

Отзыв официального оппонента
на диссертацию **Штыковского Андрея Евгеньевича**

«Определение характеристик сильнопеременных рентгеновских пульсаров по данным космических обсерваторий», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Диссертация А.Е.Штыковского посвящена определению наблюдаемых характеристик и физических параметров сильнопеременных рентгеновских пульсаров и окружающего их вещества в двойных системах по данным наблюдений космических рентгеновских обсерваторий. Несмотря на то, что исследования рентгеновских пульсаров проводятся более пятидесяти лет, целый ряд вопросов, связанных с механизмами формирования излучения в условиях сверхсильных магнитных полей и давлений, а также его взаимодействия с окружающим веществом, остаются открытыми. В частности, изучение процессов вспышечной активности в рентгеновских пульсарах представляется крайне важным, так как позволяет понять механизмы развития нестационарных процессов, приводящих к высвобождению больших запасов энергии за крайне короткий период времени. Исследование наблюдаемых кривых блеска рентгеновских пульсаров, профилей импульса, энергетических спектров, как и изучение эволюции их переменности на разных масштабах с высокой временной и спектральной точностью, позволяют развивать существующие и создавать новые модели излучения сильнозамагниченных звезд в двойных системах. В представленной диссертации проанализированы данные наблюдений четырех сильнопеременных рентгеновских пульсаров с разными типами аккреции, измерены основные спектральные характеристики широкополосного излучения и детально прослежена их эволюция, а также получены оценки величины магнитного поля. Полученные в диссертации характеристики пульсаров и предложенные для их объяснения модели позволяют продвинуться в нашем понимании происходящих физических процессов в массивных рентгеновских двойных системах, что, безусловно, актуально для современной астрофизики высоких энергий.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 102 страницы и включает 40 рисунков, 11 таблиц, а также список литературы из 118 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены основные результаты, выносимые на защиту, и обоснована их научная новизна и практическая

значимость, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В первой главе диссертации исследованы в широком диапазоне энергий (3-79 кэВ) спектральные и временные характеристики рентгеновского пульсара LMC X-4 в Большом Магеллановом Облаке. Используя данные наблюдений космической обсерватории NuSTAR, позволившие получить кривые блеска источника и его высокоточные спектры в спокойном состоянии и в состоянии вспышечной активности, впервые удалось проследить изменения в спектре и форме импульсов при переходе в сверхэдингтоновский режим аккреции. Было установлено, что увеличение светимости во время вспышек более чем на порядок происходит на энергиях ниже 25-30 кэВ и сопровождается изменениями профиля импульса, при этом на более высоких энергиях (30-70 кэВ) поток от источника и форма спектра практически не меняются. Используя метод фазированной спектроскопии, была определена задержка ~ 5 сек между максимумами излучения и эквивалентной шириной флуоресцентной линии железа в зависимости от орбитальной фазы. По величине задержки была получена оценка расстояния $\sim 10^{11}$ см между излучающей областью вблизи нейтронной звезды и областью, в которой происходит отражение излучения. Это расстояние примерно соответствует внешней области аккреционного диска и согласуется с оценкой, полученной ранее из анализа уширения доплеровских линий. Из анализа усредненных и фазовых спектров излучения пульсара LMC X-4 в диапазоне энергий 5-55 кэВ получен предел на оптическую глубину циклотронной линии ~ 0.15 , что в свою очередь указывает на отсутствие циклотронной линии в этом диапазоне и позволяет получить ограничения на величину магнитного поля нейтронной звезды. По измерению частоты слома в спектре мощности исследуемого источника получена оценка величины его магнитного поля $\sim 3 \times 10^{13}$ Гс.

Во второй главе проведено исследование спектральных и временных свойств излучения рентгеновского пульсара X1908+075 в широком диапазоне энергий 3-79 кэВ по данным наблюдений обсерватории NuSTAR. Высокое качество кривых блеска этого пульсара, усредненных и высокоточных спектров, соответствующих разным фазам цикла собственного вращения нейтронной звезды, позволило впервые провести подробный анализ эволюции профиля импульса для состояний с разной интенсивностью в разных энергетических диапазонах. Было установлено, что на энергиях до 10 кэВ наблюдается двухпиковый профиль импульса, а на более высоких энергиях второй пик либо ослабевает, либо исчезает, что указывает на наличие нескольких зон излучения. Как и в первой главе, был проведен анализ усредненных и фазовых спектров излучения пульсара X1908+075 в диапазоне энергий 5-55 кэВ и получен предел на оптическую глубину циклотронной линии ~ 0.16 .

Таким образом, получены указания на отсутствии циклотронной линии в этом диапазоне и ограничения на величину магнитного поля нейтронной звезды.

Третья глава диссертации посвящена обсуждению результатов спектрального и временного анализа рентгеновского пульсара XTE J1829-098, полученных по данным наблюдений телескопа NuSTAR во время вспышки в августе 2018 г. Временной анализ переменности источника позволил обнаружить пульсации с периодом $P=7,84480(2)$ с. Спектральный анализ позволил обнаружить циклотронную резонансную линию на энергии 15 кэВ, что соответствует напряженности магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $1,7 \times 10^{12}$ Гс. Использование метода фазированной спектроскопии, позволило установить, что циклотронная линия регистрируется во всех фазовых спектрах и ее энергия меняется с фазой импульса $\sim 14,3-15,5$ кэВ, при этом наблюдается локальное увеличение доли пульсирующего излучения в области энергии циклотронной линии, что характерно для других пульсаров. Циклотронная линия на этой энергии была также обнаружена в архивных данных обсерватории RXTE. Кроме того, использование данных RXTE позволило получить указание на наличие антикорреляции энергии линии и потока от источника.

В четвертой главе диссертации обсуждаются первые результаты наблюдений области пульсара 4U1538-52, полученные с помощью космической обсерватории SRG в сентябре 2019 г. во время фазы затмения. Вокруг источника в диапазоне энергий 0.5-8 кэВ было зарегистрировано протяженное излучающее гало, наблюдаемая поверхностная яркость которого на больших масштабах хорошо описывается двухкомпонентной моделью, состоящей из плоского диска с радиусом $\sim 250''$ и β -модели с характерным размером $\sim 480''$. Полученный широкополосный спектр в диапазоне энергий 0.5-30 кэВ является типичным для рентгеновских пульсаров и хорошо аппроксимируется степенным законом со слабым поглощением на низких энергиях и экспоненциальным завалом на высоких энергиях. В спектре пульсара 4U1538-52 были обнаружены эмиссионные линии нейтрального и ионизированного железа наряду с линией поглощения на энергии 2,17 кэВ, природа которой до конца не ясна. Высокочувствительные и широкоугольные данные телескопа eROSITA позволили получить детальную карту наблюдаемого протяженного гало и впервые построить его спектр, который оказался существенно мягче по сравнению со спектром самого пульсара, что находится в согласии с моделями рассеяния излучения на пыли.

В Заключении кратко сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

Представленные в диссертации результаты получены на качественно высоком уровне. Проведенные наблюдения, расчеты и моделирование являются существенным шагом в понимании физики массивных тесных рентгеновских систем. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для сравнения с результатами других измерений, для проверки и дальнейшего развития существующих моделей излучения нейтронных звезд в двойных системах, а также для построения моделей рассеяния излучения на пыли. Диссертант продемонстрировал хорошее владение различными методами обработки наблюдательных данных и моделирования. Выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, достоверны и значимы для астрофизики высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня, опубликованы в пяти статьях, в которых соискатель является первым автором.

У оппонента есть несколько вопросов и замечаний к диссертации.

1) В разделе 3.3.2 исследуется эволюция параметров циклотронной линии от фазы профиля импульса. При этом утверждается, что эти изменения связаны с изменением угла, под которым наблюдается область формирования циклотронной линии. Можно ли оценить размер этой области?

2) В положении 1, выносимом на защиту, приведено ограничение на величину магнитного поля нейтронной звезды в системе, полученное из отсутствия циклотронной линии в рассматриваемом диапазоне энергий. Насколько строгим является такое ограничение?

3) В разделе 1.4 используется оценка массы нейтронной звезды в системе LMC X-4 $\sim 1.57 M_{\text{sun}}$, что несколько выше «канонического» значения $1.4 M_{\text{sun}}$. Существуют ли такие оценки для нейтронных звезд в остальных рассматриваемых системах? Какие массы нейтронных звезд использовались в остальных расчетах?

4) Возможно ли, используя приведенную в разделе 4.3 форму профиля гало вокруг источника 4U 1538-52, определить параметры пыли, на которой рассеивается рентгеновское излучение?

Можно отметить в целом понятный стиль изложения диссертации, хотя встречаются опечатки и отсутствие знаков препинания, главным образом во Введении и третьей главе. Включение в текст диссертации хотя бы краткого описания используемых при аппроксимации спектров моделей, а также поясняющих формул, улучшило бы

понимание методов анализа наблюдаемых данных и получаемых оценок физических параметров источников.

Считаю, что диссертация А.Е.Штыковского «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, 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

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук
Ларченкова Татьяна Ивановна

Контактные данные:

тел.: +7(495)333-33-66, e-mail: ltanya@asc.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Адрес места работы:

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

Тел.:+7(499)132-65-54; e-mail: office@lebedev.ru

Подпись сотрудника ФИАН

Т.И.Ларченковой удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН



А.В.Колобов

06.12.2023