ОТЗЫВ

официального оппонента Кочаровского Владимира Владиленовича
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 посвящена в основном наблюдательному исследованию геометрических и физических характеристик аккрецирующих нейтронных звёзд и их магнитных полей с использованием временных, спектральных и поляризационных данных различных телескопов, прежде всего рентгеновских спутниковых, а также развитию и верификации моделей, которые призваны согласовать разрозненные данные наблюдений и объяснить различные режимы аккреции и энерговыделение в них. Рассмотренные в диссертации задачи обработки наблюдательных данных и их сравнительного анализа являются весьма фундаментальными и практически важными для наблюдательной рентгеновской астрономии и выяснения физических механизмов, определяющих функционирование аккреционных систем, поскольку до сих пор многие явления в них остаются загадочными и не укладываются в рамки простейших астрофизических моделей.

В диссертации довольно подробно, с глубоким пониманием представлены используемые автором как известные, так и модифицированные им методы анализа данных рентгеновских наблюдений аккрецирующих нейтронных звезд. Предложен также целый ряд адекватных гипотез происхождения обнаруженных вновь или подтвержденных известных ранее особенностей рентгеновского излучения этих объектов, в том числе частично поляризванного.

Тема диссертации является актуальной, а полученные автором результаты обладают научной новизной, оригинальностью, достоверностью и востребованы современной астрономией. Диссертация, имеющая 221 страницу машинописного текста и включающая 85 рисунков и 15 таблиц, состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы (550 наименование).

Во **Введении** обоснована актуальность темы, изложены цели работы, обсуждена её научная новизна, а также практическая ценность полученных результатов.

Глава 1 посвящена конфигурациям излучающих областей рентгеновских пульсаров и сопоставлению геометрий горячего пятна и аккреционной колонки. Проведен анализ перестройки этих геометрий и изменения темпа аккреции с использованием спектральных наблюдений, в том числе наблюдений циклотронных линий. Для одного из транзиентных рентгеновских пульсаров установлены наблюдательные ограничения критической светимости, отвечающей переходу между этими двумя геометриями.

В **глава 2** анализируется апериодическая переменность рентгеновского излучения и на этой основе изучаются конфигурации магнитного поля аккрецирующих нейтронных звёзд. Выяснено, что ограничения на структуру магнитосферы, включая вклад

недипольных компонент магнитного поля, могут быть получены из анализа спектров мощности излучения. В результате подтверждено наличие сложной конфигурации магнитного поля у ряда рентгеновских пульсаров и приведены аргументы в пользу существования переходов внутренних областей аккреционного диска в режим доминирования радиационного давления.

В **главе 3** изучается так называемый эффект пропеллера в аккрецирующих нейтронных звёздах. На основе наблюдаемых спектральных-временных особенностей рентгеновских пульсаров в низком состоянии для ряда систем установлено подавление аккреции плазмы на поверхность нейтронной звезды, обусловленное наличием центробежного барьера при определенной конфигурации магнитного поля. Продемонстрирована возможность диагностики прекращения аккреции и подтверждения аккреционного происхождения рентгеновского излучения, в том числе у магнетаров, с использованием критерия «выключения» красного шума в спектрах мощности, характерного для излучения активно аккрецирующих систем, особенно ультраярких.

В **главе 4** рассматриваются характеристики аккреции из холодного (частично рекомбинированного) диска. В предположении об относительно низкой вязкости в диске высказана гипотеза о существовании квазистабильной аккреции на сильно замагниченные нейтронные звёзды. Реализация такой аккреции предполагается в состоянии низкой светимости рентгеновских пульсаров. Гипотеза подтверждена на основе выборки ряда источников и указывает на новые возможности оценки параметров магнитного поля нейтронных звёзд.

В **главе 5** исследуются спектральные особенности излучения, свойственнные низким темпам аккреции на рентгеновские пульсары. Обнаружена их новая спектральная форма излучения, содержащая два широких пика и качественно отличающаяся от обычной спектральной формы, имеющей степенной характер с резким обрывом на высоких энергиях. Данный двугорбый спектр связан с наличием комбинации комптонизированного теплового и циклотронного излучения, в которой положение высокоэнергетического горба может позволить определить напряжённость магнитного поля для тех случаев, в которых отсутствует непосредственное наблюдение линии циклотронного поглощения.

В **главе 6** с использованием наблюдений обсерватории *IXPE* рассматриваются поляризационные характеристики излучения рентгеновских пульсаров. Дано детальное описание рентгеновской поляриметрии и используемых принципов интерпретации поляризационных измерений. Для нескольких рентгеновских пульсаров продемонстрировано, что фазовая зависимость степени и угла поляризации позволяет судить о механизмах формирования излучения, геометрии излучающих областей и ориентации оси магнитного диполя нейтронной звезды. Измерена степень линейной поляризации, оказавшаяся неожиданно низкой (~10%). Для ряда источников установлено наличие непульсирующей поляризованной компоненты излучения, которая связана с явлением отражения и рассеяния рентгеновского излучения в аккреционных структурах.

Заключение содержит общий вывод и формулировку 9 положений, выносимы на защиту диссертационной работы.

В целом перечисленные и другие полученные в диссертации результаты показывают, что возможные геометрические и физические параметры аккрецирующих нейтронных звёзд могут быть в существенной мере ограничены сравнительным анализом временных, спектральных и поляризационных данных их наблюдений, проведенных в широком диапазоне светимостей. Особо следует отметить проведенный автором подробный анализ данных для случаев низкого темпа аккреции и довольно слабой светимости исследуемых объектов. Тем самым диссертационная работа вносят весомый вклад в детализацию, расширение и выбор допустимых параметров моделей аккреции и процессов энерговыделения, идущих в сверхсильных магнитных полях. Достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку автор использует большой объем независимых данных наблюдений различных рентгеновских телескопов, комплексные методы анализа этих данных и физически оправданные критерии ограничения параметров применяемых простейших моделей рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд.

К сожалению, несмотря на значительный объём диссертации, автору не удалось включить в неё сколько-нибудь глубокую теоретическую разработку высказанных физических гипотез и используемых упрощенных моделей магнитосфер аккрецирующих нейтронных звезд, аккреционных дисков и колонок, хотя большой объем полученных им наблюдательные данным вполне позволяет продвинуться в решении ряда открытых вопросов конкретизации или модификации подобных астрофизических моделей.

Так, в главах 2 и 3 хотелось бы видеть более систематический анализ возможных недипольных структур магнитного поля аккрецирующих нейтронных звезд, поскольку из текста диссертации складывается впечатление о выборочном, неполном рассмотрении конфигураций магнитного поля, позволяющих объяснить данные наблюдений.

Далее, в главе 4 для предложенной модели частично рекомбинированного диска неясным осталось происхождение и физический механизм поддержания вязкости, вероятно турбулентной, этого газового диска и диапазон её характерных значений, требующихся для предложенной интерпретации наблюдательных данных.

Также, хотя представленные результаты подтверждают высоко информативный характер поляризационных рентгеновских наблюдений, полученные на их основе фрагментарные выводы главы 6 свидетельствуют о том, что подобные исследования физики аккреционных процессов и структуры магнитного поля нейтронных звёзд только начинаются и извлеченные богатые данные наблюдений ещё далеко не в полной мере использованы для построения более детальных и обоснованных физических моделей. В частности, явно недостаточным остается уровень понимания наблюдаемой слабой степени линейной поляризации рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звезд.

Впрочем, высказанные замечания не изменяют в целом высокую оценку диссертации, имеющей в основном наблюдательный, а не теоретический характер. Несомненной заслугой автора, характеризующей докторский уровень его работы, является комплексный подход к получению разнообразных наблюдательных данных и их совместному использованию для выяснения физической природы рассматриваемых явлений, что не часто встречается в современных работах по рентгеновской астрономии нейтронных звезд.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно развёрнуто представлены в статьях (всего 33 статьи), которые опубликованы в ведущих атрономических научных журналах, входящих в список ВАК. Эти результаты докладывались и обсуждались на многочисленных международных и отечественных конференциях в 2013–2025 гг. Немаловажным является и то обстоятельство, что С.С. Цыганков принимал участие и непосредственно работал с данными наблюдений целого ряда рентгеновских телескопов, включая NuSTAR, Swift, INTEGRAL, NICER, XMM-Newton, Chandra, RXTE, Спектр-РГ и IXPE.

Диссертация С.С. Цыганкова является профессиональным научным исследованием, содержит важные научные результаты по актуальной тематике, которой автор занимался около 20 лет, и свидетельствует о его высокой научной квалификации. Диссертация написана грамотно и логично, в хорошем научном стиле, хотя и конспективном местами.

С учётом актуальности разработанной темы научной работы, новизны и практической значимости полученных научных результатов для современной ренгеновской астрономии, достоверности и обоснованности сделанных выводов можно констатировать, что диссертация С.С. Цыганкова представляет собой целостное научное исследование в области наблюдательной астрономии и удовлетворяет всем требованиям, которые ВАК предъявляет к докторским диссертациям, а ее автор, Цыганков Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук, академик РАН,
заведующий отделом астрофизики и физики космической плазмы
Института прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН

05.11.2026 Кочаровский Владимир Владиленович

«Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку».

Кочаровский Владимир Владиленович

Подпись В.В. Кочаровского заверяю,
ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н. Корюкин Игорь Валерьевич

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
05.27.03 – Квантовая электроника

Почтовый адрес: 603951, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова Российской академии наук»,
телефон: +7 (831) 416-48-94, E-mail: kochar@ipfran.ru