

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**о диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Штыковского Андрея Евгеньевича**  
**на тему: «Определение характеристик сильнопеременных рентгеновских**  
**пульсаров по данным космических обсерваторий»**  
**по специальности 1.3.1 – «Физика космоса и астрономия»**

Открытые более 50 лет назад рентгеновские пульсары продолжают привлекать внимание исследователей своими разнообразными проявлениями, природа которых не вполне ясна. Это определяется сложностью процессов в аккрецирующих двойных системах с нейтронными звездами и массивными звездными компаньонами, которые могут меняться на различных временных масштабах при изменении темпа аккреции, влияющего на геометрию излучающей области в зависимости от напряженности сверхсильного магнитного поля и скорости вращения нейтронной звезды, геометрии системы и влияния окружающего вещества. Из более чем сотни известных в настоящее время рентгеновских пульсаров, особенно загадочными являются сильнопеременные объекты, на которых сфокусирована рассматриваемая диссертация. Космические рентгеновские обсерватории нового поколения, обладающие высоким спектральным, угловым и временным разрешением и широким спектральным диапазоном, потенциально позволяют достичь более глубокого понимания этих сложных процессов и обнаружить их новые проявления. Тема диссертации безусловно является актуальной.

В работе проведены детальные спектральные и временные исследования 4-х рентгеновских пульсаров, отличающихся сильной вариацией потока рентгеновского излучения на разных временных масштабах. Основные результаты получены на основе новых наблюдений, проведенных на обсерваториях NuSTAR и СРГ, и архивных данных обсерватории RXTE.

Перейдем к рассмотрению положений, выносимых на защиту.

**Положение 1** отражает полученные автором оценки и ограничения на магнитные поля трех рентгеновских пульсаров, которые основаны на впервые обнаруженной линии поглощения, интерпретированной как электронная циклотронная особенность, в спектре пульсара XTE J1829-098, на впервые проведенном измерении частоты излома в спектре мощности временной вариации потока излучения пульсара LMC X-4 и на отрицательных результатах поиска линии поглощения в диапазоне 5-55 кэВ в спектрах пульсаров X1908+075 и LMC X-4. Эти важные результаты получены разными методами и в основном базируются на анализе данных NuSTAR. Циклотронная линия для XTE J1829-098 независимо подтверждена анализом архивных данных RXTE.

**В Положении 2** указывается на обнаружение эффекта подавления пульсаций в системе LMC X-4 во время ее перехода в ультраяркое состояние.

**Замечания к данному пункту.** Следует отметить относящееся к данному пункту детальное исследование профилей импульсов в зависимости от энергии и состояния системы. Из Рис. 11-14 видно, что фаза максимума импульса на всех энергиях значимо сдвигается во время вспышек по сравнению со спокойным состоянием вплоть до 0.4-0.5 величины вращательной фазы. Аналогичная ситуация наблюдается в спокойном состоянии для наблюдений 30102041004 и 30102041006, относящихся к фазам максимума и минимума потоков супер-орбитального периода. Как можно интерпретировать это обстоятельство? Определялось ли значение периода пульсара по сетам наблюдений, содержащих вспышечную активность? В частности, из диссертации следует, что период вращения значимо увеличился в 2015 по отношению к 2021 г. (см. параграфы 1.2.2 и 1.3.3). Не может ли это приводить к ложному изменению фазы импульса?

**Положение 3** основано на исследовании вариации спектров двух пульсаров LMC X-4 и X1908+075 во время их вспышечной активности. Показано, что значимые изменение спектрального потока излучения происходит лишь на энергиях менее 20 кэВ. Несмотря на то, что природа вспышек остается неясной, этот вывод важен для адекватного моделирования данных явлений.

**Замечания к данному пункту.** Для X1908+075 вывод основан на анализе динамических изменений форм импульса на разных энергиях и усиления мягкого вторичного импульса во время вспышек. Неплохо было бы также видеть в явном виде картину спектральной эволюции X1908+075, как она представлена на Рис. 17 для LMC X-4. Заметим, что на этом рисунке отсутствует панель невязок подгонки спектра \*02.1.5 использованной моделью *comptt*.

**Положение 4** связано с исследованием гало вокруг пульсара 4U 1538-52 на основании данных, полученных с помощью СРГ. Путем пространственного и спектрального анализа получены новые параметры гало и подтверждено, что оно образуется путем рассеяния излучения пульсара на пыли.

**Замечания к данному пункту.** Как сказано в Главе 4, посвященной этому исследованию, пульсар наблюдался СРГ на фазе орбитального затмения. Возникает вопрос, почему же он детектируется на данной фазе как АРТ так и eROSITA, как следует из изображений на Рис. 35 и проведенного спектрального анализа излучения пульсара? Что здесь имеется в виду под затмением? Почему в данном исследовании использовались только данные одного модуля eROSITA, TM6? Можно ли что-то сказать о пространственной локализации рассеивающей пыли?

**Положение 5** свидетельствует о независимом определении места формирования флуоресцентной линии железа во внешних областях аккреционного диска для пульсара LMC X-4. Этот результат основан на сопоставлении профиля импульса пульсара и зависимости эквивалентной ширины линии от фазы вращения на разных орбитальных фазах. Он

согласуется с полученными ранее данными по доплеровскому уширению линии.

**Замечания к данному пункту.** Насколько результаты по вариации эквивалентной ширины с фазой вращения, полученные в разделе 1.2.3., согласуются с таковыми в пункте 1.2.7?

В целом в диссертации представлено комплексное исследование рентгеновского излучения 4-х рентгеновских пульсаров на основе новых данных, полученных с высоким отношением сигнал-шум, позволяющим с точностью до нескольких процентов определять спектральные параметры систем и проводить спектроскопию на разных вращательных фазах пульсаров и разных состояниях их вспышечной активности. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне с использованием современных методов обработки и анализа данных и является естественным продолжением исследований рентгеновских пульсаров, проводимых в течении нескольких десятилетий в ИКИ РАН. Положительным моментом также является стремление автора получать максимум информации из полученных данных, рассматривая их с разных сторон. Хотя работа сконцентрирована на наблюдениях, в ней, как правило, приводятся обсуждения возможных интерпретаций полученных результатов. Результаты работы опубликованы в пяти статьях в высокорейтинговых отечественных и зарубежных рецензируемых астрофизических журналах и доложены на ряде научных конференций. Все это определяет достоверность и надежность сделанных выводов.

Помимо приведенных выше замечаний, у меня есть еще ряд вопросов.

1. Из 4-х пульсаров, исследованных в работе по новым данным, только для одного, 4U 1538-52, представлены изображения с указанием апертур, использованных для извлечения спектра источника и фона. Еще одно изображение с указанием апертур представлено на Рис. 33 для XTE J1829 по

архивным данным RXTE. Для полноты изложения было бы крайне желательно представить аналогичные изображения для всех трех пульсаров, наблюдаемых обсерваторией NuSTAR, с информацией о том, менялись ли они для разных сетов наблюдений. Также необходимо указывать скорости счета от источника и фона. На изображениях (Рис. 33, 35 и 38) отсутствуют расшифровки цвета (colour bars) для указания локальной интенсивности излучения.

2. Учитывался ли фон в профилях импульсов и пульсирующих фракциях?
3. С чем связаны пропуски в кривых блеска X1908 на Рис. 19? Почему их не видно на соответствующих панелях на Рис. 24?
4. Нет информации о колонковой плотности поглощающего вещества для ХТЕ J1829. Учитывалась ли она в спектральных фитах?
5. Рис. 35, какой ширины гауссиана использовалась при сглаживании изображения?
6. Видны ли какие-либо изменения в оптике при сверх-эддингтоновских вспышках в рентгене для LMC X-4 и о чем они могли бы свидетельствовать?
7. На Рис. 22 отсутствует верхняя и нижняя панели, указанные в подписи.
8. Таблица 6, какова может быть причина немонотонного изменения периода X1908?
9. Какому  $E(B-V)$  соответствует колонковая плотность поглощающего вещества, полученная из рентгеновского фита для 4U 1558? Наблюдаются или ожидаются ли гало вокруг трех остальных пульсаров?

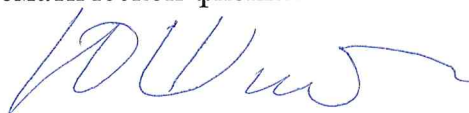
Перечисленные замечания имеют в основном рекомендательный и/или редакционный характер и не умаляют высокой значимости диссертационного исследования.

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в опубликованных работах. Диссертация на тему «Определение характеристик сильнопеременных рентгеновских пульсаров по данным космических

обсерваторий» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и полностью удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013г., а ее автор, А.Е. Штыковский, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 "Физика космоса, астрономия". Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Прикладной математики и математической физики ФТИ им. Иоффе РАН» Шибанов Юрий Анатольевич



04.12.2023

Контактные данные: тел.: 7(812)2927180, e-mail: [shib@astro.ioffe.ru](mailto:shib@astro.ioffe.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01 03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы: 195021 г.С.Петербург, Политехническая ул., д. 26

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
лаборатория Прикладной математики и математической физики  
Тел.: +7 812-2927180; e-mail: [shib@astro.ioffe.ru](mailto:shib@astro.ioffe.ru)



Подпись Шибанова Ю.А. удостоверяю

в отделе кадров ФТИ им. А.Ф. Иоффе

