

Штыковский Андрей Евгеньевич

**Определение характеристик сильнопеременных
рентгеновских пульсаров по данным космических
обсерваторий**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Научные руководители: **Лутовинов Александр Анатольевич**
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

Арефьев Вадим Александрович
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Шибанов Юрий Анатольевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ведущий научный сотрудник

Ларченкова Татьяна Ивановна,
доктор физико-математических наук,
Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Защита состоится 22 декабря 2023 г., в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при Институте космических исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2023/shtykovsky.htm>.

Автореферат разослан 17 ноября 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.1.481.01,
к.ф.-м.н.

Ткаченко Алексей Юрьевич

Актуальность темы исследования

Идея существования нейтронных звезд – объектов с очень высокой плотностью и малыми радиусами, являющихся одним из конечных этапов эволюции массивных звезд, – была выдвинута еще в 30-е годы прошлого века [1]. После открытия радиопульсаров в 1967 году практически сразу было выдвинуто предположение, что они представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды. Последующее обнаружение пульсаров в Крабовидной туманности и в созвездии Парусов, расположенных в остатках сверхновых, подтвердило гипотезу об образовании нейтронных звезд при взрывах сверхновых.

Открытие обсерваторией *Uhuru* в 1971 году пульсирующих компактных рентгеновских источников [2;3] привело к развитию теории рентгеновских пульсаров – тесных двойных систем с нейтронными звездами (см., например, [4–7]). Дальнейшие оптические и рентгеновские наблюдения позволили подтвердить двойную природу таких систем и определить массы нейтронных звезд в некоторых из них. Тесные двойные системы, в которых масса оптического компаньона превышает несколько масс Солнца (M_{\odot}), называются массивными (НМХВ, от английского High-Mass X-ray Binary). Оптическими компаньонами в них являются звезды ранних спектральных классов (О-В) поэтому в таких системах, как правило, присутствует сильный звездный ветер, но также может формироваться и аккреционный диск (см., например, современный обзор [8] и ссылки там).

Основным механизмом, способным обеспечить наблюдаемые высокие светимости рентгеновских пульсаров ($L_x \sim 10^{36} - 10^{38}$ эрг s^{-1}), является аккреция вещества оптического компаньона на нейтронную звезду с характерным темпом $\dot{M} \sim (10^{-10} - 10^{-8})M_{\odot}$ в год, а пульсации рентгеновского излучения связаны с наличием у нейтронных звезд сильных магнитных полей ($B \sim 10^{11} - 10^{13}$ Гс). Давление магнитного поля останавливает поток вещества с обычной звезды, и далее это вещество падает вдоль силовых линий на поверхность нейтронной звезды в области полюсов магнитного поля. При этом образуются две горячие области, где и формируется наблюдаемое рентгеновское излучение. Спектр этого излучения, как правило, описывается эмпирической степенной моделью с наклоном $\Gamma \sim 0.3 - 2.0$ и экспоненциальным завалом на высоких энергиях ($E_{cut} \sim 7 - 30$ кэВ). Одним из возможных механизмов формирования наблюдаемого степенного спектра является комптонизация мягких фотонов на горячих электронах в радиационно-доминированной ударной волне вблизи поверхности нейтронной звезды [9–11]. В спектрах некоторых пульсаров наблюдаются циклотронные линии поглощения, формирующиеся в результате резонансного рассеяния фотонов на электронах, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля [12]; это позволяет напрямую измерять магнитные поля нейтронных звезд.

Ещё в пионерских работах Баско и Сюняева [13; 14] было показано, что структура аккреционного потока вблизи нейтронной звезды зависит от её

светимости. При малом темпе аккреции, когда светимость L_x не превышает критической величины $L^* \sim 10^{37}$ эрг с^{-1} , вещество свободно падает на поверхность и отдает свою энергию при торможении, формируя на поверхности горячее пятно. При $L_x \geq L^*$ зона ударного торможения поднимается над поверхностью, формируя таким образом аккреционную колонку. Геометрия и форма аккреционной колонки зависят от темпа аккреции и напряженности магнитного поля. Эта модель получила своё дальнейшее развитие в современных работах, в том числе, учитывающих отражение исходящего излучения от поверхности нейтронной звезды [15–17].

От того, какую форму имеют излучающие области и какова диаграмма направленности выходящего излучения, зависит форма наблюдаемого периодического сигнала (профиль импульса). Взаимодействие тепловой высокотемпературной плазмы с сильным магнитным полем в процессе аккреции приводит к формированию определенных конфигураций вещества вблизи компактного объекта и, как следствие, анизотропии рентгеновского излучения. Профили импульса зачастую представлены простой одно- или двухпиковой формой, однако могут встречаться и более сложные формы профилей, в том числе сильно зависящие от энергии и гравитации нейтронной звезды [18; 19].

Таким образом, многообразие и сложность процессов на различных временных масштабах в аккрецирующих двойных системах с нейтронными звездами, присутствие окружающего вещества в экстремальных состояниях по температуре и давлению, сверхсильные магнитные и гравитационные поля, определяют сложность задачи построения физических моделей, описывающих физику процессов, происходящих в рентгеновских пульсарах.

Появление космических обсерваторий нового поколения с фокусирующей рентгеновской оптикой и высокопроизводительными твердотельными детекторами позволило проводить наблюдения в ранее недоступных широких динамических диапазонах рентгеновских потоков на энергиях много больше 10 кэВ с высокими временными, спектральными и пространственными разрешениями. Такие наблюдения позволяют проводить исследования спектральных и временных параметров рентгеновских пульсаров с недоступной ранее точностью, обнаруживать новые состояния этих объектов и существенным образом продвигаться в создании новых и модификации существующих теоретических моделей. В решении этих задач определяющую роль играет измерение с высокой точностью временных и спектральных параметров систем на различных временных масштабах и светимостях, определение физических параметров нейтронных звезд и окружающей их плазмы. Совокупность всех указанных выше факторов определяет актуальность темы проведенного исследования.

Цели диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы являлось определение наблюдаемых характеристик и физических параметров рентгеновских пульсаров и окружающего их вещества в двойных системах по данным космических обсерваторий.

Научная и практическая значимость

Богатая феноменология наблюдательных проявлений рентгеновских пульсаров наряду с высокими регистрируемыми от них потоками излучения, определяет высокий интерес к изучению таких объектов. Исследование кривых блеска пульсаров, профилей импульса, энергетических спектров и их переменности на различных временных масштабах позволяет изучать механизмы формирования излучения в условиях сверхсильных магнитных полей, давлений и температур, и его взаимодействию с окружающей материей, ее состояния на различных пространственных масштабах и т.д. Изучение вспышечной активности представляет большой интерес с точки зрения происходящих в источнике физических процессов, поскольку в нее вовлечено накопление больших запасов энергии, развитие нестационарных процессов, приводящих к высвобождению этой энергии за короткое время, а также сопутствующая динамическая активность пульсара. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы как для сравнения с результатами других измерений, так и для верификации и дальнейшего развития существующих моделей излучения сильномагнитных звезд в двойных системах. Результаты, полученные в диссертации, могут быть востребованы в ИКИ РАН, ГАИШ МГУ, ФТИ им. Иоффе, ФИАН, ИНАСАН, КФУ.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов. Измерены основные спектральные характеристики широкополосного излучения нескольких пульсаров с различными типами аккреции и проведен детальный анализ эволюции их спектральных параметров при различных светимостях и фазах собственного вращения нейтронных звезд; предложены модели, объясняющие наблюдаемые характеристики. Проведен пространственно-разрешенный анализ излучения пульсара 4U1538–52 на угловых масштабах до ~ 8 угловых минут, впервые измерены основные спектральные характеристики гало вокруг этого объекта. Впервые измерено магнитное поле пульсара XTE J1829–098, получены оценки и ограничения на величину магнитного поля нейтронных звезд в системах LMC X–4 и X1908+075.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы были неоднократно представлены на семинарах отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН, всероссийских конференциях «Конференция молодых ученых Фундаментальные и прикладные космические исследования», 2021 г. (Москва, Россия), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», 2017–2022 гг (Москва, Россия), международной конференции «XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии», в рамках симпозиума «The Periodic Table through Space and Time», 2019 г. (Санкт-Петербург, Россия).

Личный вклад автора

Диссертант принимал активное участие на всех этапах работы. Совместно с соавторами диссертант участвовал в постановке задач и выборе методов их решения, анализе экспериментальных данных и интерпретации результатов. По

результатам диссертации было опубликовано 5 статей в рецензируемых научных изданиях. В подготовке и написании каждой статьи диссертант сыграл определяющую роль. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад автора диссертационной работы является основным и определяющим.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Определены магнитные поля для трех рентгеновских пульсаров: в спектре ХТЕ J1829–098 обнаружена циклотронная линия и определена величина магнитного поля нейтронной звезды $B \simeq 1.7 \times 10^{12}$ Гс; по измерению частоты слома в спектре мощности пульсара LMC X–4 получена оценка величины его магнитного поля $B \simeq 3 \times 10^{13}$ Гс; из анализа широкополосного спектра получено ограничение на величину магнитного поля нейтронной звезды в системе X1908+075: $B < 5.6 \times 10^{11}$ Гс или $B > 6.2 \times 10^{12}$ Гс.
2. Обнаружен эффект подавления пульсаций в системе LMC X–4 во время ее перехода в ультраяркое состояние со светимостью $\sim 4 \times 10^{39}$ эрг с^{-1} .
3. Показано, что переменность рентгеновского излучения пульсаров LMC X–4 и X1908+075 на масштабах $10^3 - 10^4$ сек происходит на энергиях $\lesssim 20$ кэВ, что сопровождается соответствующими изменениями спектров.
4. По данным обсерватории СРГ построена модель гало, регистрируемого вокруг пульсара 4U 1538-52 с угловым размером $\sim 8'$, и впервые измерен его спектр, параметры которого согласуются с теоретическими предсказаниями рассеяния рентгеновского излучения на пыли.
5. Для рентгеновского пульсара LMC X–4 независимым образом показано, что флуоресцентная линия нейтрального железа формируется во внешних областях аккреционного диска на расстоянии $\sim 1.5 \times 10^{11}$ см от нейтронной звезды.

Список публикаций в рецензируемых журналах

Результаты работы полностью содержатся в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

- **Штыковский А.Е.**, Лутовинов А.А., Арефьев В.А., Мольков С.В., Цыганков С.С., Ревнивцев М.Г. «Наблюдения рентгеновского пульсара LMC X-4 обсерваторией NuSTAR: ограничение на величину магнитного поля и томография системы в линии железа», Письма в астрономический журнал, 2017, т. 43, № 3, стр. 203
- **Штыковский А.Е.**, Арефьев В.А., Лутовинов А.А., Мольков С.В. «Особенности сверх-эддингтоновских вспышек рентгеновского пульсара LMC X-4 по данным обсерватории NuSTAR», Письма в астрономический журнал, 2018, т. 44, № 3, стр. 173
- **Shtykovsky A.E.**, Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Molkov S.V. «Discovery of a cyclotron absorption line in the transient X-ray pulsar XTE J1829-098», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, v. 482, № 1, p. L14

- **Штыковский А.Е.**, Лутовинов А.А., Арефьев В.А. «Широкополосный анализ ветровой системы X 1908+075 по данным обсерватории NuSTAR», Письма в астрономический журнал, 2022, т. 48, №6, стр. 413
- **Штыковский А.Е.**, Лутовинов А.А., Кривонос Р.А., Гильфанов М.Р., Медведев П.С., Мереминский И.А., Арефьев В.А., Мольков С.В., Сюняев Р.А. «Рентгеновское гало пульсара 4U 1538–52 по данным обсерватории SRG», Письма в астрономический журнал, 2023, т. 49, №5, стр. 335

Содержание работы

Во Введении дается описание современного состояния исследований пульсаров в массивных двойных системах. Кратко рассмотрены основные наблюдательные особенности аккрецирующих пульсаров и теоретические модели, описывающие природу этих объектов. Обоснована актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена исследованию спектральных и временных характеристик рентгеновского пульсара LMC X–4 в широком рентгеновском диапазоне энергий 3–79 кэВ. По данным обсерватории *NuSTAR* наряду с детальным анализом усредненного спектра излучения источника, впервые получены высокоточные спектры, соответствующие разным фазам цикла собственного вращения нейтронной звезды.

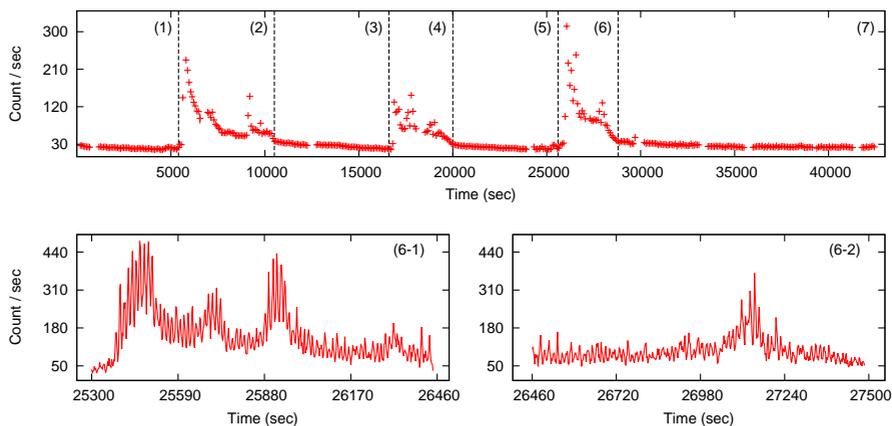


Рис. 1 — Кривая блеска LMC X–4 в которой хорошо видна вспышечная активность источника (верхняя панель); кривая блеска вспышки, интервал (6): основной импульс (нижняя левая панель, 6-1) и послесвечение (нижняя правая панель, 6-2).

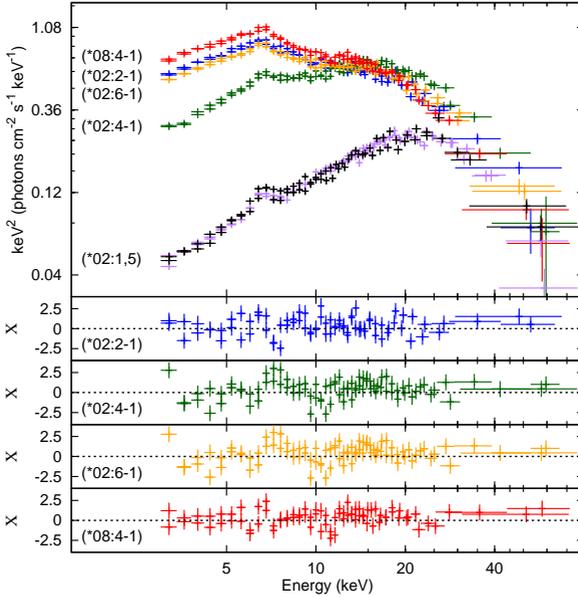


Рис. 2 — Спектры источника LMC X–4 в различных состояниях: красным, синим, желтым и зеленым цветом показаны спектры во вспышках, черным и фиолетовым — в спокойном состоянии.

Представлены результаты исследования сверх-эддингтоновских вспышек (кривая блеска по данным обсерватории *NuSTAR* приведена на Рис. 1). Вспышки представляют собой кратковременные изменения светимости пульсара, которые происходят приблизительно один раз в день (см., например, [20; 21]). Впервые удалось проследить изменения в спектре и форме импульсов пульсара LMC X–4 в диапазоне энергий 3–79 кэВ при переходе в сверх-эддингтоновский режим аккреции. Во время вспышек, при увеличении светимости более $L_x \sim 6 \times 10^{38}$ эрг с^{-1} , наблюдались следующие изменения:

1. профиль импульса в диапазоне энергий 3–40 кэВ становится приблизительно треугольным;
2. доля пульсирующего излучения увеличивается с ростом энергии, достигая 60 – 70% в диапазоне энергий 25–40 кэВ, что существенно превышает значение 6 – 14% в спокойном состоянии;
3. увеличение светимости более, чем на порядок, наблюдается на энергиях ниже ~ 25 кэВ, тогда как на более высоких энергиях ни форма спектра, ни регистрируемый поток практически не меняются (см. Рис. 2).

Одной из задач диссертации было получение оценки на магнитное поле источника. Для решения этой задачи был проведен поиск циклотронной линии в спектре источника. Поиск линии поглощения в усредненном спектре источника

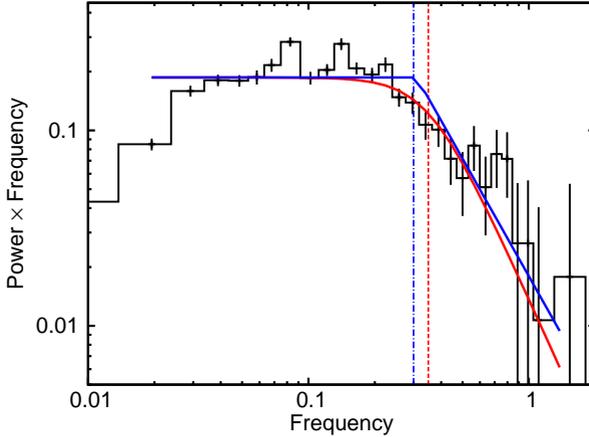


Рис. 3 — Спектр мощности LMC X–4. Сплошной синей линией показан результат наилучшей аппроксимации спектра мощности моделью двух степенных законов ($\alpha_2 = -2$, $f_{br} = 0.3$ Гц), сплошной красной линией – моделью Кинга ($\alpha = -2.5$, $f_{br} = 0.35$ Гц). Вертикальными линиями показаны соответствующие положения частот излома: $f_{br} = 0.3$ Гц (штрихпунктирная линия) и $f_{br} = 0.35$ Гц (штриховая линия).

производился в диапазоне энергий 5–55 кэВ для различных возможных ширин линии в диапазоне от 2 до 8 кэВ. Полученный верхний предел на ее оптическую глубину $\simeq 0.15$ свидетельствует об отсутствии такой особенности в указанном диапазоне энергий. Этот результат позволяет получить ограничение на возможную величину магнитного поля на поверхности нейтронной звезды в системе LMC X–4: $B < 5.9 \times 10^{11}$ Гс или $B > 6.5 \times 10^{12}$ Гс.

В работах [22; 23] была продемонстрирована возможность использования свойств спектра мощности излучения рентгеновских пульсаров для определения напряженности магнитного поля нейтронной звезды. Этот метод основан на равенстве частоты излома в спектре мощности и кеплеровской частоты обращения вещества на внутреннем крае аккреционного диска [22]. Таким образом, используя зарегистрированные в спектре мощности LMC X–4 частоты излома $f_{br} \simeq 0.30\text{--}0.35$ Гц (Рис. 3), можно получить оценку на радиус магнитосферы $R_m \sim (3.5 - 3.9) \times 10^8$ см и провести оценку величины магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B \simeq (2.7 - 3.2) \times 10^{13}$ Гс. Такие значения соответствуют энергии возможной циклотронной линии 230–270 кэВ и допускаются нижним пределом, полученным из анализа энергетического спектра пульсара.

По результатам анализа фазовых спектров источника был обнаружен фазовый сдвиг эквивалентной ширины линии железа по сравнению с максимумом излучения. Была получена оценка величины этого фазового сдвига $\Delta\phi \sim 0.4$. Таким образом, время задержки с учетом периода собственного вращения пульсара $P_{spin} \simeq 13.5$ с составило $\Delta\tau \sim 5$ с. Оценка расстояния, которое пройдет поток фотонов за это время, составляет $\sim 1.5 \times 10^{11}$ см, что примерно соответствует области внешнего радиуса аккреционного диска и согласуется с оценкой, сделанной по анализу уширения доплеровских линий, приведенной в работе [24].

Вторая глава диссертации посвящена исследованию спектральных и временных свойств излучения рентгеновского пульсара X1908+075 в широком рентгеновском диапазоне энергий 3–79 кэВ по данным обсерватории *NuSTAR* в июле 2015 г. и апреле 2019 г.. Все наблюдения проводились при одной орбитальной фазе $\Psi_{orb} \sim 0.5$ (с минимальным внутренним поглощением) и различных фазах суперорбитального цикла пульсара ($\Psi_{sup} \sim 0.09, 0.69$ и 0.99). Наряду с детальным анализом усредненного спектра излучения источника были получены высокоточные спектры, соответствующие разным фазам цикла собственного вращения нейтронной звезды.

Аналогично пульсару LMC X–4, для всех спектров источника X1908+075 (усредненных и фазовых), в диапазоне энергий 5–55 кэВ был проведен поиск циклотронной линии поглощения. Полученный верхний предел на оптическую глубину циклотронной линии $\tau \sim 0.16$ указывает на отсутствие такой особенности в указанном диапазоне энергий, что позволило получить ограничение на величину магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B < 5.6 \times 10^{11}$ Гс или $B > 6.2 \times 10^{12}$ Гс.

Высокое качество наблюдательных данных позволило впервые провести подробный анализ эволюции профиля импульса в различных диапазонах энергий, в том числе, в зависимости от интенсивности источника. Профиль импульса на энергиях до 10 кэВ имеет выраженную двухпиковую форму. На более высоких энергиях вторичный пик профиля импульса заметно слабее, либо совсем отсутствует (см. Рис. 4). Форма импульса сохраняется во всех наблюдениях, что указывает на её независимость от фазы суперорбитального цикла.

По итогам анализа широкополосных данных X1908+075 было показано, что:

1. эволюция светимости источника приводит к эволюции профиля импульса в области энергий 3-10 кэВ, на энергиях выше 10 кэВ форма профиля изменяется слабо;
2. кратковременные увеличения светимости X1908+075, регистрируемые в кривых блеска, приводят к появлению вторичного пика в противофазе к основному (на энергиях < 10 кэВ).

В третьей главе диссертации приведены результаты спектрального и временного анализа рентгеновского пульсара XTE J1829–098 по данным, полученным обсерваторией *NuSTAR* во время вспышки в августе 2018 г.

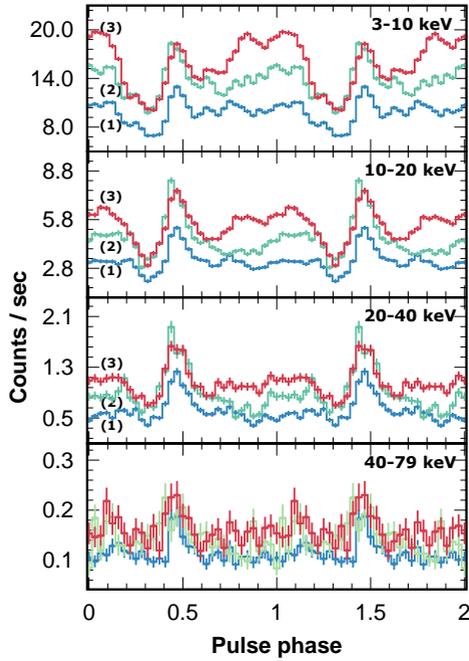
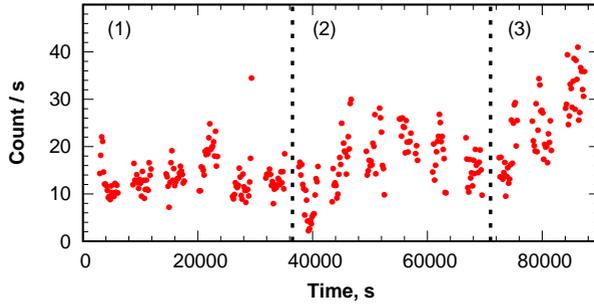


Рис. 4 — Верхняя панель: кривая блеска пульсара X1908+075 в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ. Нижняя панель: профили импульсов X1908+075, извлеченные для разных интенсивностей кривой блеска (интервалы (1), (2) и (3), см. верхнюю панель) в энергетических диапазонах 3–10, 10–20, 20–40 и 40–79 кэВ.

Анализ переменности излучения источника показал наличие пульсаций с периодом $P = 7.84480(2)$ с.

В спектре источника была обнаружена особенность поглощения на энергии $E_{\text{cyc}} \sim 15$ кэВ. Эта особенность была интерпретирована как циклотронная резонансная линия поглощения, соответствующая напряженности магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B \sim 1.7 \times 10^{12}$ Гс. Фазированная спектроскопия показала, что циклотронная линия регистрируется во всех фазовых спектрах, а её энергия и другие параметры изменяются с профилем импульса. Вариации параметров циклотронной линии могут быть объяснены изменением угла, под которым наблюдается область формирования циклотронной линии.

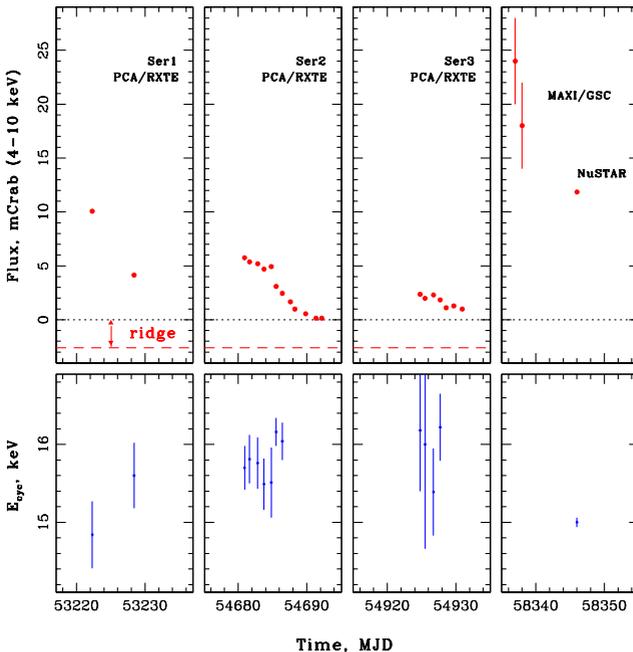


Рис. 5 — Верхние панели: эволюция потока ХТЕ J1829–098 во время четырех эпизодов активности. Нижние панели: измеренные значения энергии циклотронной линии.

Было проведено исследование изменения доли пульсирующего излучения, которое показало общий рост доли пульсирующего излучения с энергией. Также было обнаружено локальное увеличение доли пульсирующего излучения в области энергий, где зарегистрирована циклотронная линия. Подобные особенности наблюдались ранее для нескольких других рентгеновских пульсаров.

С использованием архивных данных обсерватории *RXTE*, было независимо подтверждено наличие циклотронной линии в спектре ХТЕ J1829–098 и

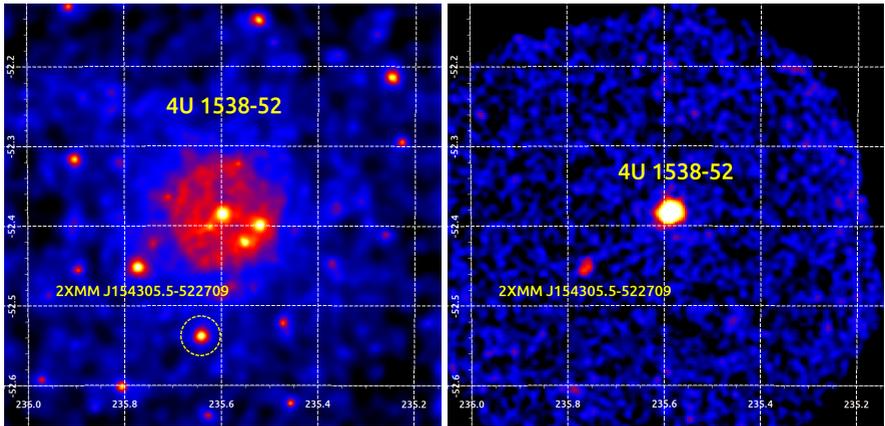


Рис. 6 — Левая панель: изображение области неба вблизи пульсара 4U1538–52 в экваториальной системе координат по данным *СПГ/eРОЗИТА* (диапазон энергий 0.5–8.0 кэВ). Правая панель: изображение того же участка неба по данным *СПГ/ART–XC* (4–30 кэВ). Изображения были сглажены функцией Гаусса для лучшего отображения.

обнаружено указание на возможные вариации энергии линии с потоком (см. Рис. 5).

В четвертой главе представлены первые результаты наблюдения области пульсара 4U1538–52 по данным, полученным обсерваторией *СПГ* во время калибровочной фазы в сентябре 2019 г. Анализ орбитальной фазы показал, что пульсар наблюдался во время затмения. Особенностью данного пульсара является малая величина колонки поглощения во время затмения [25]. В диапазоне энергий 0.5–8.0 кэВ вокруг источника было зарегистрировано протяженное излучение в виде гало (см. Рис. 6).

Благодаря широкому полю зрения и высокой чувствительности телескопа *eРОЗИТА* удалось получить подробную карту гало вокруг источника 4U1538–52 в диапазоне энергий 0.5–8.0 кэВ до радиуса примерно $8'$. Проведенное моделирование показало, что распределение поверхностной яркости гало может быть описано двухкомпонентной моделью, составленной из плоского диска радиусом $\sim 250''$ и β -модели с характерным размером $\sim 480''$ (см. Рис. 7).

С использованием данных телескопов *eРОЗИТА* и *ART–XC* построен широкополосный спектр 4U1538–52 в диапазоне энергий 0.5–30.0 кэВ, который хорошо описывается слабо поглощенным ($N_H \sim 0.7 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$) степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях. Кроме того, в спектре пульсара регистрируются эмиссионные линии железа в области энергий 6–7 кэВ. Также по данным телескопа *eРОЗИТА* в кольцевом регионе с радиусами 80–250'' был построен спектр гало. Наблюдаемый спектр гало получился существенно мягче (показатель степенного закона $\Gamma \sim 2.8$) спектра пульсара ($\Gamma \sim 0.9$), что

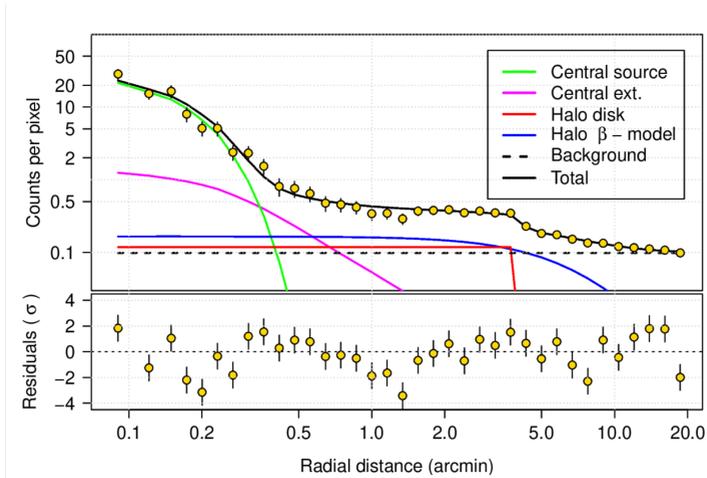


Рис. 7 — Радиальный профиль гало 4U1538–52 в отсчетах на элемент изображения по данным *СРГ/еРОЗИТА*, диапазон энергий 0.5–8.0 кэВ.

согласуется с предсказаниями теоретических моделей рассеяния излучения на пыли.

В заключении приведены основные положения, выносимые на защиту.

Литература

1. Baade W., Zwicky F. On Super-novae // *Proceedings of the National Academy of Science*. — 1934. — may. — Vol. 20, no. 5. — Pp. 254–259.
2. Oda M., Gorenstein P., Gursky H. et al. X-Ray Pulsations from Cygnus X-1 Observed from UHURU // *ApJ*. — 1971. — may. — Vol. 166. — P. L1.
3. Giacconi R., Gursky H., Kellogg E. et al. Discovery of Periodic X-Ray Pulsations in Centaurus X-3 from UHURU // *ApJ*. — 1971. — jul. — Vol. 167. — P. L67.
4. Pringle J. E., Rees M. J. Accretion Disc Models for Compact X-Ray Sources // *A&A*. — 1972. — oct. — Vol. 21. — P. 1.
5. Gnedin Yu. N., Sunyaev R. A. The Beaming of Radiation from an Accreting Magnetic Neutron Star and the X-ray Pulsars // *A&A*. — 1973. — jan. — Vol. 25. — P. 233.
6. Ghosh P., Lamb F. K. Disk accretion by magnetic neutron stars. // *ApJ*. — 1978. — jul. — Vol. 223. — Pp. L83–L87.
7. White N. E., Swank J. H., Holt S. S. Accretion powered X-ray pulsars. // *ApJ*. — 1983. — jul. — Vol. 270. — Pp. 711–734.
8. Kretschmar Peter, Fürst Felix, Sidoli Lara et al. Advances in Understanding High-Mass X-ray Binaries with INTEGRAL and Future Directions // *New Astron. Rev.*. — 2019. — dec. — Vol. 86. — P. 101546.
9. Sunyaev R. A., Titarchuk L. G. Comptonization of X-Rays in Plasma Clouds - Typical Radiation Spectra // *A&A*. — 1980. — jun. — Vol. 86. — P. 121.
10. Titarchuk Lev, Lyubarskij Yuriy. Power-Law Spectra as a Result of Comptonization of the Soft Radiation in a Plasma Cloud // *ApJ*. — 1995. — sep. — Vol. 450. — P. 876.
11. Becker Peter A., Wolff Michael T. A Generalized Analytical Model for Thermal and Bulk Comptonization in Accretion-powered X-Ray Pulsars // *ApJ*. — 2022. — nov. — Vol. 939, no. 2. — P. 67.
12. Staubert R., Trümper J., Kendziorra E. et al. Cyclotron lines in highly magnetized neutron stars // *A&A*. — 2019. — feb. — Vol. 622. — P. A61.
13. Basko M. M., Sunyaev R. A. Radiative transfer in a strong magnetic field and accreting X-ray pulsars. // *A&A*. — 1975. — sep. — Vol. 42, no. 3. — Pp. 311–321.
14. Basko M. M., Sunyaev R. A. The limiting luminosity of accreting neutron stars with magnetic fields. // *MNRAS*. — 1976. — may. — Vol. 175. — Pp. 395–417.

15. *Poutanen Juri, Mushtukov Alexander A., Suleimanov Valery F. et al.* A Reflection Model for the Cyclotron Lines in the Spectra of X-Ray Pulsars // *ApJ*. — 2013. — nov. — Vol. 777, no. 2. — P. 115.
16. *Mushtukov A. A. et al.* The critical accretion luminosity for magnetized neutron stars // *MNRAS*. — 2015. — feb. — Vol. 447, no. 2. — Pp. 1847–1856.
17. *Postnov K. A., Gornostaev M. I., Klochkov D. et al.* On the dependence of the X-ray continuum variations with luminosity in accreting X-ray pulsars // *MNRAS*. — 2015. — sep. — Vol. 452, no. 2. — Pp. 1601–1611.
18. *Lutovinov A. A., Tsygankov S. S.* Timing characteristics of the hard X-ray emission from bright X-ray pulsars based on INTEGRAL data // *Astronomy Letters*. — 2009. — jul. — Vol. 35, no. 7. — Pp. 433–456.
19. *Mushtukov Alexander A., Verhagen Patrick A., Tsygankov Sergey S. et al.* On the radiation beaming of bright X-ray pulsars and constraints on neutron star mass-radius relation // *MNRAS*. — 2018. — mar. — Vol. 474, no. 4. — Pp. 5425–5436.
20. *Levine Alan M., Rappaport Saul A., Zojcheski Goce.* Orbital Decay in LMC X-4 // *ApJ*. — 2000. — sep. — Vol. 541, no. 1. — Pp. 194–202.
21. *Moon Dae-Sik, Eikenberry Stephen S., Wasserman Ira M.* The Evolution of LMC X-4 Flares: Evidence for Super-Eddington Radiation Oozing through Inhomogeneous Polar Cap Accretion Flows? // *ApJ*. — 2003. — apr. — Vol. 586, no. 2. — Pp. 1280–1296.
22. *Revnivtsev M. G. et al.* Quenching of the strong aperiodic accretion disk variability at the magnetospheric boundary // *A&A*. — 2009. — dec. — Vol. 507, no. 3. — Pp. 1211–1215.
23. *Tsygankov S. S., Krivonos R. A., Lutovinov A. A.* Broad-band observations of the Be/X-ray binary pulsar RX J0440.9+4431: discovery of a cyclotron absorption line // *MNRAS*. — 2012. — apr. — Vol. 421, no. 3. — Pp. 2407–2413.
24. *Neilsen J. et al.* Spectroscopic Signatures of the Superorbital Period in the Neutron Star Binary LMC X-4 // *ApJ*. — 2009. — may. — Vol. 696, no. 1. — Pp. 182–191.
25. *Aftab Nafisa, Paul Biswajit, Kretschmar Peter.* X-Ray Reprocessing: Through the Eclipse Spectra of High-mass X-Ray Binaries with XMM-Newton // *ApJS*. — 2019. — aug. — Vol. 243, no. 2. — P. 29.