
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Кафедра космической физики

Направление подготовки / специальность: 03.04.01 Прикладная математика и физика

Направленность (профиль) подготовки: Общая и прикладная физика

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЫШЕК В РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С ВЕТРОВОЙ АККРЕЦИЕЙ

(магистерская диссертация)

Студент:

Сатыбалдиев Максат Нурланович

(подпись студента)

Научный руководитель:

Мереминский Илья Александрович,
канд. физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2023

Аннотация

В некоторых массивных рентгеновских двойных системах наблюдается аккреция плотного звездного ветра оптического компаньона. Характер проявлений этих систем зависит от параметров ветра и компактного объекта, а также от геометрии системы. Изучение разнообразия таких систем важно для понимания физики нейтронных звезд, звездной эволюции и процессов, происходящих при аккреции в массивных двойных системах.

IGR J16195-4945 и 3A 1954+319 являются представителями систем с ветровой аккрецией. IGR J16195-4945 относится к классу быстрых рентгеновских транзиентов со звездами-сверхгигантами, а 3A 1954+319 к редкому классу систем с красными сверхгигантами. Оба источника демонстрируют переменность в рентгеновском диапазоне на масштабах 10-1000 секунд.

Данная работа посвящена изучению этих систем на основе данных, полученных телескопами ART-XC и NuSTAR. Наблюдаемые всплески от исследуемых источников сравниваются и интерпретируются в рамках модели квазисферической дозвуковой оседающей аккреции.

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 1. Нестационарная аккреция звездного ветра | 8 |
| 1.1. Быстрые рентгеновские транзиенты | 8 |
| 1.2. Квазисферическая дозвуковая оседающая аккреция | 9 |
| 1.3. Применение модели к разным классам НМХВ | 11 |
| 2. Телескопы | 12 |
| 2.1. СРГ/ART-XC им. М.Н. Павлинского | 14 |
| 2.2. NuSTAR | 15 |
| 3. Методы | 16 |
| 3.1. Поиск периодичностей | 16 |
| 3.2. Байесовы блоки | 18 |
| 4. Результаты | 20 |
| 4.1. IGR J16195-4945 | 20 |
| 4.1.1. Об источнике | 20 |
| 4.1.2. Наблюдения | 21 |
| 4.1.3. Временной анализ | 21 |
| 4.1.4. Спектральный анализ | 23 |
| 4.1.5. Характеристика всплесков | 24 |
| 4.1.6. Инфракрасная переменность | 25 |
| 4.1.7. Заключение | 27 |
| 4.2. 3A 1954+319 | 28 |
| 4.2.1. Об источнике | 28 |
| 4.2.2. Наблюдения | 29 |
| 4.2.3. Временной анализ | 29 |
| 4.2.4. Спектральный анализ | 30 |
| 4.2.5. Характеристика всплесков | 31 |
| 4.2.6. Заключение | 33 |
| Заключение | 34 |
| Благодарности | 36 |
| Список литературы | 37 |

Введение

Рентгеновская астрофизика является интересной и многогранной наукой. Все более сложные и уникальные наблюдаемые астрофизические феномены представляют собой удивительную, сложную комбинацию разнообразных физических явлений, начиная от квантовых эффектов до проявлений общей теории относительности. Эти "грязные" лаборатории, включающие множество объектов и эффектов, становятся источником удивительных открытий и знаний о нашей Вселенной. Исследование и наблюдение таких феноменов требуют комплексного подхода и использования передовых технологий. Каждое новое поколение телескопов становится все более совершенным, чувствительным, сложным, а объем собираемых данных неуклонно растет. Для их обработки применяются различные математические методы - от классических статистических алгоритмов до передовых методов машинного обучения.

Одним из основных предметов исследования в рентгеновской астрофизике являются рентгеновские двойные системы, с которых в 1962 году началась история рентгеновской астрономии, когда был открыт первый рентгеновский источник за пределами Солнечной системы - Sco X-1 (Giacconi et al., 1962). Первое время природа этого объекта была не понятна, но вскоре было показано (Shklovsky, 1967), что яркое рентгеновское излучение может порождаться в двойных системах за счет аккреции - падения вещества на массивный компактный объект.

Итак, рентгеновские двойные - это такие системы, в которых одной из звезд является нейтронная звезда или черная дыра, которая аккрецирует вещество со второй обычной звезды. Они делятся на две категории: маломассивные (Low Mass X-ray Binaries, LMXBs) и массивные рентгеновские двойные (High Mass X-ray Binaries, HMXBs). В LMXB (см. обзор Sazonov et al., 2020) вещество со звезды-донора, массой $\lesssim 1M_{\odot}$ и заполнившей свою полость Роша, формируя аккреционный диск (Shakura, Sunyaev, 1973), излучающий в рентгеновском диапазоне, падает на компактный объект. В отличие от LMXB, возраст которых оценивается в $\sim 10^9$ лет, HMXB являются сравнительно молодыми (см. обзор Walter et al., 2015). Это связано с тем, что в HMXB звёздами-донорами являются горячие голубые звезды время жизни которых не превосходит $\sim 10^7$ лет.

HMXB в свою очередь разделяются на рентгеновские двойные со сверхгигантами (Supergiant X-ray Binaries, SgXB) и Be двойные системы, где донором является Be звезда.

По наблюдательным проявлениям НМХВ можно условно разделить на "постоянные" (persistent) и транзиентные. Для "постоянных" систем ($L_X > 10^{35}$ эрг s^{-1}) необходим непрерывный и интенсивный источник энергии, то есть необходим высокий темп аккреции. Это может обеспечиваться, например, в системах с аккрецией сильного звездного ветра, светимость которых составляет $\sim 10^{35} - 10^{37}$ эрг s^{-1} , либо в системах с перетеканием вещества через заполненную полость Роша ($> 10^{38}$ эрг s^{-1}). Обычно в таких объектах орбитальный период не превосходит ~ 10 дней. Сильная переменность излучения может возникать в системах с большим эксцентриситетом орбиты. В Ве-системах нейтронная звезда, вращающаяся по эллиптической орбите с эксцентриситетом $e \sim 0.3 - 0.5$ и периодом 30-100 дней, при прохождении периастро может аккрецировать вещество околозвездного диска Ве-компаньона, производя яркие рентгеновские вспышки первого типа со светимостью $\sim 10^{36} - 10^{37}$ эрг s^{-1} (Okazaki, Negueruela, 2001).

Также переменность может быть связана с взаимодействием звездного ветра с нейтронной звездой. Особенно ярко это наблюдается в быстрых рентгеновских транзиентах со сверхгигантами (Supergiant Fast X-ray Transients, SFXTs). SFXT характерны своими спорадическими всплесками длительностью в несколько тысяч секунд, во время которых светимость увеличивается в $\gtrsim 10$ раз.

Случайность времени происхождения вспышек и низкая средняя светимость усложняют изучение SFXT. Необходимы длительные наблюдения чувствительными телескопами за такими объектами. Одно из таких наблюдений было проведено одним из телескопов обсерватории Спектр-РГ – ART-XC – за объектом IGR J16195-4945, относящемуся к классу SFXT.

Среди SgXB выделяется редкий класс рентгеновских двойных с красными сверхгигантами (Red Supergiant, RSG). В таких системах тоже протекает аккреция звездного ветра и наблюдается быстрая переменность. На данный момент в нашей Галактике известно всего три системы в которых звездой донором является красный сверхгигант: 3A 1954+319, Scutum X-1 и CXO 174528.79290942.8. RSG НМХВ являются редкими из-за короткого времени жизни красных сверхгигантов, но представляют особый интерес с точки зрения звездной эволюции, перехода от массивных двойных к двойным, состоящим из двух компактных объектов.

Резюмируя вышесказанное можно сказать, что исследование переменных НМХВ важно для понимания нейтронных звезд, аккреционных процессов, звездной эволюции, структуры и взаимодействия звездного ветра.

На сегодняшний день в SFXT и RSG НМХВ системах не совсем понятно в каком режиме в них протекает аккреция. Наблюдения и исследования таких систем может способствовать более глубокому пониманию нестационарной аккреции в рентгеновских двойных системах.

Целью настоящей работы являлось проведение анализа двух рентгеновских систем IGR J16195-4945 (SFXT) и 3A 1954+319 (RSG НМХВ) по данным телескопов

ART-XC и NuSTAR. Также стояла задача исследования наблюдаемых у рассматриваемых систем иррегулярных всплесков, их описания моделью квазисферической дозвуковой оседающей аккреции и сравнения с другими известными системами.

В главе 1 дается введение и описание основных моделей нестационарной ветровой аккреции. Основные использованные телескопы и принципы их работы описаны в главе 2. Описание методов дано в главе 3 В главе 4 представлены результаты исследования. В заключении подводятся итоги проделанной работы.

Глава 1

Нестационарная аккреция звездного ветра

1.1 Быстрые рентгеновские транзиенты

SFXT, как уже было упомянуто выше, примечательны своими случайными яркими рентгеновскими всплесками. Во время всплесков светимости достигают значений $10^{35} - 10^{37}$ эрг с^{-1} . Между всплесками, большую часть времени, системы находятся в низком состоянии с $L_X \sim 10^{32} - 10^{34}$ эрг с^{-1} . Основной интерес к таким объектам заключается в исследовании физического механизма, который определяет быструю переменность, наблюдаемую в этих системах.

Самой простой и интуитивной моделью является прямая аккреция массивных сгустков звездного ветра на компактный объект (in't Zand, 2005; Walter, Zurita Heras, 2007). Однако, оцениваемая масса сгустков оказывается $\sim 10^{21} - 10^{23}$ г, что сильно больше наблюдаемых значений $\lesssim 10^{18}$ г (Martínez-Núñez et al., 2017).

Также предполагалось, что вспышечное поведение SFXT может проявляться из-за сильно-эллиптической орбиты нейтронной звезды и неоднородного звездного ветра сверхгиганта (как в Ве-системах) (Sidoli et al., 2007). Эта идея была оспорена с открытием SFXT с короткими орбитальными периодами.

Более сложными являются модели центробежной и/или магнитосферной блокировки аккреции на нейтронную звезду и ее, происходящее время от времени, снятие. Такие механизмы блокировки зависят от периода вращения нейтронной звезды и величины магнитного поля. Для центробежной блокировки требуются нейтронные звезды со стандартным магнитным полем $\sim 10^{12}$ Гс и коротким периодом вращения ~ 10 с, а для магнитосферной блокировки НЗ должна обладать магнитароподобными полями $\sim 10^{14}$ Гс и периодом вращения ~ 1000 с. Эти механизмы препятствуют падению вещества на НЗ большую часть времени, но столкновение с плотным сгустком ветра может спровоцировать снятие барьера, вызвав яркую вспышку. Подобные периоды в диапазоне $\sim 10 - 1000$ секунд действительно наблюдаются у многих SFXT (см. диаграмму Корбета Sidoli, 2017). А вот магнитные поля SFXT измерены только

для нескольких систем и лежат в области $\sim 10^{11} - 10^{12}$ Гс. Сложность измерений заключается в том, что единственным прямым методом измерения магнитного поля является наблюдение циклотронных линий. Все остальные методы лишь косвенно оценивают величины магнитных полей.

Для систем с рентгеновской светимостью $< 4 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} возможна так называемая квазисферическая дозвуковая оседающая аккреция.

1.2 Квазисферическая дозвуковая оседающая аккреция

При аккреции звездного ветра на нейтронную звезду существует критическая светимость $L_{crit} \simeq 4 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} (Shakura et al., 2012), разделяющая два режима аккреции. При $L > L_{crit}$ происходит сверхзвуковая аккреция Бонди (Бонди-Хойла-Литлттона; Bondi, 1952), когда время комптоновского или радиативного охлаждения падающей плазмы меньше времени свободного падения. В противном случае, при низких светимостях $L < L_{crit}$, происходит дозвуковая квазисферическая аккреция, с формированием горячей конвективной оболочки вокруг магнитосферы нейтронной звезды. Темп такой аккреции меньше темпа аккреции Бонди \dot{M}_B и равен $\dot{M} = f(u)\dot{M}_B$, $f(u) \sim [t_{ff}(R_A)/t_{cool}(R_A)]^{1/3}$, где $t_{ff}(R_A)$, $t_{cool}(R_A)$ - характерные времена свободного падения и охлаждения плазмы на Альфвеновской поверхности R_A . Необходимые условия для оседающей аккреции удовлетворяются в низких состояниях SFXT.

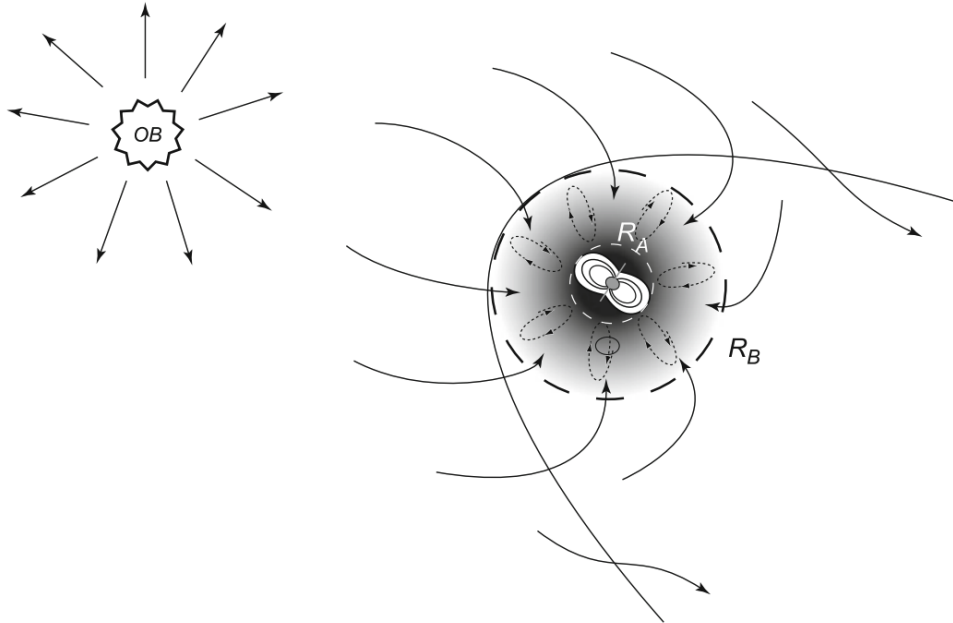


Рис. 1. Схема квазисферической дозвуковой аккреции звездного ветра на замагниченную нейтронную звезду. Изображение взято из Shakura et al. 2013

Оценка массы квазисферической оболочки для типичных параметров SFXT дает значение $\sim 10^{18} - 10^{20}$ грамм (см. Shakura et al., 2014), соответствующее энергосвы-

делению $\sim 10^{38} - 10^{40}$ эрг. Такое же энерговыделение наблюдается у многих SFXT во время вспышек ($L_X > 10^{36}$ эрг с^{-1}), причем время свободного падения с радиуса Бонди (внешнего радиуса оболочки) $t_{ff}(R_B) \sim 1000$ с совпадает с характерными длительностями вспышек. Это значит, что яркие наблюдаемые вспышки могут быть вызваны быстрым сжатием всей оседающей оболочки.

Быстрое сжатие представляет собой переход из режима оседания в режим аккреции Бонди. Триггером такого перехода является развитие Рэлей-Тейлоровской неустойчивости (RTI), которая может возникать из-за пересоединения магнитных силовых линий при захвате замагниченного звездного ветра, при ярких вспышках, или из-за флуктуаций плотности или скорости звездного ветра, при серии вспышек.

RTI неустойчивость, приводящая к проникновению плазмы в магнитосферу, возникает когда время охлаждения становится меньше времени свободного падения с радиуса Бонди $t_{cool} < t_{ff} \sim 300 - 1000$ с. Из данного неравенства следуют оценки зависимостей характеристик возникающих всплесков (см. выводы в Sidoli et al., 2019):

-зависимость времени ожидания всплеска ΔT от светимости до него ($L_{X,pre}$):

$$\Delta T \approx 130[\text{с}] \left(\frac{\alpha}{0.03} \right) A \zeta^{2/9} \mu_{30}^{2/3} \dot{M}_{16}^{-1}, \quad (1)$$

-энергии, выделенной во время всплеска, ΔE от длительности всплеска Δt :

$$\Delta E \approx 3 \times 10^{35} [\text{эрг } \text{с}^{-1}] \left(\frac{\alpha}{0.03} \right) A \zeta^{2/9} \mu_{30}^{2/3} v_8^3 \Delta t, \quad (2)$$

-времени нарастания всплеска δt_{rise} от светимости перед всплеском $L_{X,pre}$:

$$\delta t_{rise} \simeq 30[\text{с}] \zeta^{4/27} \mu_{30}^{7/9} \dot{M}_{16}^{-2/3}, \quad (3)$$

-отношения выделенной энергии ко времени ожидания всплеска $\Delta E/\Delta T$:

$$\frac{\Delta E}{\Delta T} = 10^{36} [\text{эрг } \text{с}^{-1}] \dot{M}_{16}, \quad (4)$$

где темп аккреции, измеренный до всплеска, $\dot{M}_X = 10^{16} [\text{Гс}^{-1}] \dot{M}_{16}$ связан со светимостью как $L_{X,pre} = 0.1 \dot{M}_X c^2$, $\alpha \sim 0.03$ - безразмерный параметр, определяющий скорость роста зоны перемешивания на нелинейной стадии, $A \lesssim 1$ - число Этвуда, $\zeta \lesssim 1$ - безразмерный параметр, характеризующий размер зоны в которой развивается RTI в единицах радиусов магнитосферы R_m , $\mu = 10^{30} [\text{Гс см}^3] \mu_{30}$ - магнитный момент нейтронной звезды, $v = 10^8 [\text{см } \text{с}^{-1}] v_8$ - скорость звездного ветра.

1.3 Применение модели к разным классам НМХВ

Изначально модель квазисферической дозвуковой оседающей аккреции разрабатывалась применительно к медленно вращающимся рентгеновским пульсарам. Позднее модель нашла применение в описании вспышечной активности SFXT. Например, в работе Sidoli et al. 2019 был проведен анализ девяти SFXT по многолетним данным обсерватории XMM-Newton. Исследовались временные и энергетические характеристики всплесков от рассматриваемых систем. Параметры всплесков сравнивались с предсказаниями, полученными в рамках модели оседающей аккреции.

Кроме SFXT существует еще один интересный класс рентгеновских двойных - системы с красными сверхгигантами - в которых может происходить аккреция вещества из плотного звездного ветра. Одной из таких систем является 3A 1954+319, у которой наблюдаются иррегулярные вспышки и значительные изменения пятичасового периода пульсаций (Marcu et al., 2011). Средняя рентгеновская светимость системы удовлетворяет условию протекания оседающей аккреции. Модель оседающей аккреции помимо всего также предсказывает отвод углового момента нейтронной звезды оседающей оболочкой (Shakura et al., 2012). По этой причине, было интересно сравнить описание наблюдаемых у 3A 1954+319 всплесков (хоть не таких ярких и длинных как у SFXT) моделью оседающей аккреции с наблюдениями. Подробнее это описывается в части 4.2.5.

Глава 2

Телескопы

Известно, что атмосфера нашей планеты непрозрачна для всей рентгеновской части электромагнитного спектра (см. Рис. 2). В связи с этим для изучения астрономических явлений в рентгеновском диапазоне энергий необходимо выводить телескопы за пределы земной атмосферы. Кроме того, в отличие от видимого излучения, наблюдение рентгеновского излучения осложнено высокой проникающей способностью фотонов. В отличие, например, видимого излучения, которое можно преломлять линзами или отражать зеркалами, рентгеновское излучение сложно фокусировать. Поэтому в рентгеновских телескопах используются альтернативные оптические системы, такие как кодированные апертуры и зеркала косого падения.

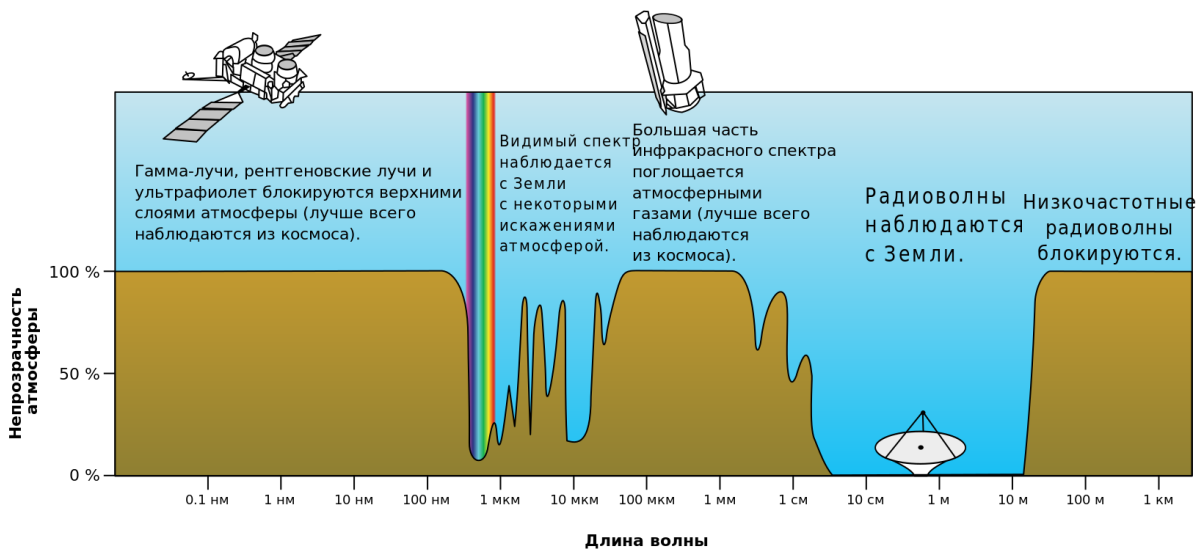


Рис. 2. Непрозрачность земной атмосферы для электромагнитного излучения.
Источник: ESA/Hubble (F. Granato)

Суть метода кодированной апертуры состоит в том, что перед детектором устанавливается маска из чередующихся прозрачных и непрозрачных элементов. По полученной на детекторе тени, с учетом вида мозаики маски, математически восстанавливается направление источника (Рис. 3).

Преимуществом такой схемы является ее применимость для широкого диапазона энергий. Также телескопы с кодированной апертурой обладают широким полем зрения, причем угловое разрешение и отклик не зависят от положения источника. Однако, существуют и значительные недостатки таких телескопов. Размеры элементов маски ограничивают угловое разрешение, широкое поле зрения сопряжено с увеличением шумов. На сегодняшний день работают несколько рентгеновских телескопов с кодирующей апертурой. Например, инструмент BAT на борту обсерватории Swift.

Широкие поля зрения телескопов с кодированной апертурой позволяют активно мониторить небо на появление транзиентных источников. Именно такие телескопы, а именно IBIS на борту INTEGRAL и Swit/BAT сыграли большую роль в открытии и изучении SFXT систем (Grebenev, Sunyaev, 2007; Romano et al., 2014) .

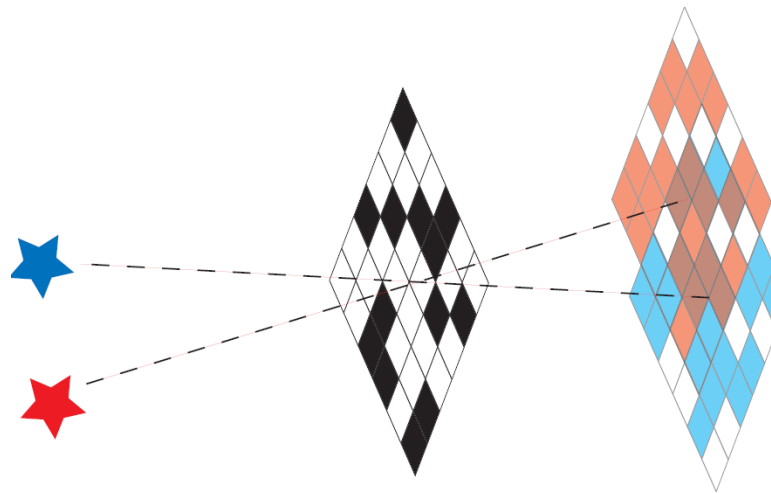


Рис. 3. Принцип работы кодирующей апертуры. Источник: Википедия

На современных рентгеновских обсерваториях все чаще применяются телескопы с зеркалами косоугольного падения. Принцип работы таких зеркал основан на росте коэффициента отражения металлов при приближении угла падения рентгеновских фотонов к 90° . Чаще всего используются зеркальные системы Волтера I типа (Рис. 4). Они состоят из системы вложенных параболоидов и гиперboloидов, расположенных на одной оси. Использование двух систем поверхностей, обосновано увеличением эффективной площади и уменьшением фокусного расстояния телескопа. Благодаря фокусировке лучей телескопы с оптикой косоугольного падения обладают высокой чувствительностью и хорошим угловым разрешением. Основные недостатки подобных телескопов связаны с самим их устройством, а именно: узкое поле зрения, зависимость получаемого изображения от отклонения от оси телескопа и узкий рабочий диапазон энергий, зависящий от материалов зеркал. Впервые зеркала косоугольного падения были использованы в обсерватории HEAO-2 им. Эйнштейна в 1978 году (Giacconi et al., 1979).

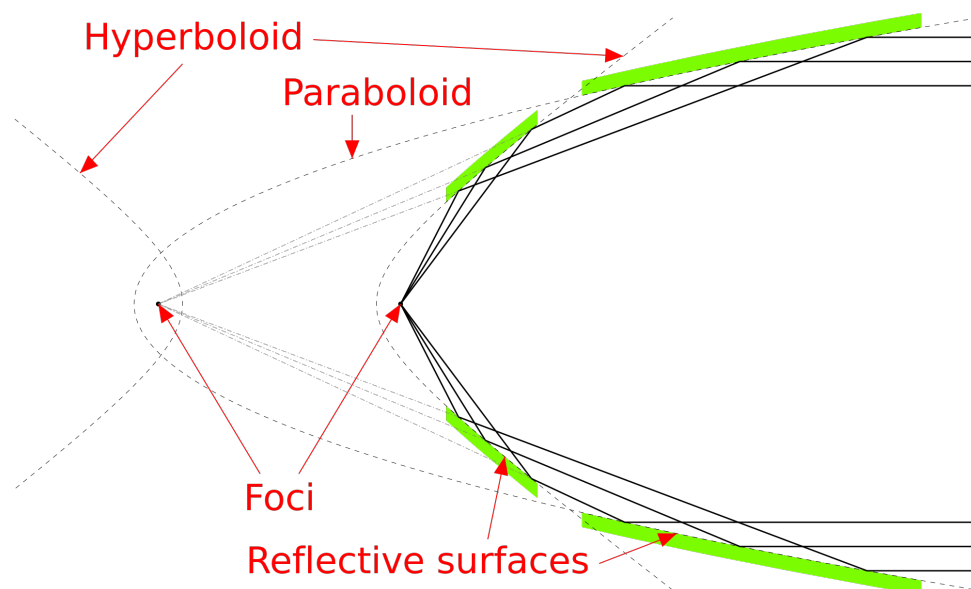


Рис. 4. Схема зеркал Уолтера I типа. Источник: Википедия

2.1 СРГ/ART-XC им. М.Н. Павлинского

2019 году была запущена обсерватория Спектр-РГ (Sunyaev et al., 2021) в точку Лагранжа L2, основной миссией которой является получение карты всего неба в рентгеновском диапазоне. На борту обсерватории установлены два телескопа: eROSITA (Predehl et al., 2021), работающий в диапазоне 0.2-8 кэВ, и ART-XC (Pavlinsky et al., 2021), работающий в более жестком диапазоне - 4-30 кэВ.



Рис. 5. Обсерватория Спектр-РГ. Изображение взято из (Pavlinsky et al., 2021)

Astronomical Roentgen Telescope – X-ray Concentrator (ART-XC) им. М. Н. Павлинского состоит из семи зеркальных систем косого падения и семи независимых позиционно чувствительных детекторов, расположенных в фокальной плоскости зеркал. Зеркальные системы набраны из 28 оболочек Уолтера I типа с иридиевым покрытием и обеспечивают угловое разрешение в $53''$, при поле зрения $36'$ в диаметре. На энергии 13.9 кэВ энергетическое разрешение равно 9%, при эффективной площади в 385 см^2 . Временное разрешение составляет 23 мкс.

2.2 NuSTAR

Запущенная в 2012 году на геоцентрическую орбиту, обсерватория NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) стала первой рентгеновской обсерваторией с фокусирующей оптикой, работающей в жестком рентгеновском диапазоне (Harrison et al., 2013).

Обсерватория состоит из двух сонаправленных телескопов (FPMA и FPMB) с фокусирующей оптикой. Из-за большого фокусного расстояния блок детектор разделен от оптической системы телескопа десятиметровой штангой.

Основные характеристики телескопа следующие: угловое разрешение $18''$, спектральное разрешение - 400 эВ на 10 кэВ и 0.9 кэВ на 60 кэВ, поле зрения - $10'$, временное разрешение - 2 мкс.

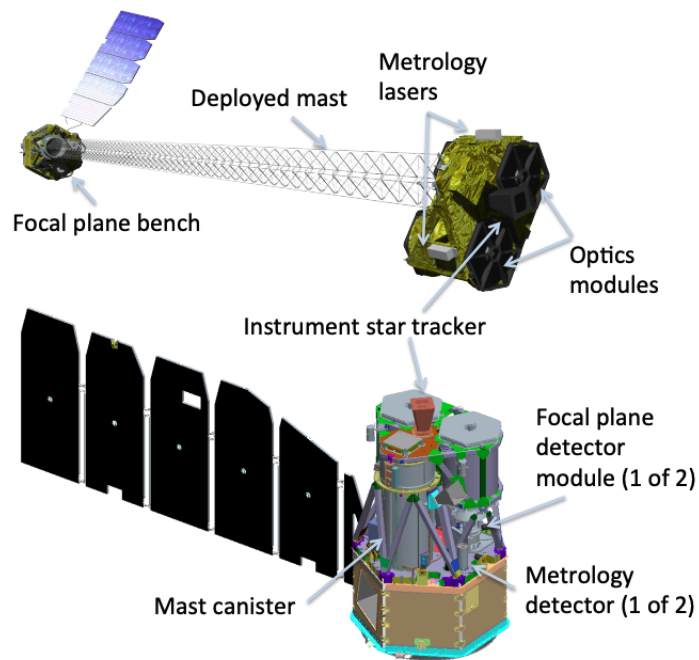


Рис. 6. Обсерватория NuSTAR. Изображение взято из (Harrison et al., 2013)

Глава 3

Методы

Поскольку основной интерес в данной работе представляло исследование переменности источников были рассмотрены и некоторые специфические методы для работы с данными. Для некоторых SFXT известны периоды вращения нейтронных звезд, варьирующиеся в интервале $\sim 10 - 1000$ секунд. Поэтому в исследовании SFXT IGR J16195-4945 мы занялись поиском периодичностей в данных с использованием метода наложения эпох. Также в работе понадобился надежный и повторяемый способ разбиения кривых блеска для достоверного выделения эпизодов изменения наблюдаемого потока. Для этой задачи был выбран метод Байесовой сегментации кривых блеска.

3.1 Поиск периодичностей

В рентгеновской астрономии для поиска периодичностей в данных помимо общепринятых в других областях Фурье-методов обширно используется метод наложения эпох (Epoch Folding, Leahy et al., 1983). Удобство метода заключается в том, что он работает с событийными данными - как и в рентгеновской астрономии работают с отдельными фотонами.

Рассмотрим набор событий $\{t_i\}$, где t_i - время прихода i -го фотона. Для предполагаемого периода P фазы $\phi_i = \phi_0 + (t - t_{ref})/P$ группируются на n фазовых бинов. Ожидается, что при совпадении предполагаемого периода P с истинным периодом распределение числа событий по фазовым бином N_j будет представлять профиль пульсаций источника, а при несовпадении распределение N_j будет равномерным (см. рис. 7).

Возникает вопрос, какое распределение считать равномерным? В качестве меры отличия распределения от ожидаемого распределения используется критерий Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(N_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (5)$$

где N_i - число событий, попавших в i -й фазовый бин, E_i - ожидаемое равномерным

распределением число событий в i – бине. Если N_i распределены равномерно, то ожидается, что вычисляемые χ^2 будут подчиняться распределению χ^2 . Устанавливая пороговое значение для такого распределения при заданном уровне значимости, можно делать выводы о значимом детектировании/недетектировании периодического сигнала (рис. 8).

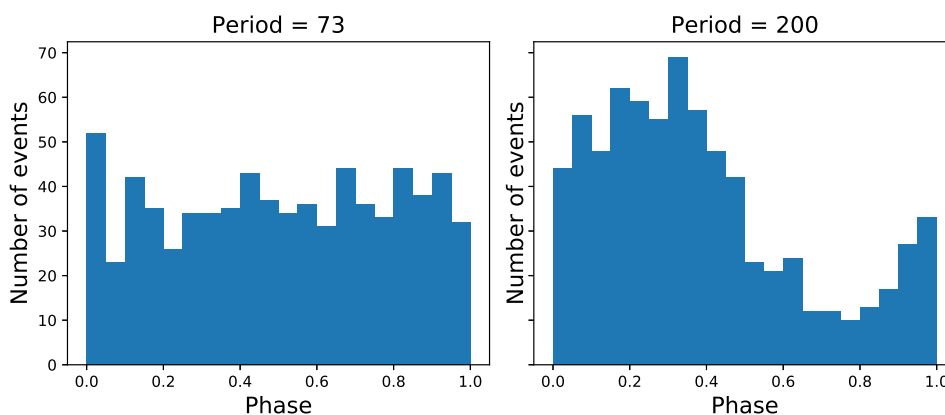


Рис. 7. Слева - неправильно подобранный период для синусоидального сигнала, справа - правильно подобранный.

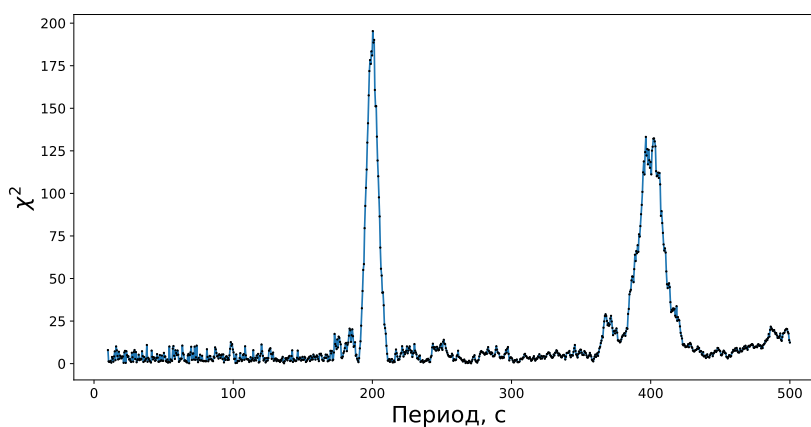


Рис. 8. Периодограмма генерированного периодического источника с периодом 200 с.

На практике обычно наблюдения не ведутся непрерывно и из-за неравномерности наблюдений на некоторые бины могут попадать больше/меньше событий, чем при непрерывном наблюдении. Учитывать неравномерность наблюдений можно изменив ожидаемое значение событий в (5) как $E_i = pT_i$, где T_i - время экспозиции на i -й бин, $p = \sum N_i / \sum T_i$ - среднее число событий в единицу времени.

Иногда из-за особенностей наблюдений на периодограммах могут наблюдаться случайные выбросы, превышающие заданный порог детектирования и не связанные с истинной периодичностью источника. Для учета таких выбросов можно оценивать значимость Монте-Карло симуляциями. Предлагается на наблюдаемых интервалах

N раз генерировать пуассоновские события с частотой, равной средней частоте исходных событий. Ожидается, что если пик вызван периодичностью исходных данных, то для сгенерированных данных он должен исчезнуть.

3.2 Байесовы блоки

Как уже говорилось в рентгеновской астрономии работают с отдельными фотонами. Для исследования временных зависимостей физических процессов наблюдаемые события группируются (бинируются) определенным образом. Чаще всего, например в кривых блеска, события бинируются по равномерно размеченной временной сетке. Такой подход оказывается не всегда удачным, особенно применительно к тусклым и сильно переменным источникам.

Для оптимального сегментирования временных рядов (и не только) используются Байесовы блоки (Scargle et al., 2013). Сегментация на такие блоки позволяет разделить данные на максимальное количество смежных блоков таким образом, чтобы каждый блок статистически отличался от следующего. Это позволяет мониторить переменность потока в кривых блеска.

В настоящей работе стояла задача выделения на кривых блеска значимых всплесков и измерения их характеристик (см. главу 4). Байесова блочная сегментация позволяет автоматизированно выявлять всплески, без принятия определенной модели профилей всплесков. С использованием модуля *astropy* (Astropy Collaboration et al., 2022) кривые блеска сегментировались на Байесовы блоки. Для каждого блока рассчитывались усредненные темпы счета. В сегментированной кривой блеска искались локальные максимумы и минимумы, которые ассоциировались со всплесками и предвсплесковыми интервалами. Далее вычислялись временные и энергетические характеристики всплесков (см. рис. 9 и Sidoli et al., 2019).

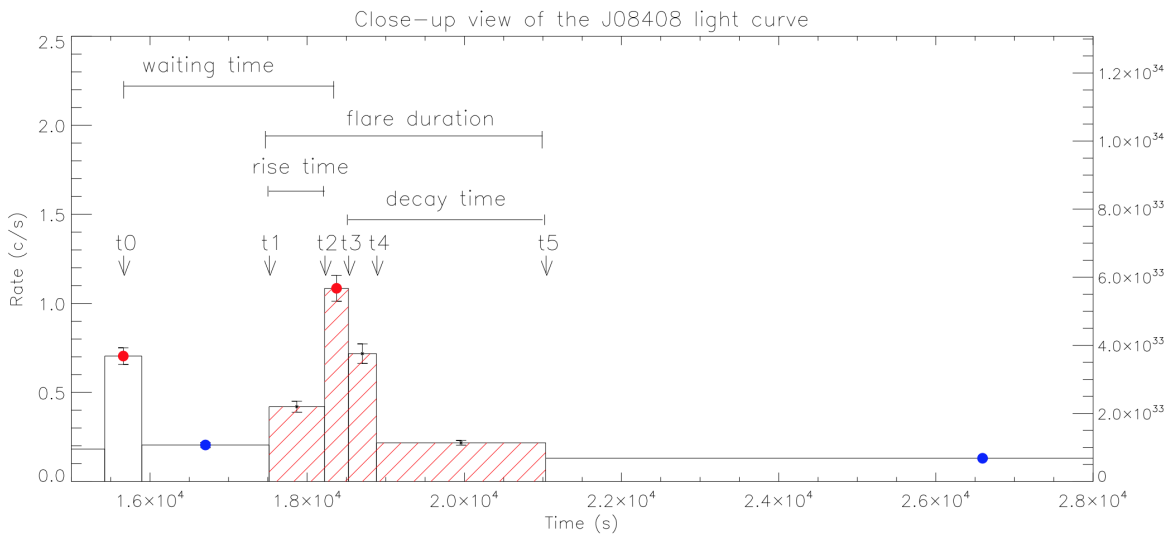


Рис. 9. Пример Байесовой блочной сегментации кривой блеска содержащей всплески (Sidoli et al., 2019).

Глава 4

Результаты

4.1 IGR J16195-4945

4.1.1 Об источнике

IGR J16195-4945 был обнаружен телескопом IBIS/ISGRI (Lebrun et al., 2003), находящемся на борту обсерватории INTEGRAL (Winkler et al. 2003; Kuulkers et al. 2021), 26 сентября 2003 г., во время яркой вспышки длительностью ~ 1.5 часа и средним потоком ~ 34 мКраб в диапазоне энергий 20 – 40 кэВ (Sguera et al., 2006). Подобная вспышечная активность сразу же сделала IGR J16195-4945 кандидатом в SFXT. Компаньон источника в более мягком диапазоне был обнаружен в архивных наблюдениях обсерватории ASCA (Sidoli et al., 2005).

По результатам наблюдения обсерватории Chandra, проведенного 29 апреля 2005 г., удалось уточнить положение источника RA= 16h 19m 32.20s, Dec= $-49^\circ 44' 30.7''$ (J2000) с точностью $0.6''$ (Tomsick et al., 2006). Это позволило отождествить объект с источниками ближнего и среднего инфракрасного диапазонов каталогов 2MASS (2MASS J16193220-4944305) и GLIMPSE (G333.5571 + 00.3390), соответственно. По данным спектроскопии в ближнем-ИК диапазоне Coleiro et al. (2013) определили, что звездой донором в системе является голубой сверхгигант типа **ON9.7Iab**.

В работе Morris et al. (2009) было проанализировано наблюдение IGR J16195-4945 обсерваторией Suzaku в 2009 г. Во время этого наблюдения объект продемонстрировал яркую вспышку длительностью ~ 5000 секунд с увеличением потока в ~ 10 раз, что еще раз подтвердило его принадлежность к классу SFXT. Проведенный спектральный анализ указал на значительную толщину межзвездного вещества в направлении на систему ($N_H \simeq 1.1 \times 10^{23}$ см $^{-2}$) и отсутствие в спектре сильной эмиссионной линии нейтрального железа ($EW < 43$ эВ).

Используя данные обзоров телескопа Swift/BAT с декабря 2004 по март 2015 и данные наблюдений телескопа Swift/XRT Cusumano et al. (2016) показали, что двойная система является затменной с орбитальным периодом 3.945 дня и длительностью затмения $\sim 3.5\%$ орбитального периода.

4.1.2 Наблюдения

IGR J16195-4945 наблюдался телескопом ART-XC им М.Н. Павлинского (Pavlinsky et al., 2021) обсерватории СРГ (Sunyaev et al., 2021) 3 марта 2021 г. в течение суток. Данные ART-XC были обработаны с использованием пакета программного обеспечения ARTPRODUCTS v1.0 и версии калибровочной базы данных v20220908. Спектры и кривые блеска были извлечены из круглой области радиуса $R = 135''$ с центром в положении источника. Для построения кривых блеска мы использовали широкий диапазон энергий 4-20 кэВ, а также два поддиапазона: 4-8 и 8-20 кэВ, в то время как для спектрального анализа был использован диапазон 5-25 кэВ. На энергиях ниже 5 кэВ отклик прибора требует более тщательной калибровки, в связи с чем эта область была исключена из спектрального анализа.

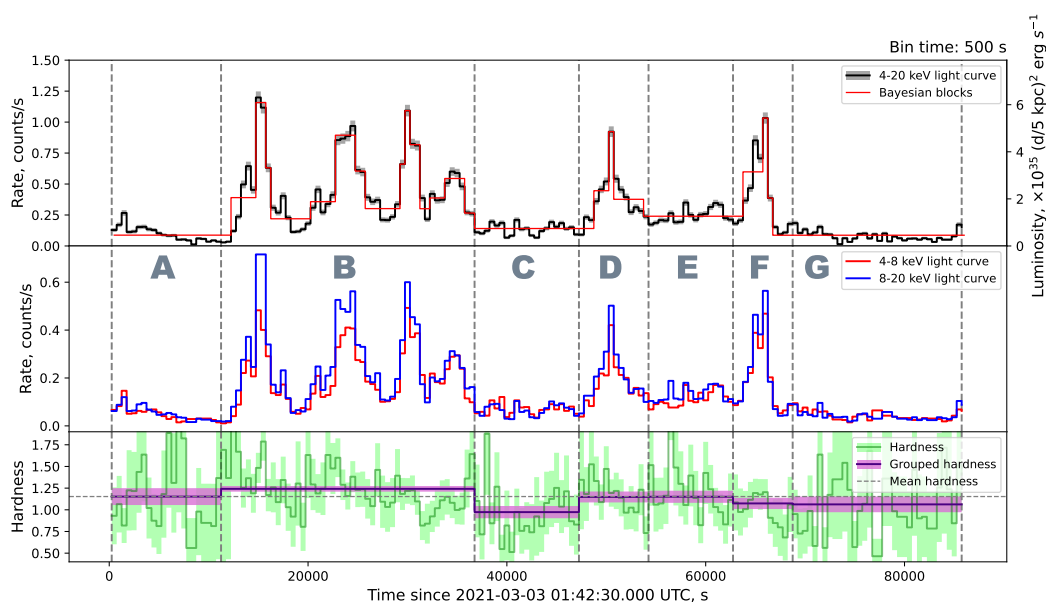


Рис. 10. На верхней части рисунка изображена кривая блеска источника в диапазоне энергий 4-20 кэВ с временным разрешением 500 сек вместе с ее байесовой блочной сегментацией, разделением на интервалы со статистически значимым различием темпа счета фотонов. На среднем графике показаны кривые блеска в мягком (4-8 кэВ) и жестком (8-20 кэВ) энергетических диапазонах. Внизу изображены полная и усредненная по сегментам кривые жесткости (отношения потока в жестком диапазоне к потоку в мягком).

4.1.3 Временной анализ

На Рис. 10 приведена кривая блеска источника с временным разрешением 500 с в энергетическом диапазоне 4-20 кэВ. В кривой блеска хорошо видны характерные для SFXT вспышки продолжительностью в несколько кс. Для дальнейшего анализа мы выделили периоды времени в течении которых источник находился в "низком" (A,C,G), "промежуточном" (E) или "вспышечном" (B,D,F) состояниях. К сожалению

нию, из-за большой неопределенности эфемерид двойной системы (Cusumano et al., 2016) нельзя точно указать, каким орбитальным фазам соответствует наблюдение, однако затмение (с ожидаемой продолжительностью в 12 кс) в наблюдение не попало. Динамический диапазон переменности (отношение темпа счета в максимумах вспышек к среднему темпу счета в "низком" состоянии) составляет ~ 11 .

Мы также построили кривые блеска в мягком (4-8 кэВ) и жестком (8-20 кэВ) диапазонах энергий. Поскольку нейтронная звезда в SFXT погружена в плотный комковатый ветер оптического компаньона - сверхгиганта, то можно ожидать, что при прохождении плотных сгустков звездного ветра между нейтронной звездой и наблюдателем будет значительно изменяться наблюдаемое поглощение (Oskinova et al., 2012), модулируя в первую очередь наблюдаемый поток в мягком рентгеновском диапазоне. Однако, мягкая и жесткая кривые блеска оказались подобными, без очевидных эпизодов изменения жесткости. Для более детального изучения этого вопроса нами были также рассчитаны жесткости (отношения темпа счета в жестком диапазоне к темпу счета в мягком), усредненные по указанным выше периодам времени разной интенсивности. Заметно, что во вспышках излучение становится немного жестче, однако в целом можно заключить, что источник демонстрирует "бесцветную" переменность, которая также наблюдается в других SFXT-системах (см., например, Sidoli et al., 2020).

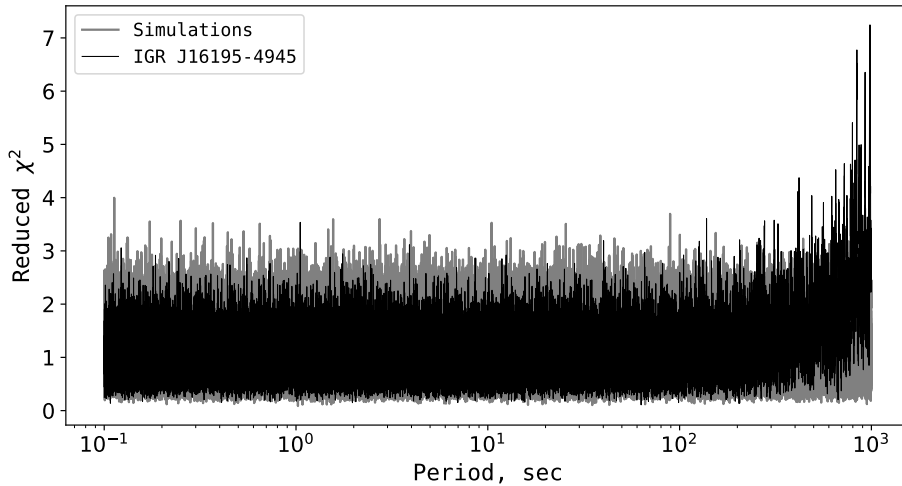


Рис. 11. Периодограмма.

В некоторых SFXT наблюдаются периодические модуляции рентгеновского потока, вызванные вращением НЗ с характерными периодами $\sim 10 - 1000$ с (Walter et al., 2015). Нами был проведен поиск периодического сигнала (рис. 11) в диапазоне энергий 4-20 кэВ методом наложения эпох (Leahy et al., 1983). На периодах до ~ 300 секунд на уровне 4.5σ значимого сигнала выявлено не было. На периодах 300 – 1000 секунд в периодограмме наблюдается сигнал, связанный, однако, не с вращением НЗ, а с наблюдаемыми вспышками, с характерными длительностями ~ 1000 секунд.

4.1.4 Спектральный анализ

Длительное наблюдение, выполненное *ART-XC*, позволило получить качественный спектр, покрывающий диапазон энергий 5-25 кэВ. Для описания спектра мы выбрали простую модель степенного закона с экспоненциальным завалом и поглощением на низких энергиях, $tbabs*cutoffpl$, которая хорошо описывает спектры SFXТ (см., например, Romano, 2015). Аппроксимация спектральной моделью выполнялась с использованием пакета XSPEC v12.12.1; спектры всех семи модулей телескопа *ART-XC*, рассматривались независимо, для согласования нормировок использовался мультипликативный фактор. Все погрешности приведены в 90% доверительном интервале. Оценка величины и погрешности непоглощенного потока проводилась при помощи процедуры `sflux`.

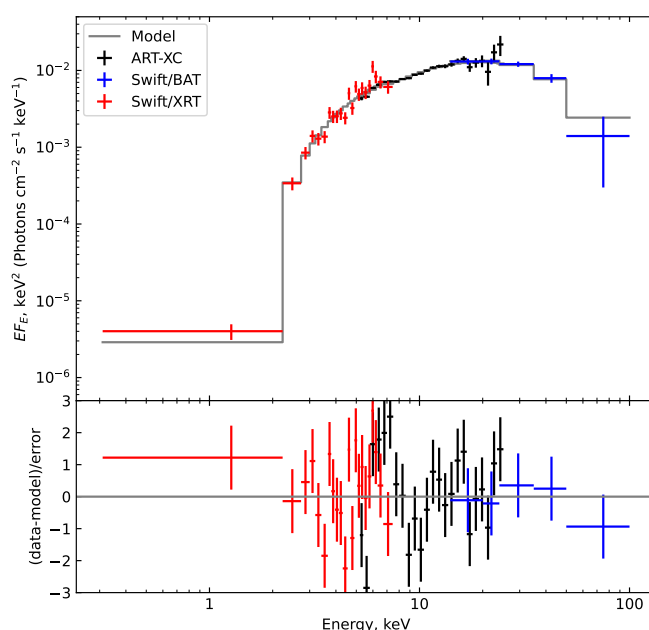


Рис. 12. Энергетический спектр источника IGR J16195-4945 по данным телескопов Swift/XRT (красные точки), СРГ/ART-XC (черные точки) и Swift/BAT (синие точки). Сплошной серой линией показана модель наилучшей аппроксимации.

Измеренные параметры – наклон степенного фотонного спектра и характерная энергия экспоненциального завала – оказались близкими к значениям, определенным по совместному спектру, полученному по данным Swift/XRT и BAT, которые не являются одновременными с *ART-XC* (Cusumano et al., 2016), однако из-за недостаточного покрытия в области низких энергий точно измерить поглощение только по данным телескопа *ART-XC*, не удастся. Полученные параметры приведены в Таб. 3.

Чтобы построить широкополосный спектр, мы добавили к данным телескопа *ART-XC*, спектр по данным инструмента Swift/XRT, для получения которого были усреднены все наблюдения, в которых темп счета фотонов от источника был выше 5×10^{-2} отс/с (наблюдения 1, 2, 4, 5, 21, 22 из Таб.1 Cusumano et al. 2016), и средний спектр источника по данным 105-месячного каталога Swift/BAT (Oh et al., 2018).

Полученный спектр и невязки приведены на Рис. 12. Расширение энергетического диапазона позволило надежно измерить поглощение $N_H = (12 \pm 2) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и характерную энергию экспоненциального завала $E_{cut} = 13 \pm 2 \text{ кэВ}$. Кросс-нормировочные коэффициенты оказались равны 1.991 и 1.073 для XRT и BAT, соответственно.

Чтобы пересчитать полученную в предыдущей части кривую блеска из отсчетов/с в физические величины мы аппроксимировали средний спектр, полученный телескопом *ART-XC*, зафиксировав поглощение на величине $N_H = 12 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Таким образом был получен коэффициент пересчета наблюдаемого темпа счета в полную непоглощенную светимость источника в диапазоне энергий 0.1-100 кэВ $K_{bol} = 5.3 \times 10^{35} \text{ эрг отс}^{-1}$ предполагая что расстояние до источника 5 кпк (Tomsick et al., 2006), который мы далее использовали для построения кривой болометрической светимости (см. Рис. 10), считая что основное энерговыделение системы находится в рентгеновском диапазоне. Кроме того, мы отдельно набрали спектры во вспышках (интервалы **B,D,F**) и в "низком" состоянии (интервалы **A,C,G**) и аппроксимировали их такой же моделью. Несмотря на то, что средние потоки в этих состояниях отличаются в 4 раза, значимых отличий в спектральных параметрах мы не обнаружили, что подтверждает "бесцветность" наблюдаемой переменности.

Таблица 1. Параметры наилучшей аппроксимации спектров IGR J16195-4945

| Сегмент | $N_H, 10^{22} \text{ см}^{-2}$ | Γ | $E_{cut}, \text{ кэВ}$ | $\chi^2 / \text{d.o.f.}$ | F[4-20 кэВ], $\text{эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ |
|--|--------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| ART-XC + XRT + BAT | 12 ± 2 | 0.56 ± 0.15 | 13 ± 2 | 231.29 / 185 | $(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-11}$ |
| ART-XC | 16 ± 8 | 0.87 ± 0.35 | 15_{-5}^{+13} | 193.51 / 157 | $(2.8 \pm 0.3) \times 10^{-11}$ |
| ART-XC (N_H фикс.) | 12 | 0.67 ± 0.27 | 15_{-5}^{+12} | 196.49 / 158 | $(2.4 \pm 0.3) \times 10^{-11}$ |
| "низкое состояние"(ACG, N_H , фикс.) | 12 | $0.58_{-0.97}^{+0.84}$ | 10_{-5}^{+88} | 187.16 / 158 | $(0.9 \pm 0.1) \times 10^{-11}$ |
| "только вспышки"(BDF, N_H фикс.) | 12 | 0.59 ± 0.27 | 15_{-5}^{+9} | 184.15 / 158 | $(4.1 \pm 0.2) \times 10^{-11}$ |

4.1.5 Характеристика всплесков

Средняя болометрическая светимость IGR J16195-4945 во время наблюдения составила $L_{mean} = (1.38 \pm 0.05) \times 10^{35} (d/5 \text{ кпк})^2 \text{ эрг с}^{-1}$. Таким образом, для диапазона возможных расстояний до системы (5–15 кпк, Tomsick et al. 2006) средняя светимость оказывается меньше критического значения $L_{crit} \approx 4 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$ (Shakura et al., 2015), следовательно в системе может протекать "оседающая" аккреция материала из плотного ветра сверхгиганта.

В работе Sidoli et al. (2019) обсуждались вспышки, происходящие в случае, когда порции плазмы из горячей оболочки проникают в магнитосферу за счет Релей-Тейлоровской неустойчивости (RTI). Серии таких вспышек могут возникать из-за флуктуаций плотности или скорости звездного ветра, например, из-за прихода сгустка ветра. Для подобных всплесков были получены зависимости между их параметрами, такими как полное энерговыделение, время ожидания всплеска, светимость перед всплеском и другими (см. главу 1).

На Рис. 13 приведены ожидаемые соотношения между параметрами вспышек, а также показаны измеренные в работе Sidoli et al. (2019) параметры отдельных вспышек для 9 известных SFXT, наблюдавшимся обсерваторией XMM-Newton.

Мы повторили анализ из работы Sidoli et al. 2019, используя байесовское разбиение (Scargle et al., 2013) кривой блеска, чтобы выделить отдельные вспышки и измерить их параметры (см. Рис. 10). Полученные значения полного энерговыделения, продолжительности, времени нарастания и проч. приведены в Таб. 2. Для первого всплеска время ожидания было принято равным времени, прошедшему от начала наблюдения. Чтобы сравнить вспышки IGR J16195-4945 с данными по другим SFXT, все наблюдаемые характеристики были пересчитаны в более мягкий энергетический диапазон 1-10 кэВ. Для этого был использован средний спектр источника за все наблюдение, поскольку ранее было показано что он значимо не изменяется с интенсивностью.

Таблица 2. Измеренные характеристики всплесков

| # | Полное энерговыделение, 10 ³⁸ эрг (1-10 кэВ) | Время ожидания, с | Продолжительность, с | Время роста, с | Светимость до вспышки L_x , 10 ³⁴ эрг с ⁻¹ (1-10 кэВ) |
|---|--|----------------------|-------------------------|-------------------|--|
| 1 | 4.4 ± 0.2 | 15000(*) | 4000 | 2500 | 1.6 ± 0.1 |
| 2 | 5.9 ± 0.3 | 8500 | 5500 | 2500 | 4.0 ± 0.2 |
| 3 | 3.1 ± 0.3 | 6250 | 2000 | 500 | 5.5 ± 0.3 |
| 4 | 3.5 ± 0.2 | 4750 | 4500 | 1500 | 5.4 ± 0.4 |
| 5 | 4.1 ± 0.2 | 15750 | 5000 | 1500 | 2.6 ± 0.1 |
| 6 | 3.4 ± 0.2 | 15500 | 3000 | 2000 | 4.3 ± 0.2 |

В целом, вспышки от IGR J16195-4945 следуют предсказаниям теории "оседающей" аккреции. Вместе с тем, необходимо напомнить, что точное расстояние до системы не известно и приведенные светимости могут быть систематически занижены на фактор вплоть до ≈ 10 , если система на самом деле расположена дальше, на расстоянии в 15 кпк. На диаграмме "светимость перед вспышкой - время ожидания" вспышки IGR J16195-4945 лежат выше линии $\Delta T \approx 130[\text{с}]\dot{M}_{16}^{-1}$, что может указывать на большее значение фактора $(\frac{\alpha}{0.03})A\zeta^{2/9}\mu_{30}^{2/3}$. Характерные продолжительности вспышек позволяют оценить скорость звездного ветра сверхгиганта. Из формулы

$$\Delta t \approx 400[\text{с}]\left(\frac{v_w}{1000[\text{км с}^{-1}]}\right)^{-3} \quad (6)$$

из работы Sidoli et al. (2019) следует, что для IGR J16195-4945 $v_w \approx 500 \text{ км с}^{-1}$, что типично для НМХВ (Martínez-Núñez et al., 2017).

4.1.6 Инфракрасная переменность

IGR J16195-4945 расположен в Галактической плоскости ($l, b = 333.56^\circ, 0.34^\circ$), в области неба, покрытой обзором VISTA Variables in the Via Lactea (VVV) (Minniti et al., 2010) в ближнем инфракрасном диапазоне. Из каталога VVV DR5 мы отобрали

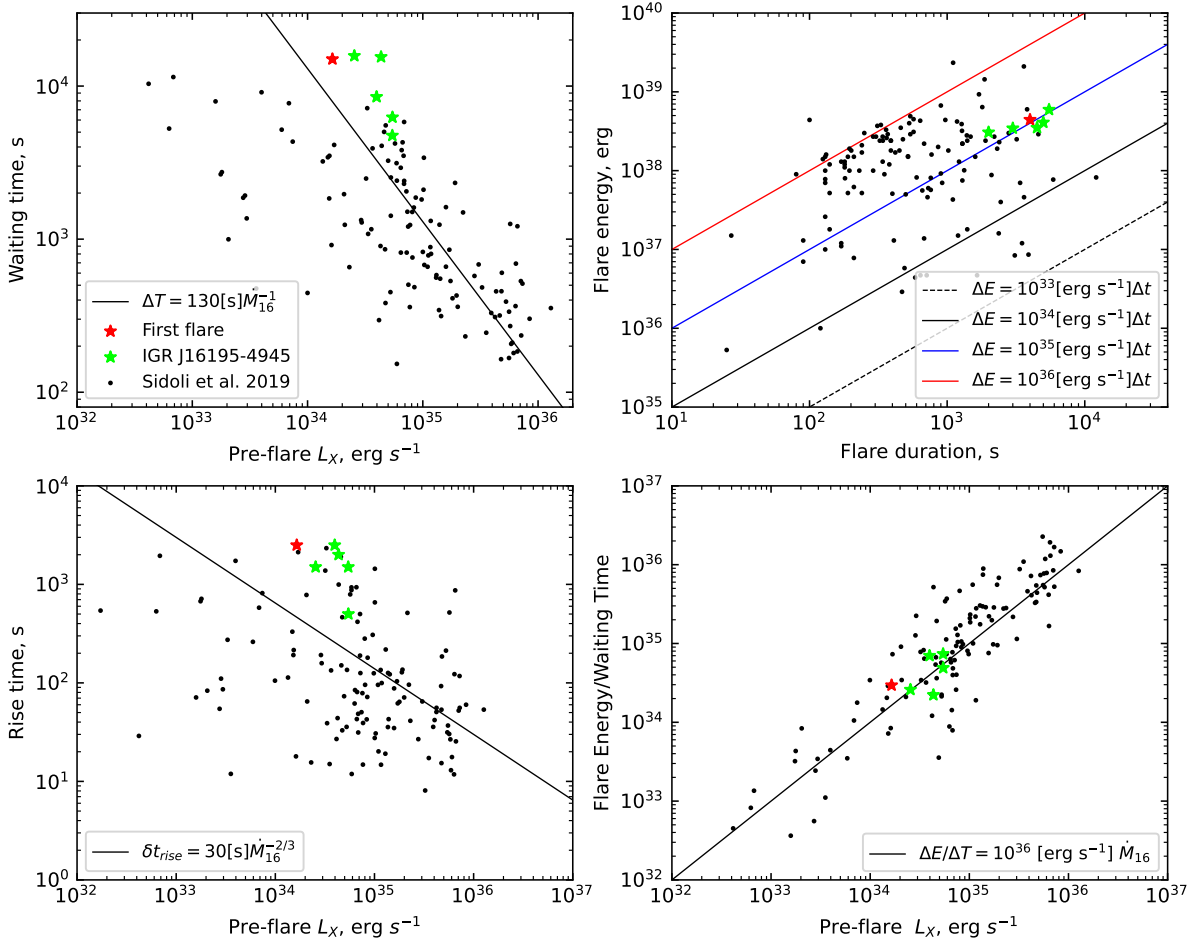


Рис. 13. Характеристики всплесков IGR J16195-4945 и зависимости, описываемые моделью "оседающей" аккреции

все надежные (флаг $errBits \leq 16$) измерения звездной величины источника в Ks -фильтре измеренные в апертуре радиусом 2 ($aperMag5$). Всего было отобрано 190 измерений за период времени с 2010 по 2015 годы. Для сравнения, мы использовали измерения блеска нескольких достаточно ярких соседних звезд в том же поле (ближе 40).

Из кривой блеска (рис. 14) хорошо видно, что источник демонстрирует быструю инфракрасную переменность, изменяя свой блеск на 0.1-0.15 величины за несколько дней. Такая переменность не характерна для одиночных голубых сверхгигантов, амплитуда переменности которых обычно составляет 0.02-0.04 величины в оптическом диапазоне (Буыссаерт et al., 2015; Аертс et al., 2017).

Подобные быстрые изменения светимости, на десятки процентов за несколько дней, не могут быть связаны с собственной переменностью звезды-супергиганта. Переработка рентгеновского излучения поверхностью супергиганта также не может обеспечить наблюдаемые быстрые изменения его блеска, так как даже для самых ярких наблюдавшихся вспышек полная болометрическая светимость составляет около 10^{37} эрг s^{-1} , что на порядок меньше болометрической светимости голубых сверхгигантов ($\gtrsim 10^5 L_{\odot}$).

Для определения природы наблюдаемой быстрой переменности необходимы дополнительные спектроскопические наблюдения в ближнем-ИК диапазоне, желательно совмещенные с рентгеновским мониторингом системы.

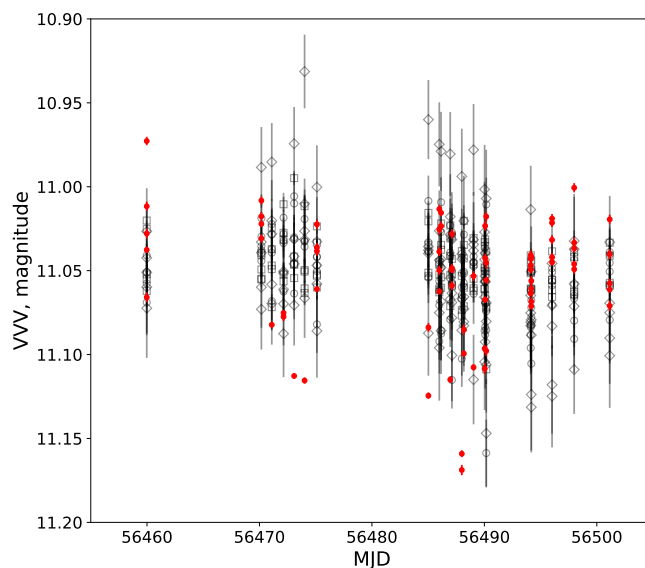


Рис. 14. Кривая блеска IGR J16195-4945 в K_s -фильтре (красные точки) по данным обзора VVV. Черными незакрашенными символами показаны измерения блеска звезд сравнения, нормированные на средний блеск IGR J16195-4945.

4.1.7 Заключение

Благодаря длительному непрерывному наблюдению IGR J16195-4945, проведенному телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в 2021 году удалось исследовать переменность источника на масштабах 10-10000 с. В кривой блеска обнаружено 6 характерных для SFXT вспышек, продолжительностью в несколько тысяч секунд. Во время вспышек не происходит сильного изменения жесткости рентгеновского излучения. Значимого периодического сигнала обнаружено не было.

Широкополосный спектр, построенный по совокупным данным ART-XC и телескопов обсерватории Swift, хорошо описывается моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на энергии ≈ 13 кэВ и существенным поглощением $N_H \approx 10^{23}$ см $^{-2}$.

Поскольку средняя светимость источника оказалась ниже критической, мы сравнили параметры наблюдавшихся вспышек в IGR J16195-4945 со вспышками в других SFXT и с предсказаниями модели "оседающей" аккреции. Параметры вспышек от источника близки к таковым для других известных систем. У системы обнаружена значительная быстрая переменность в ближнем инфракрасном диапазоне, которая не может быть объяснена в простых предположениях и требует дальнейшего исследования.

4.2 3A 1954+319

4.2.1 Об источнике

3A 1954+319 был открыт обсерваторией *Uhuru* в 1978 году (Forman et al., 1978) и наблюдался впоследствии обсерваториями *Ariel* (Warwick et al., 1981; Warwick et al., 1988), *EXOSAT* (Cook et al., 1985) и *Ginga* (Tweedy et al., 1989). По этим наблюдениям было предположено, что данный источник является НМХВ с аккрецией звездного ветра. На это указывали жесткий рентгеновский спектр и переменность потока на порядок величины на минутных временных масштабах.

Однако, из-за низкого углового разрешения рентгеновских телескопов на тот момент однозначно отождествить оптическую звезду 3A 1954+319 не удавалось. С запуском обсерватории *Chandra* стало возможно проводить рентгеновские наблюдения с высоким угловым разрешением. Уточнив положение 3A 1954+319 по данным *Chandra*, Masetti et al. (2006) установили, что оптическим компаньоном данной системы является красный гигант типа M4–5 III и классифицировали 3A 1954+319 как симбиотическую рентгеновскую двойную систему (Symbiotic X-ray Binary, SyXB). По измерениям звездных величин в *V* и *R* фильтрах и по абсолютной звездной величине звезд M4 III было оценено, что расстояние до системы $\lesssim 1.7$ кпк.

В данных телескопа *Swift*/BAT, Corbet et al. (2006) и Corbet et al. (2008) обнаружили ~ 5 часовую периодичность в кривой блеска, причем данный период оказался сильно переменным (Marcu et al., 2011). Mattana et al. (2006) показали, что ~ 5 часовая периодичность связана с вращением нейтронной звезды, а орбитальный период был оценен в $\gtrsim 400$ дней. 5 часовой период вращения сделал нейтронную звезду в 3A 1954+319 одной из самых медленно вращающихся известных нейтронных звезд.

Hinkle et al. (2020) пересмотрели классификацию 3A 1954+319. Измеренное обсерваторией *Gaia* расстояние до системы и спектроскопия в ближнем ИК диапазоне показали, что компаньоном системы является не красный гигант M4–5 III, а красный сверхгигант массой $\sim 9M_{\odot}$ на расстоянии ~ 3.3 кпк. Это причислило 3A 1954+319 к редкому классу рентгеновских двойных с красными сверхгигантами. Кроме 3A 1954+319 известно всего лишь две рентгеновских двойных с красными сверхгигантами в нашей Галактике (Scutum X-1 и CXO 174528.79290942.8; Kaplan et al. 2007, Gottlieb et al. 2020)

По проведенному временному и спектральному анализу наблюдений телескопов XMM-Newton и NuSTAR Bozzo et al. (2022) показали наличие структурированного звездного ветра красного сверхгиганта. Наблюдалось, что локальное поглощение увеличивалось перед всплесками и снижалось во время их пиков.

Интерпретируя медленное вращение НЗ и наблюдаемые эпизоды ускорения и замедления, Bozzo et al. (2022), Enoto et al. (2014) предположили, что НЗ может быть магнитаром с $B \gtrsim 10^{16}$ Гс, близким к состоянию равновесия, либо НЗ с $B \gtrsim 10^{12-13}$ Гс с протекающей оседающей аккрецией.

4.2.2 Наблюдения

Для анализа было взято наблюдение обсерватории NuSTAR из упомянутой выше работы *Bozzo et al. (2022)*. ЗА 1954+319 наблюдался в июне 2019 года в течение 80 кс. Данные были обрабатывались с помощью стандартной процедуры *piproducts*. Кривые блеска и спектры источника и фона извлекались из круговых областей радиусом 72" и 90" соответственно. Были использованы оба модуля FPMA и FPMB обсерватории NuSTAR и задействован полный рабочий энергетический диапазон от 3 до 79 кэВ.

4.2.3 Временной анализ

Ввиду особенности орбиты и строения обсерватории NuSTAR наблюдения не было непрерывным, а состояло из интервалов хорошего времени (Good Time Interval - GTI). Так как наблюдения длилось относительно недолго в сравнении с периодом вращения нейтронной звезды (~ 5 часов), фазированное изучение ЗА 1954+319 не представлялось возможным.

На рис. 15. изображена объединенная кривая блеска модулей FPMA и FPMB с вычтенным фоном и временным разрешением 5 с в диапазоне 3-78 кэВ.

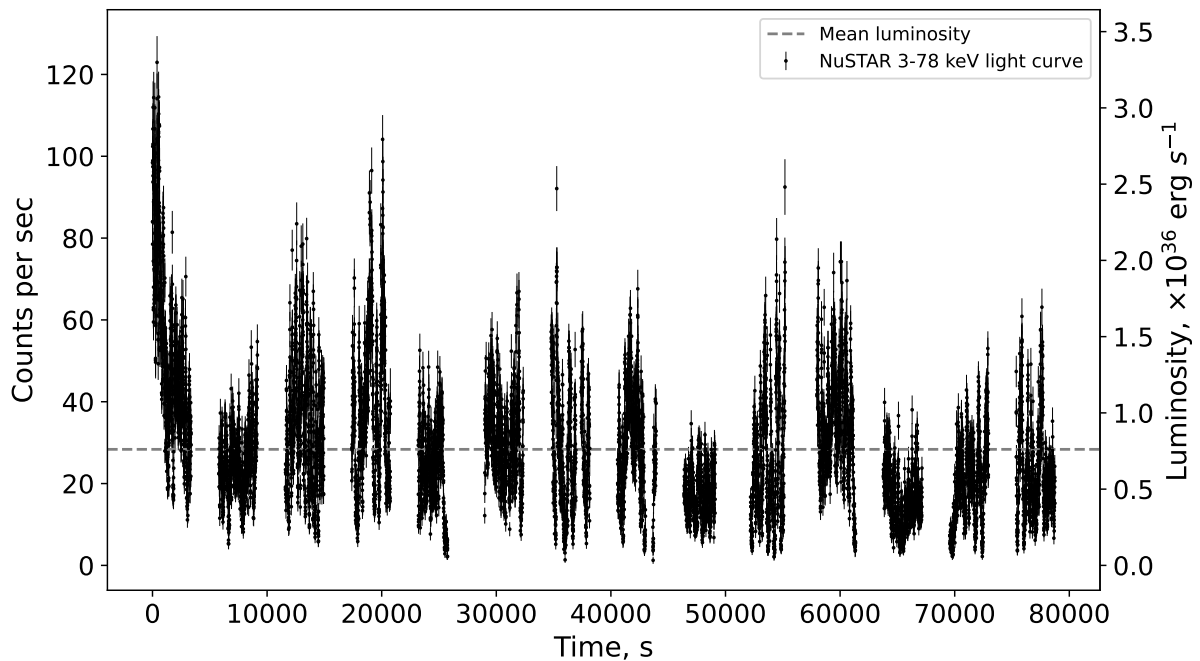


Рис. 15. Кривая блеска

4.2.4 Спектральный анализ

Усредненный спектр наблюдения аппроксимировался моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на высоких энергиях и поглощением на низких энергиях $t_{\text{abs}} * \text{highcut} * \text{pow}$. Спектры модулей FPMA и FPMB обсерватории NuSTAR рассматривались независимо. Для учета различий модулей использовались кросс-нормировочные коэффициенты.

Таблица 3. Параметры наилучшей аппроксимации спектров ЗА 1954+319

| | | |
|-----------------------|------------------------|---|
| N_H | $8.3^{+0.4}_{-0.6}$ | 10^{22} см^{-2} |
| E_C | $7.2^{+0.3}_{-0.6}$ | кэВ |
| E_F | 26^{+1}_{-2} | кэВ |
| Γ | $1.65^{+0.28}_{-0.57}$ | |
| $F[1-10 \text{ кэВ}]$ | 5.8 ± 0.1 | $10^{-10} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ |

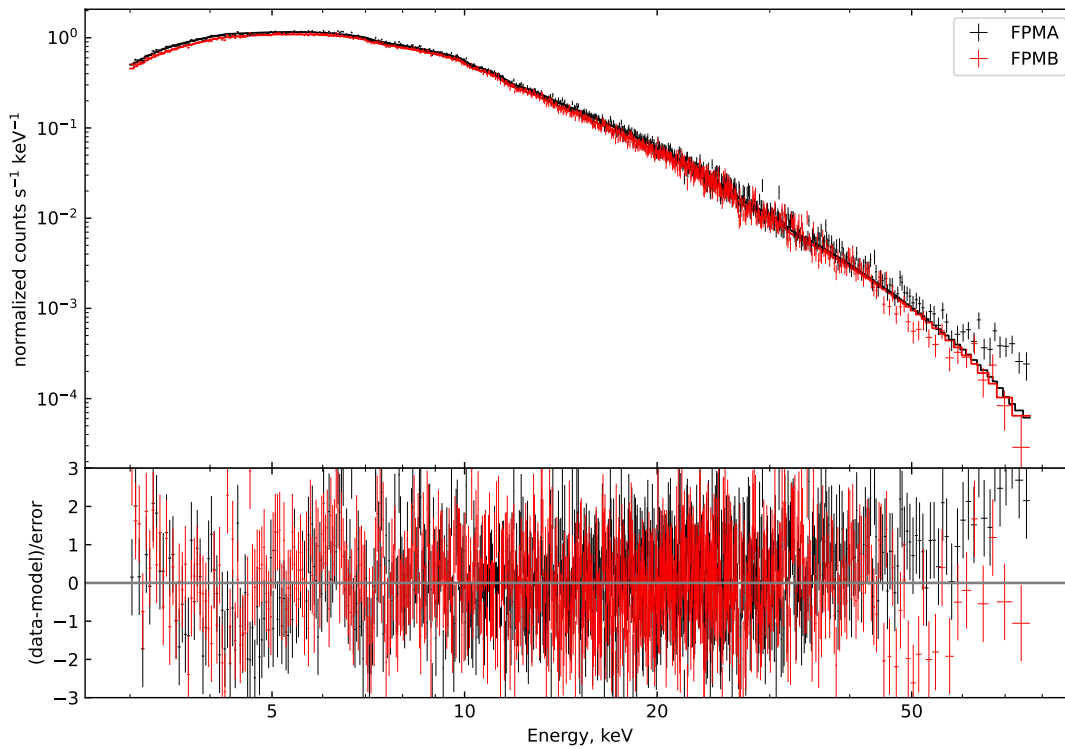


Рис. 16. Спектр FPMA и FPMB.

4.2.5 Характеристика всплесков

Анализ всплесков был проведен аналогично тому, что было описано в разделе 4.1.5. Автоматизированной процедурой, байесовым блочным разделением кривой блеска, было выявлено 280 всплесков. На рис. 17 приведены кривые блеска в каждом GTI, ее байесова блочная сегментация и максимумы обнаруженных всплесков.

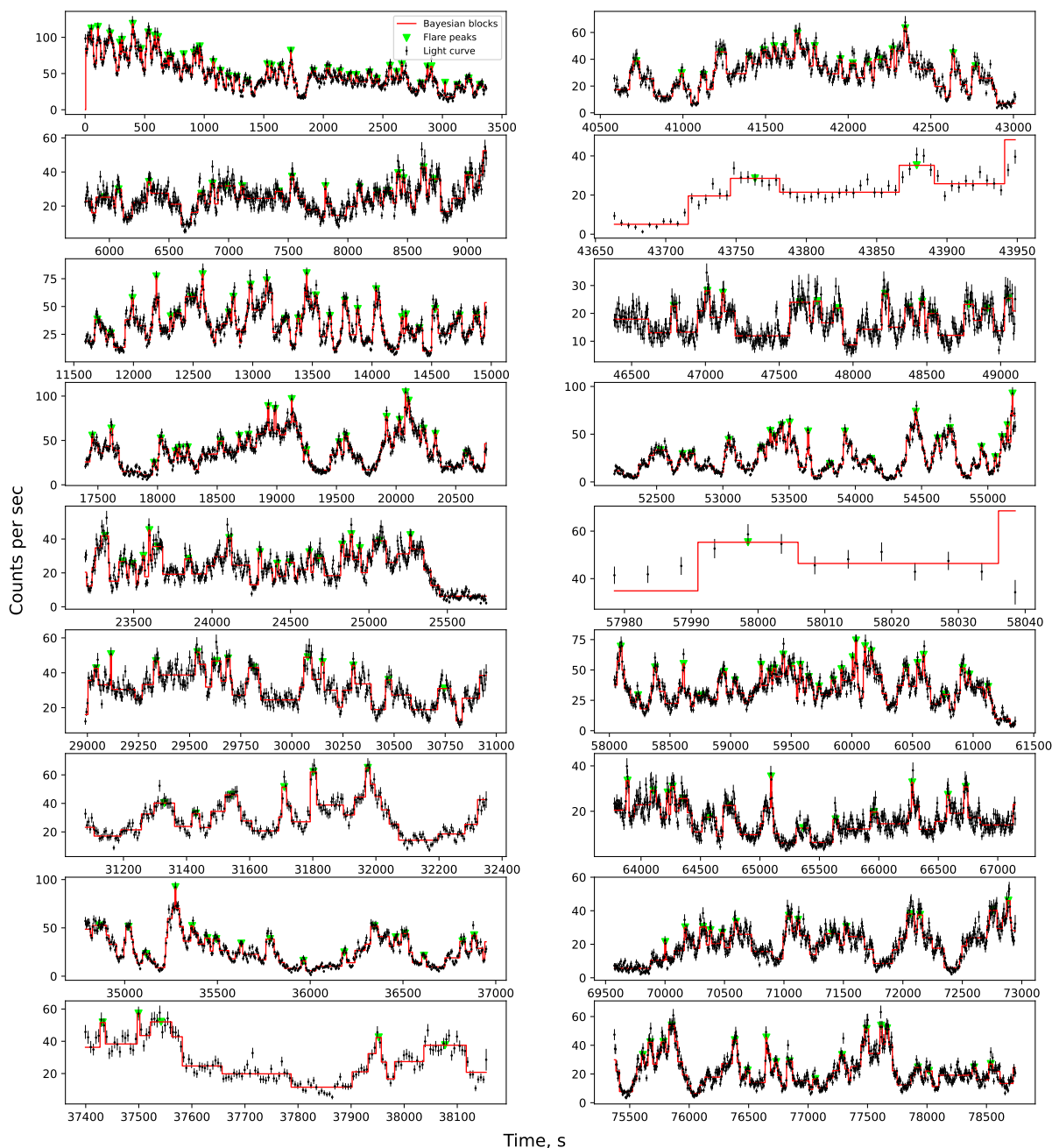


Рис. 17. На каждой панели изображены кривая блеска в отдельно взятом GTI, ее сегментация на байесовы блоки и максимумы всплесков.

В предыдущих работах обсуждалось, что в 3A 1954+319 может протекать дозвуковая оседающая аккреция (Enoto et al., 2014; Bozzo et al., 2022). Считая расстояние до системы равным $d = 3295_{-631}^{+985}$ пк (Hinkle et al., 2020), средняя болометрическая светимость источника составила $L_{bol} = (1.6_{-0.7}^{+0.5}) \times 10^{36}$ эрг s^{-1} , что меньше критического значения 4×10^{36} эрг s^{-1} . В диапазоне 1-10 кэВ $L[1-10 \text{ кэВ}] = (7.6_{-2.1}^{+3.2}) \times 10^{35}$ эрг s^{-1} .

На рис. 18 изображены измеренные характеристики всплесков 3A 1954+319, характеристики десяти SFXT, в том числе и IGR J16195-4945, а также и предсказания модели.

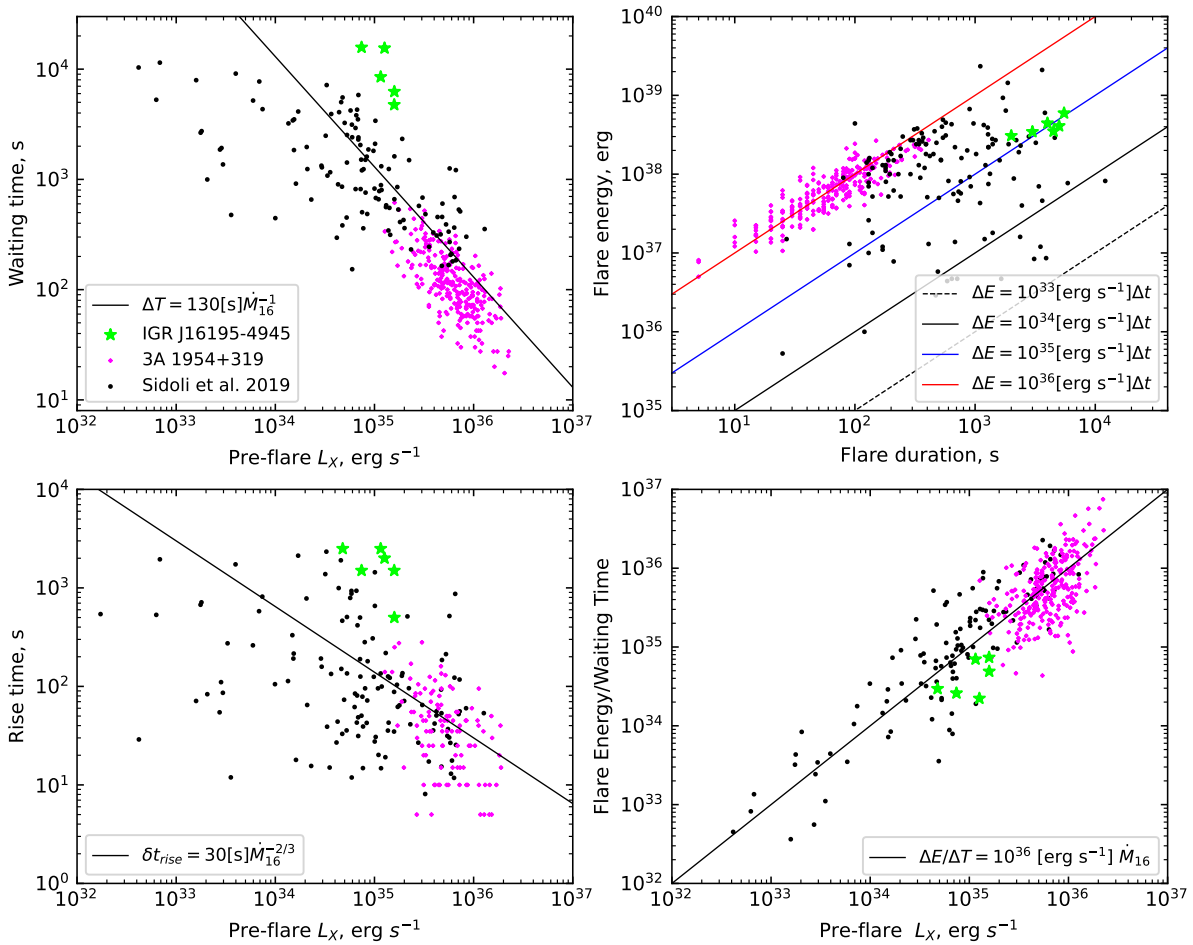


Рис. 18. Характеристики всплесков 3A 1954+319 и зависимости, описываемые моделью "оседающей" аккреции

Как видно на рисунках временные масштабы всплесков 3A 1954+319 заметно короче, чем у SFXT. Оценка скорости звездного ветра из формулы 6 дает значение $v_w \sim 1700 \text{ км } s^{-1}$. Это противоречит текущим представлениям о звездном ветре красных сверхгигантов, скорость которых оценивается $10 - 30 \text{ км } s^{-1}$. Подобное обсуждалось в работе (Enoto et al., 2014), что в случае НЗ с полем $10^{12} - 10^{13}$ Гс вращательное равновесие может быть объяснено быстрым ветром звезды-донора. Следовательно, модель оседающей аккреции не применима к данной системе.

4.2.6 Заключение

В наблюдении обсерватории NuSTAR за 3A 1954+319 было обнаружено 280 всплесков. Средняя болометрическая светимость составила $L_{bol} = (1.6_{-0.7}^{+0.5}) \times 10^{36}$ эрг с^{-1} . Для объяснения наблюдаемых всплесков в рамках модели оседающей аккреции необходима высокая скорость звездного ветра $v_w \sim 1700$ км с^{-1} , что на порядки выше оцениваемых скоростей ветра других красных сверхгигантов $10 - 30$ км с^{-1} .

Заключение

За время работы были получены навыки работы с научной литературой, обработки и интерпретации рентгеновских данных. Были освоены методики проведения временного анализа - реализован и использован поиск периодичностей методом наложения эпох. Получен большой опыт проведения спектрального анализа с использованием пакета XSPEC для описания спектра рентгеновских источников по данным разных телескопов.

Было проведено исследование быстрого рентгеновского транзиента IGR J16195-4945 по данным длительного непрерывного наблюдения телескопа ART-XC. На построенной кривой блеска было обнаружено 6 ярких всплесков. По кривым блеска в диапазонах 4-8 кэВ и 8-20 кэВ и измеренной жесткости было показано, что во время вспышек не происходило значимого изменения жесткости источника - источник демонстрировал "бесцветную" переменность. Временной анализ не выявил наличия периодических пульсаций от источника в интервале 10-1000 секунд на уровне значимости 4.5σ . Спектральный анализ подтвердил обнаруженную "бесцветность". Широкополосный спектр, построенный по совокупным данным ART-XC и телескопов обсерватории Swift, хорошо описывается моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на энергии ≈ 13 кэВ и существенным поглощением $N_H \approx 10^{23}$ см $^{-2}$.

Поскольку средняя светимость источника оказалась ниже критической, мы сравнили параметры наблюдавшихся вспышек в IGR J16195-4945 со вспышками в других SFXT и с предсказаниями модели "оседающей" аккреции. Параметры вспышек от источника близки к таковым для других известных систем. У системы обнаружена значительная быстрая переменность в ближнем инфракрасном диапазоне, которая не может быть объяснена в простых предположениях и требует дальнейшего исследования.

Также была исследована массивная рентгеновская двойная с красным сверхгигантом 3A 1954+319. Были проанализированы данные наблюдения NuSTAR за данным источником. В наблюдении было обнаружено 280 всплесков. Средняя болометрическая светимость составила $L_{bol} = (1.6_{-0.7}^{+0.5}) \times 10^{36}$ эрг с $^{-1}$, которая удовлетворяет условиям протекания оседающей аккреции. Для объяснения наблюдаемых всплесков в рамках такой модели необходима высокая скорость звездного ветра $v_w \sim 1700$ км с $^{-1}$, что на порядки выше оцениваемых скоростей ветра других красных сверхгигантов 10 – 30 км с $^{-1}$.

Подводя итоги можно сказать, что всплески IGR J16195-4945 хорошо описываются моделью оседающей аккреции и согласуются с другими SFXT. Предсказанная моделью скорость звездного ветра согласуется с измеренными скоростями ОВ сверхгигантов. Всплески 3A 1954+319 заметно отличаются от всплесков SFXT - происходят в ~ 10 раз чаще, длятся в $\sim 10-100$ раз. Предсказанная моделью скорость ветра, оказалась нефизично высокой для красных сверхгигантов. Таким образом, модель квазисферической дозвуковой оседающей аккреции подходит для описания многих SFXT. Модель оседающей аккреции, вероятно, не совсем применима к системам с аккрецией ветра красных сверхгигантов - по крайней мере к системе 3A 1954+319.

Благодарности

Я хотел бы выразить глубокую благодарность и признательность моему научному руководителю Мереминскому Илье Александровичу за поддержку и помощь на протяжении всего периода нашей совместной работы.

Также хочу поблагодарить коллег из комнаты 430т, особенно Мухина Андрея и Круглова Алексея, за обсуждения разнообразных интересных вопросов.

Благодарю своих родителей и близких за постоянную поддержку и терпение.

Список литературы

- [1] Riccardo Giacconi et al. «Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System». *Phys. Rev. Lett.* **9** 11 (Dec. 1962), pp. 439–443. DOI: 10.1103/PhysRevLett.9.439.
- [2] I. S. Shklovsky. «On the Nature of the Source of X-Ray Emission of Sco XR-1.». *ApJ* **148** (Apr. 1967), p. L1. DOI: 10.1086/180001.
- [3] S. Sazonov et al. «The Galactic LMXB Population and the Galactic Centre Region». *New A Rev.* **88** 101536 (June 2020), p. 101536. DOI: 10.1016/j.newar.2020.101536. arXiv: 2006.05063 [astro-ph.HE].
- [4] N. I. Shakura, R. A. Sunyaev. «Black holes in binary systems. Observational appearance.». *A&A* **24** (Jan. 1973), pp. 337–355.
- [5] Roland Walter et al. «High-mass X-ray binaries in the Milky Way. A closer look with INTEGRAL». *A&A Rev.* **23** 2 (Aug. 2015), p. 2. DOI: 10.1007/s00159-015-0082-6. arXiv: 1505.03651 [astro-ph.HE].
- [6] A. T. Okazaki, I. Negueruela. «A natural explanation for periodic X-ray outbursts in Be/X-ray binaries». *A&A* **377** (Oct. 2001), pp. 161–174. DOI: 10.1051/0004-6361:20011083. arXiv: astro-ph/0108037 [astro-ph].
- [7] J. J. M. in't Zand. «Chandra observation of the fast X-ray transient IGR J17544-2619: evidence for a neutron star?» *A&A* **441** 1 (Oct. 2005), pp. L1–L4. DOI: 10.1051/0004-6361:200500162. arXiv: astro-ph/0508240 [astro-ph].
- [8] R. Walter, J. Zurita Heras. «Probing clumpy stellar winds with a neutron star». *A&A* **476** 1 (Dec. 2007), pp. 335–340. DOI: 10.1051/0004-6361:20078353. arXiv: 0710.2542 [astro-ph].
- [9] Silvia Martínez-Núñez et al. «Towards a Unified View of Inhomogeneous Stellar Winds in Isolated Supergiant Stars and Supergiant High Mass X-Ray Binaries». *Space Sci. Rev.* **212** 1-2 (Oct. 2017), pp. 59–150. DOI: 10.1007/s11214-017-0340-1. arXiv: 1701.08618 [astro-ph.HE].
- [10] L. Sidoli et al. «An alternative hypothesis for the outburst mechanism in supergiant fast X-ray transients: the case of IGR J11215-5952». *A&A* **476** 3 (Dec. 2007), pp. 1307–1315. DOI: 10.1051/0004-6361:20078137. arXiv: 0710.1175 [astro-ph].

- [11] L. Sidoli. «Supergiant Fast X-ray Transients - A short review». *XII Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources Workshop (MULTIF2017)*. June 2017, 52, p. 52. DOI: 10.22323/1.306.0052. arXiv: 1710.03943 [astro-ph.HE].
- [12] N. Shakura et al. «Theory of quasi-spherical accretion in X-ray pulsars». *MNRAS* **420** 1 (Feb. 2012), pp. 216–236. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.20026.x. arXiv: 1110.3701 [astro-ph.HE].
- [13] H. Bondi. «On spherically symmetrical accretion». *MNRAS* **112** (Jan. 1952), p. 195. DOI: 10.1093/mnras/112.2.195.
- [14] Nikolai I. Shakura et al. «Quasispherical subsonic accretion in X-ray pulsars». *Physics Uspekhi* **56** 4 321–346 (Apr. 2013), pp. 321–346. DOI: 10.3367/UFNe.0183.201304a.0337. arXiv: 1302.0500 [astro-ph.HE].
- [15] N. Shakura et al. «Bright flares in supergiant fast X-ray transients». *MNRAS* **442** 3 (Aug. 2014), pp. 2325–2330. DOI: 10.1093/mnras/stu1027. arXiv: 1405.5707 [astro-ph.HE].
- [16] Lara Sidoli et al. «Supergiant Fast X-ray Transients uncovered by the EXTraS project: flares reveal the development of magnetospheric instability in accreting neutron stars». *MNRAS* **487** 1 (July 2019), pp. 420–434. DOI: 10.1093/mnras/stz1283. arXiv: 1905.00897 [astro-ph.HE].
- [17] Diana M. Marcu et al. «The 5 hr Pulse Period and Broadband Spectrum of the Symbiotic X-Ray Binary 3A 1954+319». *ApJ* **742** 1 L11 (Nov. 2011), p. L11. DOI: 10.1088/2041-8205/742/1/L11. arXiv: 1111.1019 [astro-ph.HE].
- [18] S. A. Grebenev, R. A. Sunyaev. «The first observation of AX J1749.1-2733 in a bright X-ray state—Another fast transient revealed by INTEGRAL». *Astronomy Letters* **33** 3 (Mar. 2007), pp. 149–158. DOI: 10.1134/S1063773707030024.
- [19] P. Romano et al. «The 100-month Swift catalogue of supergiant fast X-ray transients. I. BAT on-board and transient monitor flares». *A&A* **562** A2 (Feb. 2014), A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201322516. arXiv: 1312.4955 [astro-ph.HE].
- [20] R. Giacconi et al. «The Einstein (HEAO 2) X-ray Observatory.» *ApJ* **230** (June 1979), pp. 540–550. DOI: 10.1086/157110.
- [21] R. Sunyaev et al. «SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results». *A&A* **656** A132 (Dec. 2021), A132. DOI: 10.1051/0004-6361/202141179. arXiv: 2104.13267 [astro-ph.HE].
- [22] P. Predehl et al. «The eROSITA X-ray telescope on SRG». *A&A* **647** A1 (Mar. 2021), A1. DOI: 10.1051/0004-6361/202039313. arXiv: 2010.03477 [astro-ph.HE].
- [23] M. Pavlinsky et al. «The ART-XC telescope on board the SRG observatory». *A&A* **650** A42 (June 2021), A42. DOI: 10.1051/0004-6361/202040265. arXiv: 2103.12479 [astro-ph.HE].

-
- [24] Fiona A. Harrison et al. «The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-energy X-Ray Mission». *ApJ* **770** 2 103 (June 2013), p. 103. DOI: 10.1088/0004-637X/770/2/103. arXiv: 1301.7307 [astro-ph.IM].
- [25] D. A. Leahy et al. «On searches for pulsed emission with application to four globular cluster X-ray sources : NGC 1851, 6441, 6624 and 6712.» *ApJ* **266** (Mar. 1983), pp. 160–170. DOI: 10.1086/160766.
- [26] Jeffrey D. Scargle et al. «Studies in Astronomical Time Series Analysis. VI. Bayesian Block Representations». *ApJ* **764** 2 167 (Feb. 2013), p. 167. DOI: 10.1088/0004-637X/764/2/167. arXiv: 1207.5578 [astro-ph.IM].
- [27] Astropy Collaboration et al. «The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package». *apj* **935** 2 167 (Aug. 2022), p. 167. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7c74. arXiv: 2206.14220 [astro-ph.IM].
- [28] F. Lebrun et al. «ISGRI: The INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager». *A&A* **411** (Nov. 2003), pp. L141–L148. DOI: 10.1051/0004-6361:20031367. arXiv: astro-ph/0310362 [astro-ph].
- [29] C. Winkler et al. «The INTEGRAL mission». *A&A* **411** (Nov. 2003), pp. L1–L6. DOI: 10.1051/0004-6361:20031288.
- [30] Erik Kuulkers et al. «INTEGRAL reloaded: Spacecraft, instruments and ground system». *New A Rev.* **93** 101629 (Dec. 2021), p. 101629. DOI: 10.1016/j.newar.2021.101629.
- [31] V. Sguera et al. «Unveiling Supergiant Fast X-Ray Transient Sources with INTEGRAL». *ApJ* **646** 1 (July 2006), pp. 452–463. DOI: 10.1086/504827. arXiv: astro-ph/0603756 [astro-ph].
- [32] L. Sidoli et al. «The soft X-ray counterpart of the newly discovered INTEGRAL source IGR J16195-4945». *A&A* **429** (Jan. 2005), pp. L47–L50. DOI: 10.1051/0004-6361:200400114. arXiv: astro-ph/0411610 [astro-ph].
- [33] John A. Tomsick et al. «Identifications of Four INTEGRAL Sources in the Galactic Plane via Chandra Localizations». *ApJ* **647** 2 (Aug. 2006), pp. 1309–1322. DOI: 10.1086/505595. arXiv: astro-ph/0603810 [astro-ph].
- [34] A. Coleiro et al. «Infrared identification of high-mass X-ray binaries discovered by INTEGRAL». *A&A* **560** A108 (Dec. 2013), A108. DOI: 10.1051/0004-6361/201322382. arXiv: 1310.0451 [astro-ph.HE].
- [35] D. C. Morris et al. «Suzaku Observations of Four Heavily Absorbed HMXBs». *ApJ* **699** 1 (July 2009), pp. 892–901. DOI: 10.1088/0004-637X/699/1/892. arXiv: 0808.3141 [astro-ph].

- [36] G. Cusumano et al. «Swift reveals the eclipsing nature of the high-mass X-ray binary IGR J16195-4945». *MNRAS* **456** 3 (Mar. 2016), pp. 2717–2721. DOI: 10.1093/mnras/stv2851. arXiv: 1601.08148 [astro-ph.HE].
- [37] L. M. Oskinova, A. Feldmeier, P. Kretschmar. «Clumped stellar winds in supergiant high-mass X-ray binaries: X-ray variability and photoionization». *MNRAS* **421** 4 (Apr. 2012), pp. 2820–2831. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20507.x. arXiv: 1201.1915 [astro-ph.SR].
- [38] L. Sidoli et al. «NuSTAR observation of the supergiant fast X-ray transient IGR J11215-5952 during its 2017 outburst». *A&A* **638** A71 (June 2020), A71. DOI: 10.1051/0004-6361/202038078. arXiv: 2004.10452 [astro-ph.HE].
- [39] P. Romano. «Seven years with the Swift Supergiant Fast X-ray Transients project». *Journal of High Energy Astrophysics* **7** (Sept. 2015), pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.jheap.2015.04.008. arXiv: 1504.07249 [astro-ph.HE].
- [40] Kyuseok Oh et al. «The 105-Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey». *ApJS* **235** 1 4 (Mar. 2018), p. 4. DOI: 10.3847/1538-4365/aaa7fd. arXiv: 1801.01882 [astro-ph.HE].
- [41] N. I. Shakura et al. «Wind accretion: Theory and observations». *Astronomy Reports* **59** 7 (July 2015), pp. 645–655. DOI: 10.1134/S1063772915070112. arXiv: 1407.3163 [astro-ph.HE].
- [42] D. Minniti et al. «VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way». *New A* **15** 5 (July 2010), pp. 433–443. DOI: 10.1016/j.newast.2009.12.002. arXiv: 0912.1056 [astro-ph.GA].
- [43] B. Buysschaert et al. «Kepler’s first view of O-star variability: K2 data of five O stars in Campaign 0 as a proof of concept for O-star asteroseismology». *MNRAS* **453** 1 (Oct. 2015), pp. 89–100. DOI: 10.1093/mnras/stv1572. arXiv: 1507.03091 [astro-ph.SR].
- [44] C. Aerts et al. «Kepler sheds new and unprecedented light on the variability of a blue supergiant: Gravity waves in the O9.5Iab star HD 188209». *A&A* **602** A32 (June 2017), A32. DOI: 10.1051/0004-6361/201730571. arXiv: 1703.01514 [astro-ph.SR].
- [45] W. Forman et al. «The fourth Uhuru catalog of X-ray sources.» *ApJS* **38** (Dec. 1978), pp. 357–412. DOI: 10.1086/190561.
- [46] R. S. Warwick et al. «The Ariel V (3A) catalogue of X-ray sources. I.» *MNRAS* **197** (Dec. 1981), pp. 865–891. DOI: 10.1093/mnras/197.4.865.
- [47] R. S. Warwick et al. «A survey of the galactic plane with EXOSAT.» *MNRAS* **232** (June 1988), pp. 551–564. DOI: 10.1093/mnras/232.3.551.
- [48] M. C. Cook, R. S. Warwick, M. G. Watson. «EXOSAT observations of 3A 1954+319.» *X-ray Astronomy 1984*. Ed. by Minoru Oda, Riccardo Giacconi. Jan. 1985, pp. 225–228.

- [49] R. W. Tweedy, R. S. Warwick, R. Remillard. «3A:1954+319 - a Possible Supergiant X-Ray Binary». *Two Topics in X-Ray Astronomy, Volume 1: X Ray Binaries. Volume 2: AGN and the X Ray Background*. Ed. by J. Hunt, B. Battrick. Vol. 1. ESA Special Publication. Nov. 1989, p. 661.
- [50] N. Masetti et al. «M-type giants as optical counterparts of X-ray sources 4U 1700+24 and 4U 1954+319». *A&A* **453** 1 (July 2006), pp. 295–299. DOI: 10.1051/0004-6361:20065025. arXiv: astro-ph/0603227 [astro-ph].
- [51] R. Corbet et al. «Swift/BAT Detection of a 5 hour Period in 4U 1954+31». *The Astronomer's Telegram* **797** (Apr. 2006), p. 1.
- [52] R. H. D. Corbet et al. «A Comparison of the Variability of the Symbiotic X-Ray Binaries GX 1+4, 4U 1954+31, and 4U 1700+24 from Swift BAT and RXTE ASM Observations». *ApJ* **675** 2 (Mar. 2008), pp. 1424–1435. DOI: 10.1086/526337. arXiv: 0711.1519 [astro-ph].
- [53] F. Mattana et al. «A new symbiotic low mass X-ray binary system: 4U 1954+319». *A&A* **460** 2 (Dec. 2006), pp. L1–L4. DOI: 10.1051/0004-6361:20066154. arXiv: astro-ph/0610158 [astro-ph].
- [54] Kenneth H. Hinkle et al. «The M Supergiant High-mass X-Ray Binary 4U 1954+31». *ApJ* **904** 2 143 (Dec. 2020), p. 143. DOI: 10.3847/1538-4357/abbe01. arXiv: 2010.01081 [astro-ph.SR].
- [55] David L. Kaplan et al. «Lost and Found: A New Position and Infrared Counterpart for the X-Ray Binary Scutum X-1». *ApJ* **661** 1 (May 2007), pp. 437–446. DOI: 10.1086/513712. arXiv: astro-ph/0701092 [astro-ph].
- [56] Amy M. Gottlieb et al. «A Rapidly Varying Red Supergiant X-Ray Binary in the Galactic Center». *ApJ* **896** 1 32 (June 2020), p. 32. DOI: 10.3847/1538-4357/ab90ff. arXiv: 2006.15124 [astro-ph.HE].
- [57] E. Bozzo et al. «Accretion of a clumped wind from a red supergiant donor on to a magnetar is suggested by the analysis of the XMM-Newton and NuSTAR observations of the X-ray binary 3A 1954+319». *MNRAS* **510** 3 (Mar. 2022), pp. 4645–4653. DOI: 10.1093/mnras/stab3688. arXiv: 2112.08517 [astro-ph.HE].
- [58] Teruaki Enoto et al. «Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-Ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-Ray Binary System». *ApJ* **786** 2 127 (May 2014), p. 127. DOI: 10.1088/0004-637X/786/2/127. arXiv: 1404.0134 [astro-ph.HE].