничить структуру магнитного поля, но и получить информацию о физических параметрах аккреционного диска. Показано, что спектры мощности представляются независимым инструментом исследования как напряженности и конфигурации поля, так и режима аккреции во внутренних областях диска.

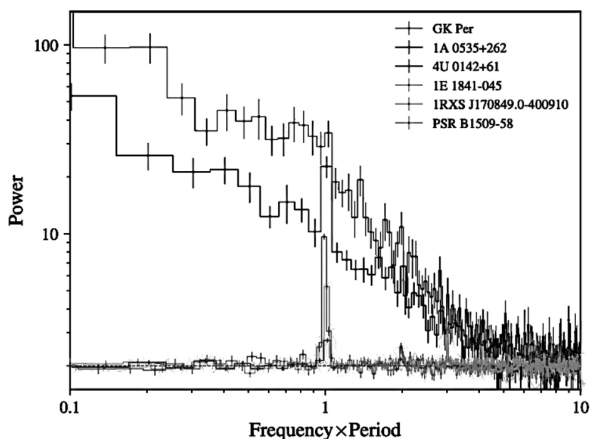


Рис. 3. Спектры мощности замагниченных компактных объектов разной природы: аномальный рентгеновский пульсар 4U 0142+61, магнетару 1RXS J170849.0–400910 и 1E 1841–045, яркий радиопульсар PSR B1509–58, аккрецирующий рентгеновский пульсар A 0535+61 и промежуточный поляр GK Per. Частота выражена в единицах соответствующей частоты вращения объектов, а мощность нормализована таким образом, что ожидаемый уровень белого шума равен 2

В последней части главы приводится разработанный метод использования спектров мощности для проверки природы энерговыделения в рентгеновских источниках. Показано, что наличие красного шума выступает характерным признаком аккреционного происхождения излучения. Применение данного критерия к магнетарам выявило отсутствие красного

шума в их спектрах мощности, что стало сильным независимым аргументом против аккреционного механизма формирования их устойчивого рентгеновского излучения (рис. 3). Данный метод так же позволил исключить аккрецию в спокойном состоянии транзиентного рентгеновского пульсара 4U 0115+63.

Третья глава диссертации посвящена исследованию перехода аккрецирующих рентгеновских пульсаров в режим пропеллера и использованию наблюдаемых переходов для определения напряженности магнитного поля нейтронных звезд и проверки моделей взаимодействия диска с магнитосферой. Режим пропеллера реализуется в случае, когда магнитосферный радиус превышает коротационный радиус, и центробежные силы препятствуют дальнейшему падению вещества на поверхность звезды. В этом состоянии аккреция резко подавляется, что приводит к скачкообразному уменьшению светимости источника. Таким образом, наблюдаемая светимость перехода непосредственно связана с магнитным моментом нейтронной звезды и может использоваться для его оценки.

В главе выполнен систематический анализ транзиентных рентгеновских пульсаров, демонстрирующих резкое падение потока на финальных стадиях вспышек излучения. Для ряда источников показано, что снижение светимости носит скачкообразный характер и достигает одного-двух порядков величины, что согласуется с теоретическими ожиданиями для перехода в режим пропеллера. Подробный временной анализ позволил установить, что в низком состоянии существенно подавляется стохастическая переменность, характерная для аккреционного режима, а спектральные свойства излучения меняются таким образом, что их невозможно объяснить продолжающейся аккрецией. В частности, для источника 4U 0115+63 показано, что в спокойном состоянии спектр мощности лишен красного шума, что становится прямым указанием на прекращение притока вещества к поверхности нейтронной звезды. Тем самым получено одно из наиболее убедительных наблюдательных подтверждений существования пропеллерного механизма подавления аккреции.

Аналогичные переходы выявлены и проанализированы для пульсаров V 0332+53, SMC X-2 и GRO J1750–27. Для каждого из этих источников определена светимость перехода в режим пропеллера и на ее основе вычислена напряженность магнитного поля нейтронной звезды. Полученные значения в ряде случаев хорошо согласуются с оценками, основанными на измерениях циклотронных линий, что подтверждает корректность используемой методики (рис. 4). В других случаях выявлены расхождения, указывающие на возможное отклонение конфигурации магнитного поля от чисто дипольной.

Особое внимание в главе уделено ультраярким транзиентным рентгеновским пульсарам, таким как SMC X-3 и Swift J0243.6+6124. Показано, что наблюдаемая светимость перехода в режим пропеллера для данных объектов приводит к оценке магнитного момента, не согласующейся с предположением о простой дипольной конфигурации поля. Это свидетельствует

о наличии более сложной структуры магнитосферы с существенной ролью недипольных компонент.

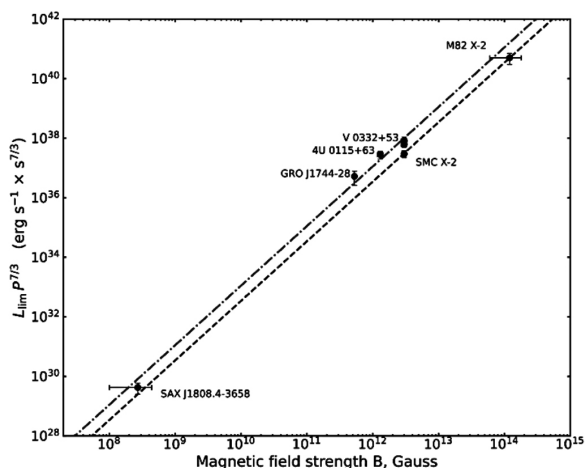


Рис. 4. Наблюдаемая корреляция между значением магнитного поля, определенного из предельной светимости перехода в режим пропеллера, и напряженностью магнитного поля B на поверхности нейтронной звезды (независимые измерения) для шести рентгеновских пульсаров разной природы. Пунктирная и штрих-пунктирная линии показывают теоретическую зависимость для двух разных глубин проникновения диска в магнитосферу ($k = 0,5$ и $k = 0,7$ соответственно).

В совокупности результаты главы демонстрируют, что эффект пропеллера — это широко распространенное явление среди аккрецирующих пульсаров и играет ключевую роль в их эволюции при малых темпах аккреции. Измерение светимости перехода позволяет получать прямые оценки магнитного поля, подтверждать или уточнять результаты спектральной диагностики и выявлять источники с аномальной структурой магнитосферы. Таким образом, существенно расширена наблюдательная база для проверки теории взаимодействия аккреционного диска с магнитным полем нейтронной звезды.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена исследованию природы аккреции на рентгеновские пульсары в режимах низкой светимости. В главе впервые предложена модель аккреции из рекомбинированного («холодного») аккреционного диска, позволяющая объяснить стабильную аккрецию при светимости значительно ниже значений, ожидаемых в рамках стандартных представлений об эволюции аккреционного диска.

Анализ большого количества наблюдательных данных показал, что значительное число рентгеновских пульсаров демонстрирует длительные состояния с малой, но стабильной светимостью, не сопровождающиеся переходом в режим пропеллера. Эти состояния невозможно объяснить тра-

диционной моделью аккреции из горячего ионизованного диска, поскольку при столь малых темпах аккреции диск должен становиться неустойчивым. На основе анализа спектральных и временных характеристик источников предложена интерпретация, в которой внутренние области диска находятся в состоянии частичной рекомбинации. В таком режиме структура диска существенно отличается от стандартной: изменяются свойства вязкости, толщина диска и характер взаимодействия с магнитосферой нейтронной звезды. Показано, что при определенных условиях рекомбинированный диск способен сохранять перенос вещества внутрь системы и обеспечивать слабую, но устойчивую аккрецию на поверхность звезды.

Особое внимание в главе уделено предсказательному потенциалу разработанной модели. Установлено, что критические условия перехода между различными режимами определяются фундаментальными параметрами системы — напряженностью магнитного поля нейтронной звезды и периодом ее вращения.

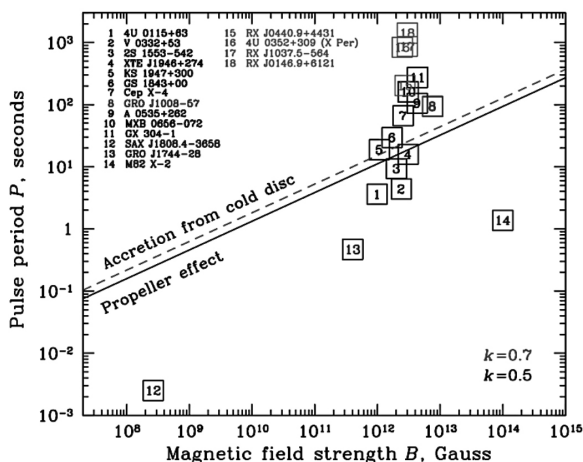


Рис. 5. Набор некоторых известных рентгеновских пульсаров в двойных системах с Ве компаньонами (показаны темным тоном), а также аккрецирующий миллисекундный пульсар SAX J1808.4–3658, промежуточный пульсар GRO J1744–28 и пульсирующий ультра-яркий рентгеновский источник M82 X-2 на плоскости В-Р. Сплошная и штриховая линии соответствуют предсказанию $P^*(B)$ для двух разных значений глубины проникновения диска в магнитосферу ($k = 0,5$ и $k = 0,7$ соответственно). Эта линия разделяет источники, где режим пропеллера возможен, от источников со стабильной аккрецией из холодного диска. Постоянные пульсары низкой светимости показаны светлым тоном (номера 15–18). GRO J1008–57 находится в области, соответствующей источникам с аккрецией из холодного диска

Это позволяет заранее предсказать физический сценарий завершения рентгеновской вспышки для конкретного объекта: в зависимости от соотношения B и P , источник либо перейдет в режим центробежного барьера

(пропеллера), сопровождающийся резким падением светимости, либо плавно перейдет в состояние устойчивой аккреции из холодного диска (рис. 5). Таким образом, предложенная теоретическая схема позволяет проводить априорную диагностику поведения пульсаров на стадии затухания вспышки.

Для проверки предложенной концепции проведен систематический анализ наблюдений большого числа рентгеновских пульсаров в состояниях низкой светимости. Исследованы их долговременные кривые блеска и спектральные свойства. Показано, что наблюдаемые параметры (включая форму спектров и уровень переменности потока) согласуются с ожиданиями модели аккреции из рекомбинированного диска и не требуют привлечения альтернативных механизмов энерговыделения. Полученные результаты демонстрируют универсальность предложенной концепции: она применима к широкому классу источников с различными параметрами магнитного поля и орбитальных конфигураций.

Научная значимость главы состоит в том, что предложенная модель расширяет стандартное представление о режимах аккреции на нейтронные звезды и вводит новый физический сценарий взаимодействия диска с магнитосферой в области малых значений светимости. Это позволяет связать наблюдаемое разнообразие состояний рентгеновских пульсаров в единую последовательную схему переходов между режимами аккреции, обладающую высокой предсказательной силой.

Пятая глава посвящена исследованию формирования рентгеновских спектров аккрецирующих нейтронных звезд при малых темпах аккреции и обнаружению принципиально новой спектральной формы, качественно отличающейся от классического спектра рентгеновских пульсаров.

Традиционно спектры аккрецирующих пульсаров в диапазоне энергии от нескольких до десятков килоэлектронвольт описываются степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях. Такая форма интерпретируется как результат комптонизации фотонов в горячей плазме аккреционной колонки при значительной оптической толщине и высокой плотности вещества. Однако при снижении темпа аккреции структура излучающей области претерпевает существенные изменения: уменьшается высота аккреционной колонки, меняется распределение температуры и плотности плазмы.

В главе приведен систематический анализ широкополосных спектров ряда рентгеновских пульсаров в состояниях пониженной светимости, охватывающих диапазон, превышающий три порядка величины по светимости. Используются данные современных рентгеновских обсерваторий, обеспечивающих одновременное покрытие мягкого и жесткого диапазона энергий. Это позволило впервые проследить эволюцию спектральной формы при переходе источников от ярких состояний к режимам с низкой светимостью.

В результате анализа установлено, что при малых темпах аккреции наблюдается новая широкополосная спектральная форма, характеризую-

щаяся наличием двух широких максимумов — одного в области нескольких килоэлектронвольт и второго в области нескольких десятков килоэлектронвольт (рис. 6). Такая структура принципиально отличается от классического степенного спектра с завалом на высоких энергиях и не может быть адекватно описана стандартными эмпирическими моделями, применяемыми для ярких состояний пульсаров.

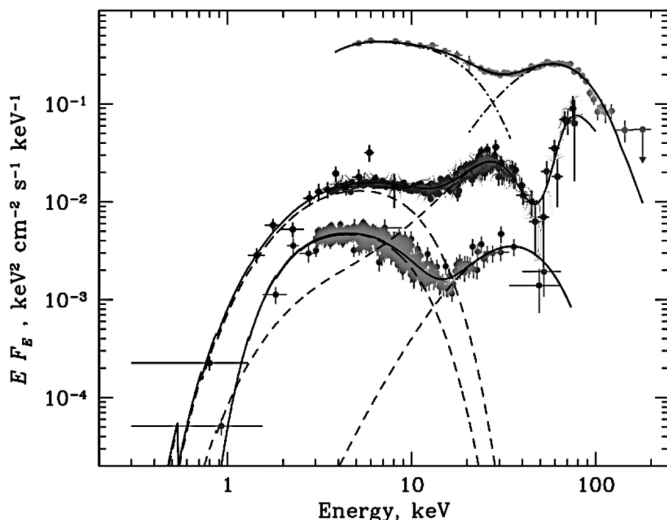


Рис. 6. Спектры источников X Persei (сверху), GX 304—1 (снизу) и A 0535+262 (посередине), наблюдаемые при низких темпах аккреции, вместе с наилучшими аппроксимирующими моделями, состоящими из двух компонент комптонизации (сплошные линии). Отдельные компоненты модели показаны пунктирными линиями

Для интерпретации обнаруженной двугорбой структуры предложена физическая модель формирования спектра, основанная на учете двух независимых механизмов генерации фотонов. Низкоэнергетический максимум интерпретируется как результат комптонизации теплового излучения, формирующегося в нагретых областях поверхности нейтронной звезды или в основании аккреционного потока. Высокоэнергетический максимум связывается с комптонизированными циклотронными фотонами, возникающими в результате столкновений аккрецирующих частиц с электронами в атмосфере нейтронной звезды и последующих радиационных переходов электронов на основной уровень Ландау. В условиях пониженной плотности плазмы вклад циклотронных процессов становится доминирующим в жестком диапазоне энергии и приводит к формированию выраженного «жесткого горба».

Разработанная модель показала хорошее согласие с наблюдательными данными для всех исследованных объектов. Она естественным образом объясняет наличие двух максимумов, их энергетическое положение и эволю-

цию при изменении светимости. Важным результатом стало установление связи положения максимума жесткого излучения с энергией циклотронного резонанса. Это открывает принципиально новую возможность диагностики магнитного поля в ситуациях, когда классическая линия циклотронного поглощения в спектре отсутствует или не может быть надежно измерена. Таким образом, измерение положения максимума жесткого компонента в двугорбой спектральной форме может служить альтернативным инструментом оценки напряженности магнитного поля нейтронной звезды.

Кроме того, обнаруженная спектральная форма предоставляет новый критерий диагностики продолжающейся аккреции в низких состояниях рентгеновских пульсаров. Показано, что наличие выраженного жесткого компонента, согласующегося по энергии с циклотронным резонансом, указывает на продолжающийся процесс аккреции. Это особенно важно при анализе состояний, близких к покою, где необходимо отличать аккреционное излучение от теплового остывания нейтронной звезды.

Таким образом, в главе впервые продемонстрировано существование новой спектральной формы рентгеновских пульсаров при малых темпах аккреции, предложена ее физическая интерпретация и показано ее диагностическое значение для оценки магнитного поля и определения источника излучения объекта. Полученные результаты существенно расширяют представления о механизмах формирования рентгеновского излучения в условиях низких темпов аккреции и дополняют классическую картину образования спектров в аккреционных колонках.

Шестая глава посвящена систематическому исследованию поляризационных свойств рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд.

Рентгеновская поляриметрия выступает принципиально новым инструментом исследования компактных объектов. До запуска специализированной поляриметрической обсерватории IXPE измерения поляризации в рентгеновском диапазоне для аккрецирующих пульсаров полностью отсутствовали, а существующие теоретические предсказания оставались непроверенными. Таким образом, работа в данном направлении требовала не только интерпретации данных, но и разработки полного методического аппарата их анализа. В рамках диссертационной работы были разработаны и реализованы процедуры обработки данных прецизионной рентгеновской поляриметрии.

С использованием данных IXPE впервые напрямую определены геометрические параметры ряда классических рентгеновских пульсаров, включая углы наклона оси вращения нейтронной звезды и магнитного диполя относительно луча зрения. Установлено, что для нескольких исследованных систем реализуется конфигурация ортогонального ротатора, при которой угол между осью вращения и магнитной осью близок к 90° . Данный результат имеет принципиальное значение для понимания структуры магнитного поля и его эволюции в процессе аккреции.

Одним из наиболее существенных результатов главы следует считать обнаружение систематического занижения степени линейной поляризации

по сравнению с предсказаниями стандартных теоретических моделей формирования излучения в сильно замагниченной плазме. Показано, что измеренная степень поляризации для широкого класса аккрецирующих пульсаров оказывается на уровне 5–15 %, что значительно ниже теоретически ожидаемых 60–80 % (рис. 7). Этот результат требует пересмотра упрощенных моделей поляризационного излучения и накладывает жесткие ограничения на параметры плазмы и геометрию аккреционных структур.

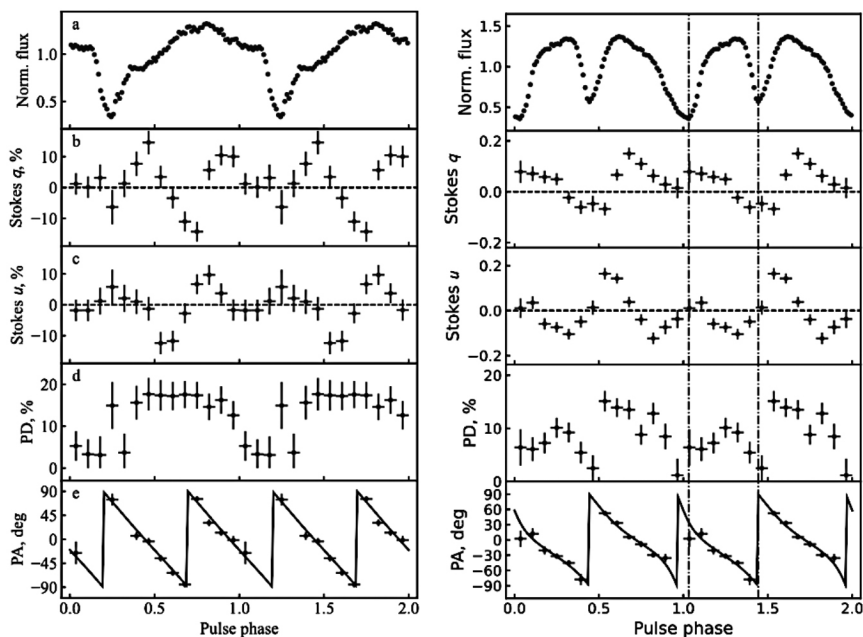


Рис. 7. Результаты фазо-разрешенного спектрополяризметрического анализа для двух ортогональных ротаторов: X Persei (слева) и GRO J1008-57 (справа). Эволюции нормированного потока (профиль импульса), параметров Стокса, степени (PD), и угла (PA) поляризации показаны на соответствующих панелях (a–e). Нижние панели также демонстрируют результаты аппроксимации моделью вращающегося вектора

В работе впервые обнаружена непульсирующая или слабо модулированная поляризованная компонента излучения у ряда рентгеновских пульсаров. Данная компонента интерпретируется как результат рассеяния и отражения излучения в протяженных аккреционных структурах — аккреционном диске, аккреционном потоке или в окрестности магнитосферы нейтронной звезды. Наличие такой компоненты свидетельствует о многокомпонентной природе поляризационного сигнала и указывает на существование дополнительного геометрического масштаба в системе.

Обнаружение непульсирующей поляризованной компоненты имеет принципиальное значение, поскольку демонстрирует, что поляризации-

онный сигнал формируется не только в непосредственной зоне генерации жесткого рентгеновского излучения, но и в более протяженных структурах аккреционного потока.

Совокупность полученных результатов показывает, что рентгеновская поляриметрия становится качественно новым этапом в исследовании аккрецирующих нейтронных звезд. Глава 6 демонстрирует переход от косвенной интерпретации геометрии к ее прямому измерению и формирует основу для построения самосогласованных моделей, объединяющих спектральные, временные и поляризационные характеристики излучения.

В Заключение приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты диссертационной работы:

1. На основе анализа зависимости энергии циклотронной линии от светимости для рентгеновских пульсаров предложен способ прямого определения критической аккреционной светимости L_{crit} , соответствующей переходу к формированию радиационно-доминированной аккреционной колонки. Для пульсара V 0332+53 впервые измерено значение $L_{crit} \approx 0,7 \cdot 10^{37}$ эрг·с⁻¹, согласующееся с теоретическими предсказаниями.
2. Экспериментально подтверждено существование режима центробежного барьера (эффекта пропеллера) в пяти рентгеновских пульсарах. Разработан метод определения напряженности и структуры магнитного поля нейтронной звезды по светимости перехода в такой режим. Применение этого метода позволило установить наличие недипольной компоненты магнитного поля, превышающей дипольную примерно на порядок, в системах SMC X-3 и Swift J0243.6+6124.
3. Развита метод использования спектров мощности излучения замагниченных компактных объектов, позволяющий определять напряженность и структуру их магнитных полей и идентифицировать разные режимы взаимодействия аккреционного диска с магнитосферой. Для пульсаров Her X-1 и GRO J1744-28 получены свидетельства наличия квадрупольной компоненты магнитного поля. В системе GRO J1744-28 обнаружен переход внутренних областей аккреционного диска в режим доминирования радиационного давления.
4. Предложен и откалиброван метод проверки аккреционной природы рентгеновского излучения нейтронных звезд по форме наблюдаемого спектра мощности. Показано, что рентгеновское излучение пульсара 4U 0115+63 при низких значениях светимости обусловлено тепловым остыванием полярных шапок нейтронной звезды. Продемонстрировано, что отсутствие красного шума в спектрах мощности магнетаров противоречит гипотезе об аккреционной природе их постоянного рентгеновского излучения.

5. Обнаружен новый тип спектров излучения рентгеновских пульсаров при низких значениях светимости, характеризующийся наличием двух широких спектральных компонент с максимумами в областях нескольких килоэлектронвольт и нескольких десятков килоэлектронвольт. Предложена модель их формирования, в которой мягкая компонента связана с комптонизированным тепловым излучением горячих пятен на поверхности нейтронной звезды, а жесткая — с комптонизированными циклотронными фотонами.
6. Предложена модель квазистабильной аккреции из рекомбинированного (с температурой ниже ~ 6500 К) диска на замагниченные нейтронные звезды. Показано, что возможность перехода в такой режим определяется комбинацией периода вращения и напряженности магнитного поля нейтронной звезды. Предсказания модели верифицированы на выборке из более чем десятка рентгеновских пульсаров и не имеют наблюдательных исключений среди исследованных систем.
7. На основе данных рентгеновской поляриметрической обсерватории IXPE впервые измерена ориентация оси вращения и магнитного диполя относительно луча зрения для двенадцати наиболее ярких рентгеновских пульсаров. Показано, что два из них (GRO J1008-57 и X Persei) представляют собой ортогональные ротаторы, в которых ось магнитного диполя перпендикулярна оси вращения нейтронной звезды.
8. Впервые измерена степень линейной поляризации аккрецирующих рентгеновских пульсаров, величина которой 5–15 % оказалась существенно ниже теоретически предсказанных значений 60–80 %. Установлено, что этот эффект носит универсальный характер и свидетельствует о наличии эффективных механизмов деполяризации в излучающих областях нейтронных звезд.
9. В излучении двух ярких транзиентных рентгеновских пульсаров Swift J0243.6+6124 и RX J0440.9+4431 обнаружена неппульсирующая поляризованная компонента. Предложена интерпретация, согласно которой она формируется в результате рассеяния рентгеновского излучения нейтронной звезды в оттоках вещества из аккреционного диска.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения и результаты диссертации С.С. Цыганкова опубликованы в 33 печатных работах в рецензируемых изданиях:

1. Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А. 4U 0115+63 по данным обсерваторий RXTE и INTEGRAL: профиль импульса и энергия циклотронной линии // Письма в *Астрономический журн.* 2007. Т. 33. С. 417–434.

2. Doroshenko V., Tsygankov S.S., Mushtukov A.A. et al. Luminosity dependence of the cyclotron line and evidence for the accretion regime transition in V 0332+53 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2017. V. 466. Iss. 2. P. 2143–2150. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3236>.
3. Doroshenko V., Santangelo A., Suleimanov V.F., Tsygankov S.S. An observational argument against accretion in magnetars // Astronomy and Astrophysics. 2020. V. 643. Article A173. 4 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038948>.
4. Doroshenko V., Santangelo A., Tsygankov S.S., Ji L. SGR 0755-2933: a new high-mass X-ray binary with the wrong name // Astronomy and Astrophysics. 2021. V. 647. Article A165. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039785>.
5. Doroshenko V., Poutanen J., Tsygankov S.S. et al. Determination of X-ray pulsar geometry with IXPE polarimetry // Nature Astronomy. 2022. V. 6. P. 1433–1443. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01799-5>.
6. Doroshenko V., Poutanen J., Heyl J. et al. Complex variations in X-ray polarization in the X-ray pulsar LS V +44 17/RX J0440.9+4431 // Astronomy and Astrophysics. 2023. V. 677. Article A57. 10 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347088>.
7. Forsblom S.V., Tsygankov S.S., Poutanen J. et al. Probing the polarized emission from SMC X-1: The brightest X-ray pulsar observed by IXPE // Astronomy and Astrophysics. 2024. V. 691. Article A216. 11 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450937>.
8. Forsblom S.V., Tsygankov S.S., Suleimanov V.F. et al. Revealing two orthogonally polarized spectral components in Vela X-1 with IXPE // Astronomy and Astrophysics. 2025. V. 696. Article A224. 9 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202553867>.
9. Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Krivonos R.A. et al. Propeller Effect in the Transient X-Ray Pulsar SMC X-2 // The Astrophysical J. 2017. V. 834. No. 2. Article 209. DOI: 10.3847/1538-4357/834/2/209.
10. Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Karasev D.I. et al. GRO J1750-27: A neutron star far behind the Galactic Center switching into the propeller regime // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2019. V. 485. Iss. 1. P 770–776. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz437>.
11. Lutovinov A., Tsygankov S., Molkov S. et al. SRG/ART-XC and NuSTAR Observations of the X-Ray pulsar GRO J1008-57 in the Lowest Luminosity State // The Astrophysical J. 2021. V. 912. Article 17. 6 p. DOI: 10.3847/1538-4357/abec43.
12. Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Mereminskiy I.A. et al. SRG/ART-XC discovery of SRGA J204318.2+443815: Towards the complete population of faint X-ray pulsars // Astronomy and Astrophysics. 2022. V. 661. Article A28. 9 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141630>.
13. Mönkkönen J., Tsygankov S.S., Mushtukov A.A. et al. Evidence for the radiation-pressure dominated accretion disk in bursting pulsar GRO J1744-28 using timing analysis // Astronomy and Astrophysics. 2019. V. 626. Article A106. 10 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935507>.
14. Mönkkönen J., Tsygankov S.S., Mushtukov A.A. et al. Constraints on the magnetic field structure in accreting compact objects from aperiodic variability // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2022. V. 515. Iss. 1. P. 571–580. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1828>.
15. Mushtukov A.A., Suleimanov V.F., Tsygankov S.S., Portegies Zwart S. Spectrum formation in X-ray pulsars at very low mass accretion rate: Monte Carlo approach // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2021. V. 503. Iss. 4. P. 5193–5203. DOI: 10.1093/mnras/stab811.

16. *Mushtukov A. A., Tsygankov S. S., Poutanen J. et al.* X-ray polarimetry of X-ray pulsar X Persei: another orthogonal rotator? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2023. V. 524. Iss. 2. P. 2004–2014. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1961>.
17. *Poutanen J., Tsygankov S. S., Doroshenko V. et al.* Studying geometry of the ultraluminous X-ray pulsar Swift J0243.6+6124 using X-ray and optical polarimetry // *Astronomy and Astrophysics*. 2024. V. 691. Article A123. DOI: 10.1051/0004-6361/202450696.
18. *Poutanen J., Tsygankov S. S., Forsblom S. V.* X-ray Polarimetry of X-ray Pulsars // *Galaxies*. 2024. V. 12. Article 46. <https://doi.org/10.3390/galaxies12040046>.
19. *Tsygankov S. S., Mushtukov A. A., Suleimanov V. F., Poutanen J.* Propeller effect in action in the ultraluminous accreting magnetar M82 X-2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2016. V. 457. Iss. 1. P. 1101–1106. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw046>.
20. *Tsygankov S. S., Lutovinov A. A., Doroshenko V. et al.* Propeller effect in two brightest transient X-ray pulsars: 4U 0115+63 and V 0332+53 // *Astronomy and Astrophysics*. 2016. V. 593. Article A16. 7 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628236>.
21. *Tsygankov S. S., Mushtukov A. A., Suleimanov V. F. et al.* Stable accretion from a cold disc in highly magnetized neutron stars // *Astronomy and Astrophysics*. 2017. V. 608. Article A17. 8 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630248>.
22. *Tsygankov S. S., Wijnands R., Lutovinov A. A. et al.* The X-ray properties of Be/X-ray pulsars in quiescence // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2017. V. 470. Iss. 1. 126–141. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1255>.
23. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Lutovinov A. A. et al.* SMC X-3: the closest ultraluminous X-ray source powered by a neutron star with non-dipole magnetic field // *Astronomy and Astrophysics*. 2017. V. 605. Article A39. 8 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730553>.
24. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Mushtukov A. A. et al.* On the magnetic field of the first Galactic ultraluminous X-ray pulsar Swift J0243.6+6124 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2018. V. 479. P. L134–L138. DOI: 10.1093/mnras/sly116.
25. *Tsygankov S. S., Rouco Escorial A., Suleimanov V. F. et al.* Dramatic spectral transition of X-ray pulsar GX 304-1 in low luminous state // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2019. V. 483. Iss. 1. P. L144–L148. DOI: 10.1093/mnras/sly236.
26. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Mushtukov A. A. et al.* Cyclotron emission, absorption, and the two faces of X-ray pulsar A 0535+262 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2019. V. 487. L30–L34. DOI: 10.1093/mnras/slz079.
27. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Mushtukov A. A. et al.* Study of the X-ray pulsar IGR J19294+1816 with NuSTAR: Detection of cyclotron line and transition to accretion from the cold disk // *Astronomy and Astrophysics*. 2019. V. 621. Article A134. 7 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833786>.
28. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Poutanen J. et al.* The X-Ray Polarimetry View of the Accreting Pulsar Cen X-3 // *The Astrophysical J.* 2022. V. 941. Iss. 1. Article L14. 16 p. DOI: 10.3847/2041-8213/aca48.
29. *Tsygankov S. S., Molkov S. V., Doroshenko V. et al.* SRG/ART-XC, Swift, NICER, and NuSTAR study of different states of the transient X-ray pulsar MAXI J0903-531 // *Astronomy and Astrophysics*. 2022. V. 661. Article A45. 8 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141821>.
30. *Tsygankov S. S., Doroshenko V., Mushtukov A. A. et al.* X-ray pulsar GRO J1008-57 as an orthogonal rotator // *Astronomy and Astrophysics*. 2023. V. 675. Article A48. 11 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346134>.

31. *Xiao H., Tsygankov S.S., Suleimanov V.F. et al.* Propeller effect in action: Unveiling quenched accretion in the transient X-ray pulsar 4U 0115+63 // *Astronomy and Astrophysics*. 2025. V. 702. Article A216. 8 p. DOI: 10.1051/0004-6361/202556527.
32. *Zhao Q.C., Tao L., Tsygankov S.S. et al.* Continuous evolution of the polarization properties in the transient X-ray pulsar RX J0440.9+4431/LS V +44 17 // *Astronomy and Astrophysics*. 2025. V. 693. Article A241. 11 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452872>.
33. *Zhao Q.C., Tao L., Tsyganko S.S. et al.* Discovery of energy-dependent phase variations in the polarization angle of Cen X-3 // *Astronomy and Astrophysics*. 2026. V. 708. Article A94. 19 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202556184>.

Цыганков Сергей Сергеевич
**Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей
и магнитных полей рентгеновских пульсаров**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 07.07.2026. Заказ № 4222.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100.
Издательство ИКИ РАН. Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32