

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации С.С. Цыганкова
**"Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей
и магнитных полей рентгеновских пульсаров",**
представленной на соискании ученой степени
доктора физико-математических наук.

Прогресс в современной астрофизике тесно связан с развитием и совершенствованием технологий астрономических наблюдений. Особенно поразительны успехи рентгеновской астрономии, где за последние годы были реализованы такие выдающиеся космические рентгеновские миссии, как, например, Спектр РГ и IXPE. В диссертационной работе С.С. Цыганкова выполнены комплексные исследования рентгеновских пульсаров в разных стадиях активности и исследована физика взаимодействия плазмы и излучения со сверхсильными магнитными полями вблизи поверхности аккрецирующих нейтронных звезд. Путем объединения спектрального и временного анализа интенсивности рентгеновского излучения от аккрецирующих нейтронных звезд с методами рентгеновской поляриметрии, диссертанту, после тщательного анализа результатов наблюдений, удалось построить самосогласованную картину аккреционных процессов в сверхсильных магнитных полях, что имеет важное значение для релятивистской астрофизики. Поэтому актуальность, новизна и научная значимость результатов, полученных в диссертации С.С. Цыганкова, не вызывают сомнения.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения и Списка цитируемой литературы (550 наименований).

Во Введении представлены общие сведения о рентгеновских пульсарах, подкрепленные большим количеством ссылок на оригинальные публикации. Обоснована актуальность темы исследования, ее научная новизна, научная и практическая ценность, а также резюмировано содержание диссертации.

Особую ценность диссертации придает тот факт, что диссертант принимал непосредственное участие в наблюдениях на таких международных космических рентгеновских обсерваториях, как NuSTAR, INTEGRAL, Спектр-РГ, IXPE, а также систематизировал и проанализировал огромный объем наблюдательных данных, накопленный современными космическими рентгеновскими обсерваториями.

В первой главе экспериментально изучена зависимость структуры областей формирования рентгеновского излучения в аккрецирующих рентгеновских пульсарах от темпа аккреции вещества, с целью определения критической светимости. Использовались широкополосные наблюдения транзитного рентгеновского пульсара V0332+53 во время гигантской вспышки 2015 года и последующие наблюдения при более низких светимостях. Из анализа зависимости энергии циклотронной линии от светимости диссертант впервые экспериментально измерил значение критической светимости в рентгеновских пульсарах, соответствующей переходу к радиационно доминированной аккреционной колонке: $L_{\text{crit}} \sim 0.7 \cdot 10^{37}$ эрг/с. Важность этого результата состоит также в том, что он представляет собой новый эффективный метод диагностики структуры аккреционной колонки.

Во второй главе изучена апериодическая переменность рентгеновских пульсаров, которая формируется на различных радиусах аккреционного диска.

Диссертант разработал новый метод интерпретации спектров мощности апериодической переменности, позволяющий получать ограничения на геометрию магнитосферы рентгеновского пульсара и даже оценивать вклад недипольных компонент магнитного поля. Анализ ряда рентгеновских пульсаров показал, что для многих объектов предположение о дипольности магнитного поля является разумным, однако у некоторых

пульсаров (например HerX-1 и GROJ1744 - 28) диссертанту удалось выявить следы квадрупольной компоненты магнитного поля, что обуславливает уменьшение магнитосферного радиуса по сравнению с дипольным случаем. Кроме того, временной анализ позволил диссертанту не только ограничить структуру магнитного поля, но и получить информацию о физических параметрах аккреционного диска.

Показано, что наличие красного шума в аperiodической переменности является характерным признаком аккреционной природы излучения. Оказалось, что красный шум отсутствует в спектрах мощности магнитаров, что является сильным аргументом против аккреционного механизма формирования их стационарного рентгеновского излучения.

Результаты, полученные в данной главе, являются новыми. Они показывают, что иррегулярная переменность рентгеновских пульсаров является важным источником информации о природе этих объектов.

В третьей главе анализируются переходы аккрецирующих рентгеновских пульсаров в режим пропеллера с целью определения напряженности магнитных полей нейтронных звезд и проверки моделей взаимодействия аккреционного диска с магнитосферой. Показано, что на финальных стадиях всплеск излучения ряда транзитных рентгеновских пульсаров снижение светимости носит скачкообразный характер и достигает одного – двух порядков величины. Это согласуется с теоретическими предсказаниями для перехода аккреции в режим пропеллера. Диссертант выполнил детальный временной анализ рентгеновского излучения пульсаров в низком состоянии и показал, что в этом состоянии существенно подавляется стохастическая переменность, характерная для аккреционного режима, а в случае источника 4U0115+63 оказалось, что спектр мощности иррегулярной переменности вообще лишен красного шума. Таким образом, диссертанту удалось получить важное наблюдательное подтверждение существования пропеллерного механизма подавления аккреции.

Для источников V0332+53, SMCX-2 и GROJ1750-27 диссертант определил светимость перехода в режим пропеллера и на ее основе оценил напряженность магнитного поля. В случае ультра ярких транзитных рентгеновских пульсаров (SMCX-3, SwiftJ0243.6+6124) оказалось, что напряженность магнитного поля, оцененная по наблюдаемой светимости перехода в режим пропеллера, не согласуется с предположением о простой дипольной конфигурации поля, что свидетельствует о наличии в магнитосфере пульсара недипольных компонент.

Таким образом, диссертанту удалось расширить возможности наблюдательной проверки теории взаимодействия аккреционного диска с магнитным полем нейтронной звезды.

В четвертой главе исследуются физические процессы, обуславливающие режим низкой светимости рентгеновских пульсаров. Автор предложил модель аккреции из

рекомбинированного, "холодного" диска, у которого температура ниже температуры ионизации водорода. Согласно идеи диссертанта, в таком состоянии диск обладает пониженной вязкостью, что обеспечивает низкий темп аккреции и низкую стационарную рентгеновскую светимость. При этом аккреция в диске не переходит в режим пропеллера.

Диссертант апробировал эту идею с использованием наблюдений большого числа рентгеновских пульсаров в низкой стадии активности. Он исследовал долговременные кривые блеска и спектральные свойства таких пульсаров и показал, что форма спектра и уровень переменности рентгеновского потока согласуется с предсказаниями в рамках модели аккреции из рекомбинированного диска.

В пятой главе исследованы рентгеновские спектры аккрецирующих нейтронных звезд при низких темпах аккреции. Диссертанту удалось проследить эволюцию формы широкополосных спектров рентгеновских пульсаров, при переходе от ярких состояний к состоянию с низкой светимостью и открыть двугорбую форму спектров в случае низких светимостей. Для интерпретации открытый им двугорбый формы рентгеновских спектров диссертант предложил оригинальную двухкомпонентную модель, в который

низкоэнергетичный максимум в рентгеновском спектре связан с комптонизацией теплового излучения, а высокоэнергичный максимум обусловлен комптонизацией циклотронных фотонов.

Важно то, что в этой модели устанавливается связь между положением максимума жесткого излучения с энергией циклотронного резонанса, что дает возможность независимо оценивать напряженность магнитного поля нейтронной звезды. Кроме того, при анализе состояний, близких к спокойному, это позволяет отличить аккреционное излучение от теплового остывания нейтронной звезды.

В шестой главе выполнены уникальные исследования поляризационных свойств рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд. Диссертант разработал и реализовал в конкретных наблюдениях на рентгеновской обсерватории IXPE все процедуры обработки данных прецизионной рентгеновской поляриметрии.

При этом выяснился неожиданный результат: относительно низкая степень линейной поляризации рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд по сравнению с теоретическими предсказаниями. Это очень важный результат, который накладывает жесткие ограничения на параметры плазмы и геометрию аккреционных структур, по сравнению с упрощенными моделями.

С использованием данных IXPE диссертанту удалось напрямую определить геометрические параметры ряда рентгеновских пульсаров, включая углы наклона оси вращения нейтронной звезды и магнитного диполя. При этом найдено, что для нескольких пульсаров угол между осью вращения и осью магнитного диполя близок к 90° , что важно для понимания эволюции магнитного поля в процессе аккреции.

Важным результатом работы является обнаружение диссертантом неппульсирующей или слабопульсирующей компоненты излучения рентгеновских пульсаров, которая интерпретируется как результат рассеяния и отражения излучения в протяженных аккреционных структурах.

Таким образом, в этой главе диссертантом получены новые и очень важные результаты в принципиально новой области рентгеновской астрономии – рентгеновской поляриметрии.

В заключении резюмированы результаты, полученные в диссертации и суммированы положения, выносимые на защиту.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что диссертантам проделана большая и важная работа в актуальной области астрофизики. Новизна, достоверность и научная значимость результатов диссертации бесспорны. Вместе с тем, к диссертационной работе С.С. Цыганкова можно высказать некоторые замечания.

Главное замечание относится к четвертой главе, где диссертант рассматривает модель холодного рекомбинированного диска. При этом он использует термин "вязкость", не обсуждая ее физическую природу. Между тем проблема формирования вязкости вещества при дисковой аккреции – очень сложна и далека от окончательного решения. Диссертант отмечает, что вязкость ионизованного диска больше, чем вязкость холодного, рекомбинированного диска.

Но если это молекулярная вязкость, которая на 12 порядков меньше турбулентной, то и в ионизованном, и в холодном диске темп аккреции должен быть пренебрежимо мал и, соответственно, пренебрежимо мала рентгеновская светимость. Если же это турбулентная вязкость, то возникает вопрос о механизме генерации этой турбулентности, поскольку, как известно, кеплеровский диск устойчив по отношению к малым возмущениям. Почему в холодном диске турбулентная вязкость меньше, чем в ионизованном?

Ответ на этот вопрос можно было бы искать с привлечением механизма магнито-ротационной неустойчивости, эффективность которого может зависеть от степени ионизации вещества в диске.

Более того, даже в случае ламинарного диска угловой момент в нем может переноситься через посредство формирования ударных волн, которые, согласно

современным трехмерным газодинамическим расчетам, могут появляться в диске из-за приливного воздействия со стороны спутника в двойной системе.

При низком темпе аккреции возможно привлечение и модели адвекционно-доминированного режима, который может реализоваться во внутренних частях диска. В стандартной теории дисковой аккреции Шакуры и Сюняева предполагается, что вязкость вещества в диске пропорциональна газовому давлению. Однако это красивое модельное предположение не раскрывает физическую природу вязкости вещества в кеплеровском диске. В таком солидном труде, как докторская диссертация, хотелось бы увидеть более детальное обсуждение этого важного вопроса.

К сожалению, все эти вопросы не обсуждаются в диссертации и не приводятся ссылки на соответствующие работы.

Диссертация хорошо оформлена и практически не содержит опечаток. Можно отметить лишь несколько неточностей.

1. На стр. 39 перепутана ссылка на рисунок. Вместо рис. 1.13 надо иметь в виду рисунок 1.14.

2. Не указан физический смысл пунктирной линии на рис. 1.14.

3. На стр. 171 для системы X Per приведена функция масс, при этом не сказано к какому объекту (звезде или пульсару) относится эта функция масс.

Сделанные замечания не влияют на общую очень высокую оценку качества диссертации. Диссертант проделал большую и плодотворную работу в актуальной области астрофизики и получил ряд научных результатов первостепенного значения.

На основе изложенного, можно заключить, что работа С.С. Цыганкова "Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров" удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и опубликованным статьям.

Диссертант С.С. Цыганков заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – "Физика космоса, астрономия".

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
академик РАН
8.09.2026г.

А.М. Черепашук

Подпись руки А.М.Черепашука заверяю:
Начальник отдела канцелярии



Л.Н.Новикова

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.03.02 – Астрономия и звездная астрономия

Контактные данные: тел. +7 (495) 939-43-48, e-mail: cher@sai.msu.ru

Должность: заведующий отделом звездной астрофизики и научный руководитель

Адрес места работы: 119234, Москва, Университетский проспект. д. 13

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова