

## ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертационную работу

**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».

Цыганков Сергей Сергеевич окончил факультет теоретической и экспериментальной физики Московского инженерно-физического института (технического университета) в 2004 г. по специальности «Ядерная физика». В 2007 г. закончил очную аспирантуру ИКИ РАН и под моим руководством защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа С. С. Цыганкова посвящена исследованию физических процессов, происходящих вблизи поверхности аккрецирующих сильно замагниченных нейтронных звезд в двойных системах (рентгеновских пульсаров). Работа охватывает широкий круг фундаментальных задач современной астрофизики компактных объектов, включая исследование структуры магнитного поля нейтронных звезд, взаимодействия магнитосферы с аккреционным потоком, свойств аккреционных дисков, механизмов формирования рентгеновского излучения, а также поляризационных характеристик аккрецирующих рентгеновских пульсаров.

Актуальность работы определяется тем, что рентгеновские пульсары являются уникальными астрофизическими лабораториями для изучения поведения вещества и излучения в экстремальных условиях сильных магнитных полей, сверхвысоких плотностей и интенсивного радиационного давления. Несмотря на многолетнюю историю исследований этих объектов, многие ключевые вопросы, связанные с физикой аккреции на нейтронные звезды, структурой их магнитного поля, механизмами торможения аккреционного потока и геометрией излучающих областей, до настоящего времени остаются открытыми. Особенно важным является то обстоятельство, что развитие рентгеновской астрономии в последние годы привело к появлению новых высокочувствительных космических обсерваторий, обеспечивших возможность проведения прецизионных спектральных, временных и поляриметрических измерений. Это создало принципиально новые возможности для экспериментального изучения физических процессов вблизи поверхности нейтронных звезд.

Работа С.С.Цыганкова представляет собой крупное и завершённое исследование, основанное на многолетнем систематическом анализе наблюдений рентгеновских пульсаров, выполненных по данным современных космических обсерваторий, включая RXTE, INTEGRAL, Chandra, NuSTAR, Swift, NICER, Спектр-РГ и IXPE. В диссертации реализован комплексный подход к изучению рентгеновских пульсаров, объединяющий спектральные, временные и поляриметрические методы анализа наблюдательных данных. Такой подход позволил автору получить ряд фундаментальных результатов, существенно расширяющих современные представления о физике аккреции в сильных магнитных полях.

Одним из таких результатов является разработка метода прямого определения критической светимости, соответствующей переходу между различными режимами аккреции на поверхность нейтронной звезды, по наблюдаемым изменениям энергии циклотронной линии со светимостью. Автором впервые измерена величина критической светимости, хорошо согласующаяся с предсказаниями теоретических моделей. Полученные результаты имеют принципиальное значение для понимания структуры излучающих областей в рентгеновских пульсарах, в первую очередь, механизмах формирования аккреционной колонки.

Важным направлением исследований, выполненных диссертантом, является изучение магнитосфер аккрецирующих нейтронных звезд методами временного анализа. Автором показано, что спектры мощности апериодической переменности могут использоваться для диагностики структуры магнитного поля и свойств внутренней области аккреционного диска, а также для выявления процесса аккреции как основного источника энерговыделения в рентгеновских источниках. Кроме того, на основе анализа стохастической переменности были получены аргументы в пользу существования сложной, недипольной структуры магнитного поля в ряде рентгеновских пульсаров.

Существенный вклад внесён автором в исследование режима центробежного барьера («эффекта пропеллера») в рентгеновских пульсарах. Во-первых, в работе впервые экспериментально обнаружен этот эффект, а во-вторых, предложен и откалиброван метод определения напряжённости магнитного поля нейтронных звезд по измерениям критической светимости перехода в режим пропеллера. Использование этого метода позволило получить независимые оценки магнитного поля для нескольких рентгеновских пульсаров, включая ультраяркие рентгеновские источники.

Большой цикл статей, вошедших в диссертационную работу, посвящён исследованию аккреции из холодного (рекомбинированного) диска и свойств

рентгеновских пульсаров в состояниях с низкой светимостью. Автором предложена физическая модель стационарной аккреции из холодного диска, обладающая высокой предсказательной способностью и успешно подтвержденная наблюдательными данными для значительной выборки источников. В работе также исследованы спектральные свойства рентгеновских пульсаров при низких темпах аккреции, обнаружен новый тип широкополосных спектров и предложена физическая интерпретация их формирования.

Особое значение имеют результаты, полученные с использованием данных рентгеновской поляриметрической обсерватории IXPE. Работы С.С. Цыганкова стали одними из первых систематических исследований поляризационных свойств аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Использование фазово-зависимой поляриметрии позволило получить ограничения на геометрию систем и ориентацию магнитного поля нейтронных звезд. В диссертации показано, что наблюдаемая степень линейной поляризации существенно ниже теоретически ожидаемых значений, что свидетельствует о существовании эффективных механизмов деполяризации в излучающих областях. Кроме того, автором обнаружена неппульсирующая поляризованная компонента излучения, по-видимому, связанная с рассеянием в протяженных аккреционных структурах.

Научные результаты диссертации являются достоверными и хорошо обоснованными. Они получены с использованием современных методов анализа наблюдательных данных, опираются на большой объем высококачественного наблюдательного материала и имеют серьезное теоретическое обоснование. Основные результаты работы опубликованы в ведущих международных рецензируемых журналах, включая *The Astrophysical Journal*, *Astronomy and Astrophysics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Nature Astronomy* и другие. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях и получили признание специалистов в области астрофизики релятивистских компактных объектов.

Хотел бы особо отметить высокий профессиональный уровень Сергея Цыганкова. Он обладает глубокими знаниями в области астрофизики компактных объектов, уверенно владеет современными методами анализа рентгеновских наблюдений, способен самостоятельно формулировать научные задачи и успешно решать их на мировом уровне. Он являлся и инициатором и ключевым исполнителем большинства исследований, вошедших в диссертацию, им определялись направления работы, их цели и задачи. В ходе работы над диссертацией С.С.Цыганков проявил себя как зрелый ученый, способный проводить комплексные исследования, объединяющие наблюдательные данные, физическое моделирование и интерпретацию результатов.

