ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию ЦЫГАНКОВА Сергея Сергеевича «Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Диссертационная работа С. С. Цыганкова посвящена исследованию аккрецирующих нейтронных звезд с сильными магнитными полями и разработке методов наблюдательной диагностики геометрии областей энерговыделения, структуры магнитного поля и режима аккреции. Для астрофизики компактных объектов эта проблематика является принципиально важной: именно геометрия магнитосферы и области формирования излучения определяет наблюдаемую временную и спектральную картину, а сведения о магнитном поле позволяют связать эти наблюдения с микрофизикой взаимодействия вещества и излучения в сильном поле.

Актуальность диссертации обусловлена тем, что при современном уровне наблюдательной астрономии основная проблема исследования рентгеновских пульсаров связана уже не с недостатком данных, а с извлечением из них физической информации о геометрии излучающих областей, структуре магнитного поля и механизмах аккреции. Рентгеновские пульсары давно являются одними из наиболее информативных природных объектов для изучения магнитной гидродинамики и переноса излучения в условиях сверхсильных магнитных полей, однако один и тот же наблюдаемый эффект часто допускает несколько физических интерпретаций. Профиль импульса зависит одновременно от геометрии и диаграммы направленности, энергия циклотронной линии – от магнитного поля и положения области излучения, характеристики апериодической переменности – от свойств аккреционного диска и магнитосферы. Поэтому дальнейший прогресс естественным образом связан с совместным использованием независимых наблюдательных диагностик.

Именно такой подход составляет одну из главных сильных сторон представленной работы. Спектральный анализ, временная диагностика и рентгеновская поляриметрия рассматриваются не как три параллельных набора результатов, а как взаимодополняющие способы ответа на одну и ту же физическую задачу. В этом отношении диссертация отражает важную тенденцию современной рентгеновской астрофизики – переход от интерпретации отдельных характеристик источника к комплексной реконструкции физических условий вблизи поверхности нейтронной

звезды. Сам автор формулирует эту методологию как объединение спектрально-временного анализа с поляриметрическими измерениями, позволяющее уменьшить модельную вырожденность и получить согласованную физическую картину.

Следует отметить, что комплексный подход такого типа имеет самостоятельную методологическую ценность. Представленная диссертация показывает, что такой подход уже вышел за рамки отдельных демонстрационных примеров и может рассматриваться как одно из перспективных направлений систематической диагностики аккрецирующих нейтронных звезд. Особенно важным это становится с учетом появления и развития новых рентгеновских миссий, способных одновременно обеспечивать высокую чувствительность, хорошее энергетическое разрешение и поляриметрические измерения.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. При этом ее структура представляется логичной: от диагностики режимов аккреции и геометрии излучающих областей автор переходит к магнитному полю, затем к взаимодействию магнитосферы с диском и низкосветимостным состояниям, а завершается работа систематическим рассмотрением рентгеновской поляриметрии и ее возможностей для геометрической диагностики. Такой порядок позволяет воспринимать отдельные наблюдательные результаты как элементы общей физической картины.

В первой главе исследуется связь спектральных свойств с геометрией области формирования излучения. В качестве одного из наиболее наглядных примеров рассматривается транзиентный пульсар V 0332+53, для которого по изменению зависимости энергии циклотронной линии от светимости определяется критическая светимость, соответствующая переходу между различными режимами аккреции. Полученное значение L_{crit} порядка 0.7×10^{37} эрг/с согласуется с теоретическими ожиданиями. Важным достоинством анализа является учет долговременной эволюции энергии циклотронной линии.

Во второй главе предложен и развивается другой, менее традиционный диагностический инструмент – анализ спектров мощности апериодической переменности. Автор показывает, что внутренний край аккреционного диска может отражаться в спектральной структуре шума и, следовательно, свойства временной переменности способны нести информацию о масштабе магнитосферы. Особенно интересен вывод о сложной структуре магнитного поля ряда объектов, включая наличие заметной квадрупольной компоненты. Тем самым временной анализ используется не только для изучения переменности как таковой, но и для реконструкции пространственной структуры системы.

Третья глава посвящена эффекту пропеллера. Резкое падение

светимости при переходе через границу между радиусом магнитосферы и радиусом коротации может быть использовано как дополнительный способ измерения магнитного поля. Существенно, что метод не ограничивается теоретическим предложением, а проверяется на объектах, для которых магнитное поле известно из независимых наблюдений. На этой основе исследуются, в частности, пульсары SMC X-3 и Swift J0243.6+6124, где получены аргументы в пользу значительной недипольной компоненты поля. Этот результат особенно важен потому, что позволяет сопоставить характер взаимодействия аккреционного потока с магнитным полем на магнитосферном масштабе с данными о недипольной структуре магнитного поля вблизи поверхности нейтронной звезды.

Четвертая глава посвящена возможности устойчивой аккреции из холодного, частично рекомбинированного диска. В этой части работы показано, что изменение ионизационного состояния аккреционного диска может приводить к переходу системы в режим квазистационарной аккреции при низких темпах переноса вещества и тем самым определять наблюдаемые свойства рентгеновского пульсара. Предложенная модель сопоставляется с наблюдениями выборки рентгеновских пульсаров. Важным здесь является выход за рамки стандартной картины полностью ионизованного аккреционного диска и демонстрация того, что свойства внешней аккреционной структуры могут непосредственно влиять на физику низкосветимостных состояний.

Пятая глава посвящена исследованию спектров рентгеновских пульсаров при низких темпах аккреции. В этой главе автором впервые обнаружена принципиально новая для рентгеновских пульсаров форма энергетического спектра, характеризующаяся двумя широкими компонентами и существенно отличающаяся от классического спектра со степенным законом и высокоэнергетическим завалом. Для интерпретации этого нового спектрального явления последовательно рассмотрены различные физические сценарии и предложена физическая интерпретация наблюдаемых спектров как результата совместного вклада нескольких процессов формирования излучения. Показано также, что положение высокоэнергетической компоненты может использоваться как дополнительный индикатор напряжённости магнитного поля в тех случаях, когда циклотронная линия непосредственно не наблюдается.

Шестая глава посвящена результатам рентгеновской поляриметрии, полученным с помощью обсерватории IXPE. Это принципиально новое для данной области наблюдательное направление, позволяющее дополнить традиционные спектральные и временные методы непосредственной информацией о геометрии излучающих областей и ориентации магнитного поля. Автор последовательно применяет фазо-разрешенный анализ

поляризации к различным рентгеновским пульсарам и показывает, что фазовые и энергетические зависимости степени и угла поляризации позволяют получать количественные ограничения на геометрию системы и выявлять дополнительные, непульсирующие компоненты излучения.

Особое внимание привлекает систематически обнаруженная относительно низкая степень линейной поляризации рентгеновских пульсаров. Сама по себе эта особенность является важным результатом, поскольку она свидетельствует о неполноте простейшей картины формирования поляризованного излучения. В диссертации обсуждается целый ряд потенциальных механизмов деполяризации и переработки излучения, а также показано, что их относительная значимость может зависеть от светимости и геометрии аккреции. Тем самым поляриметрические измерения используются не только для получения геометрических параметров, но и для постановки новых физических вопросов о переносе излучения вблизи нейтронной звезды.

Достоверность основных результатов диссертации определяется сочетанием нескольких обстоятельств. Во-первых, используется большой массив наблюдений, полученных разными космическими обсерваториями. Во-вторых, ключевые выводы в ряде случаев проверяются с помощью независимых методов. В-третьих, автор достаточно последовательно обсуждает ограничения применяемых моделей и систематические неопределенности.

Считаю необходимым отметить и публикационную обеспеченность работы. Основные результаты диссертации опубликованы в ряде рецензируемых научных изданий, причем представленный список включает 33 публикации по теме исследования. По основным направлениям, рассмотренным в диссертации, автором опубликованы последовательные серии исследований. Это позволяет рассматривать положения диссертации не как результаты единичного анализа, а как итог длительной последовательной исследовательской программы.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. В диссертации модель вращающегося вектора используется для описания фазовой зависимости позиционного угла и определения геометрических параметров. Такой выбор обоснован ожидаемым доминированием крупномасштабной дипольной компоненты на больших расстояниях от поверхности нейтронной звезды. Вместе с тем в других главах получены свидетельства значительного вклада недипольных компонент. В связи с этим интересно обсудить устойчивость параметров модели к более сложным конфигурациям магнитного поля – например, смещённому диполю, суперпозиции дипольной и квадрупольной компонент

или нескольким несимметрично расположенным аккреционным областям. Это не ставит под сомнение полученную геометрическую информацию, а определяет направление её дальнейшего уточнения: какие свойства поля уже можно извлечь из имеющихся данных, а какие требуют более чувствительной поляриметрии.

2. В работе показано, что степень линейной поляризации у исследованных пульсаров обычно значительно ниже простых теоретических ожиданий. Рассмотрены отражение и рассеяние, свойства атмосферы нейтронной звезды и аккреционной среды, однако универсальный механизм пока не выделен. В связи с этим интересно услышать итоговую оценку автора: определяется ли низкая поляризация преимущественно геометрическим усреднением нескольких поляризованных компонент или существенную роль играют процессы переработки излучения на пути к наблюдателю? Особенно интересен этот вопрос при сравнении пульсаров с разными светимостями и геометрией аккреции.

Перечисленные вопросы носят дискуссионный характер и не затрагивают основных результатов и выводов диссертации. Более того, они непосредственно следуют из полученных автором результатов и могут рассматриваться как естественные направления дальнейшего развития предложенной методологии.

В целом диссертация С. С. Цыганкова оставляет впечатление самостоятельного, цельного и научно зрелого исследования. Ее сильной стороной является не только большое количество новых наблюдательных результатов, но и последовательное развитие единой идеи: геометрические и физические свойства аккрецирующей нейтронной звезды можно восстанавливать наиболее надежно тогда, когда независимые диагностические каналы рассматриваются совместно. В работе эта идея реализована на широком наборе источников и наблюдений. Существенно, что отдельные новые результаты объединены в более общую методологическую систему, позволяющую переходить от наблюдаемого сигнала к физическим параметрам и геометрии излучающей области. Практическая и методическая ценность работы также представляется высокой. Разработанные и примененные процедуры анализа могут быть использованы при обработке данных текущих и будущих рентгеновских обсерваторий.

Таким образом, считаю, что в диссертации достигнута поставленная цель – разработаны и применены методы получения количественных ограничений на геометрию областей энерговыделения, структуру магнитного поля и режимы аккреции на основе комплексного анализа спектральных, временных и поляризационных свойств рентгеновского излучения. Полученные результаты обладают научной новизной,

обоснованы проведенным анализом наблюдательных данных и имеют существенное значение для развития физики аккрецирующих нейтронных звезд.

На основании изложенного полагаю, что диссертация Цыганкова Сергея Сергеевича «Наблюдательная диагностика геометрии излучающих областей и магнитных полей рентгеновских пульсаров» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические и методологические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области астрофизики высоких энергий. Диссертация соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с действующими изменениями), а ее содержание соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Цыганков Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук

Бисикало Дмитрий Валерьевич
24.09.2026

Институт астрономии РАН (ИНАСАН)
119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48
e-mail: bisikalo@inasan.ru
тел.: +7 (495) 953-04-25

Подпись Д.В.Бисикало заверяю
Ученый секретарь ИНАСАН М.С.Мурга
24 сентября 2026 г.