

На правах рукописи

**Кузнецова Екатерина Александровна**

**Рентгеновское излучение диффузной среды и звёздных  
остатков в центральной части Галактики**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

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

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

кандидат физико-математических наук  
**Кривонос Роман Александрович**

Официальные оппоненты: **Быков Андрей Михайлович,**  
доктор физико-математических наук, член-  
корреспондент РАН, Физико-Технический  
институт им. А.Ф. Иоффе Российской акаде-  
мии наук, руководитель отделения физики плазмы,  
атомной физики и астрофизики

**Зиракашвили Владимир Николаевич,**  
доктор физико-математических наук, Институт  
земного магнетизма, ионосферы и распростра-  
нения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской  
академии наук, главный научный сотрудник Лабо-  
ратории астрофизических исследований

Ведущая организация: Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится 22 сентября 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертацион-  
ного совета Д 002.113.04 при Институте космических исследований Российской  
Академии Наук 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/2022/kuznetsova.htm>.

Автореферат разослан 16 августа 2022 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.113.04,  
кандидат физико-математических наук



Ткаченко Алексей Юрьевич

## Актуальность темы исследования

Принято считать, что в центрах многих галактик расположены сверхмассивные чёрные дыры (СМЧД) с массами  $10^5 - 10^{10} M_{\odot}$ . В современной науке вопрос формирования и роста СМЧД является открытым. Важной задачей, которая поможет прояснить физическую картину о формировании и свойствах чёрных дыр в центрах галактик, является изучение переменности излучения СМЧД и исследование их ближайшего окружения, т. к. предположительно, чёрные дыры увеличивают свою массу за счёт процесса аккреции.

Наиболее доступной для детального изучения является СМЧД, расположенная в динамическом центре галактики Млечный Путь, с массой  $\sim 4,15 \cdot 10^6 M_{\odot}$ , удалённая на 8,178 кпк [1] и совпадающая с радиоисточником Стрелец  $A^*$ . В окрестности этой СМЧД имеется большое разнообразие астрофизических объектов: молекулярные облака, пыль, нетепловые филаменты, звёздные скопления, области звездообразования, точечные источники, остатки вспышек сверхновых и т. д. Наблюдения Галактического центра (ГЦ) в оптическом диапазоне не позволяют получить полную информацию из этой густонаселённой области ввиду сильного поглощения излучения молекулярными облаками и пылью, находящимися в плоскости диска Галактики. Наиболее подходящими диапазонами для исследования ГЦ являются радио, инфракрасный и рентгеновский.

В настоящий момент СМЧД Стрелец  $A^*$  находится в спокойном состоянии со светимостью  $L_{2-10 \text{ кэВ}} \sim 2 \cdot 10^{33} \text{ эрг с}^{-1}$  в энергетическом диапазоне 2–10 кэВ, которая на 10 порядков меньше её предельной светимости [2] при эддингтоновской скорости аккреции, предсказанной теорией аккреции из стандартного тонкого диска на чёрную дыру. Современное спокойное состояние чёрной дыры Стрелец  $A^*$  вызывает вопрос о том, была ли она активна в прошлом. Сюняев и др. [3] предположили, что излучение жёстких рентгеновских вспышек источников, подобных Стрельцу  $A^*$ , может быть причиной наблюдаемого рентгеновского излучения вещества близко расположенных молекулярных облаков (механизм «комптоновского зеркала»). Такие облака должны проявлять переменность в рентгеновском диапазоне на масштабе от года до нескольких лет, что и наблюдается для облаков Центральной Молекулярной Зоны (ЦМЗ) [4].

ЦМЗ, расположенная в ГЦ, имеет размер около 200 пк и содержит около 10 % всего молекулярного газа Галактики. По предположению Сюняева и др. [3], отражённое излучение должно иметь жёсткий рентгеновский континуум, сильно поглощённый на низких энергиях, и флуоресцентную линию нейтрального или слабо ионизированного железа ( $\text{Fe } K_{\alpha}$ ) на энергии 6,4 кэВ, формирующуюся в результате фотоионизации К-оболочки. Кроме того, линия излучения 6,4 кэВ должна обладать большим значением эквивалентной ширины (около 1 кэВ). Предположительно, излучение, зарегистрированное от молекулярных облаков ГЦ (например, Рисунок 1), вызвано отражением вспышки СМЧД Стрелец  $A^*$ , произошедшей в прошлом. Понти и др. [4] провели работу по изучению рентгеновского излучения ЦМЗ и обнаружили распространение фронта вспышки от

ближних к СМЧД областей к более дальним, что также подтверждает механизм «комптоновского зеркала», действующий в ГЦ, и прошлую активность СМЧД Стрелец  $A^*$ .

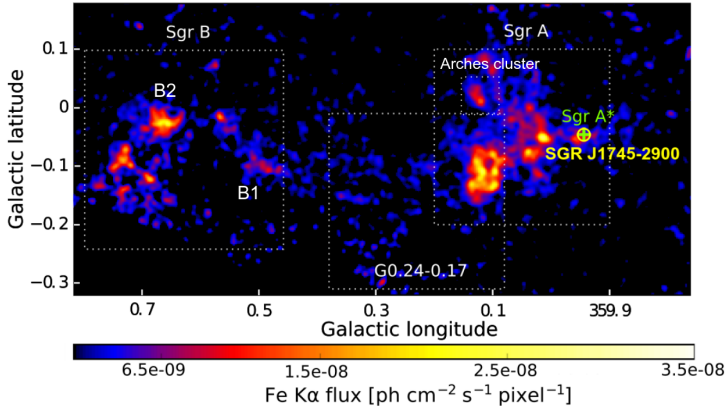


Рис. 1 — Центральная область Галактики в линии излучения 6,4 кэВ по данным обсерватории *XMM-Ньютон* за период 2000–2001 гг. [5, Рисунок 3]. Карты построены в единицах интенсивности излучения фот.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  пиксель $^{-1}$  с вычтенным фоном и скорректированные на экспозицию. Пунктирные квадратные области демонстрируют положения молекулярных облаков, названия которых указаны на рисунке. Источник СМЧД Стрелец  $A^*$  отмечен зелёным крестиком. Положение магнитара SGR J1745–2900 отмечено жёлтым кружком. Стоит отметить, что излучение магнитара не даёт вклад в данное изображение, т. к. SGR J1745–2900 не был активен в 2000–2001 гг. и не излучал в линии 6,4 кэВ, и его положение отмечено здесь для наглядности. Молекулярное облако Стрелец Б, в состав которого входит Стрелец Б2, и звёздное скопление Арки с его молекулярным облаком обозначены «Sgr B» и «Arches cluster» соответственно.

Ещё одной гипотезой, способной объяснить рентгеновское излучение молекулярного вещества, может служить взаимодействие молекулярного газа с низкоэнергетическими космическими лучами (Low-energy cosmic rays, LECR) [6], которые посредством процессов тормозного излучения и флуоресценции могут произвести рентгеновский континуум и  $K_{\alpha}$  линию излучения нейтрального железа на энергии 6,4 кэВ [6]. Однако этот механизм сталкивается с серьёзными трудностями. Такое излучение не должно проявлять переменности на масштабе нескольких лет, что противоречит результатам наблюдений молекулярного вещества в ГЦ [7]. Следует отметить, что электроны космических лучей ввиду очень интенсивных потерь энергии потенциально могут объяснить наблюдаемую переменность [7], однако для этого необходимо, чтобы рядом с молекулярными облаками находилось несколько переменных источников электронов, что маловероятно [7]. Кроме того, оценки металличности среды для

такой модели значительно превышают значения, измеренные в области ГЦ [8]. Тем не менее, в том случае, когда фронт рентгеновской вспышки завершит свое прохождение по облаку, постоянное излучение, вызванное космическими лучами (КЛ), может стать видимым [7].

Примерами облаков, излучение которых, скорее всего, вызвано именно механизмом «комптоновского зеркала», являются массивное облако Стрелец Б2 и облако, расположенное около звёздного скопления Арки (положения облаков показаны на Рисунке 1). Эти облака около 8 лет демонстрировали постоянный уровень излучения, которое в какой-то момент начало затухать [9; 10]. Стало ли это излучение ниже уровня регистрации современными детекторами или достигло постоянного уровня, обусловленного взаимодействием вещества молекулярных облаков с КЛ — один из вопросов, исследуемых в диссертации. Необходимы регулярные наблюдения за уровнем потока рентгеновского излучения этих облаков и его морфологией, чтобы дать ответ на вопрос о происхождении излучения, выявить активность СМЧД Стрелец А\* в прошлом и получить ограничения на популяцию КЛ в ГЦ. Таким образом, временной и спектральный анализ позволяет пролить свет на природу рентгеновского излучения молекулярных облаков в ГЦ.

В центральной области Галактики на луче зрения встречается большое количество диффузных источников. В результате эволюции звёзд образуются диффузные остатки вспышек сверхновых, расширяющиеся оболочки которых, предположительно, являются одними из самых мощных ускорителей КЛ. Наиболее изученным остатком вспышки сверхновой с оболочкой является RX J1713.7–3946 ввиду своего близкого расположения к Земле (1 кпк). RX J1713.7–3946 расположен вдоль луча зрения по направлению к ГЦ на проекционном расстоянии  $\sim 13^\circ$  от СМЧД Стрелец А\* (см. Рисунок 2). RX J1713.7–3946 хорошо изучен в рентгеновском диапазоне на энергиях до 10 кэВ, однако на более высоких энергиях морфология и форма его спектра остаются до конца не известными ввиду большого углового размера RX J1713.7–3946 (около  $1^\circ$  в диаметре), что делает его сложной мишенью для наблюдений на энергиях выше 10 кэВ. Исследования рентгеновского излучения RX J1713.7–3946 важны для понимания процессов ускорения КЛ на оболочках сверхновых.

Особый интерес представляет густонаселённая область около самой СМЧД. Одним из конкретных примеров объектов ближайшего населения СМЧД является магнитар SGR J1745–2900, который был обнаружен на угловом расстоянии  $2,4''$  от Стрельца А\* [11] (см. Рисунок 1). Магнитары — это молодые нейтронные звезды, обладающие сильными магнитными полями с напряжённостью  $B \sim 10^{14} - 10^{15}$  Гс, которые являются источниками энергии их излучения [12]. Предположительно, магнитары рождаются из быстро вращающихся нейтронных звёзд с периодами 1–2 мс в результате усиления магнитного поля турбулентным динамо в первые секунды после взрыва сверхновой [13]. Однако, существуют и другие гипотезы образования магнитаров, например, коллапс массивных звёзд с сильными магнитными полями [14] или

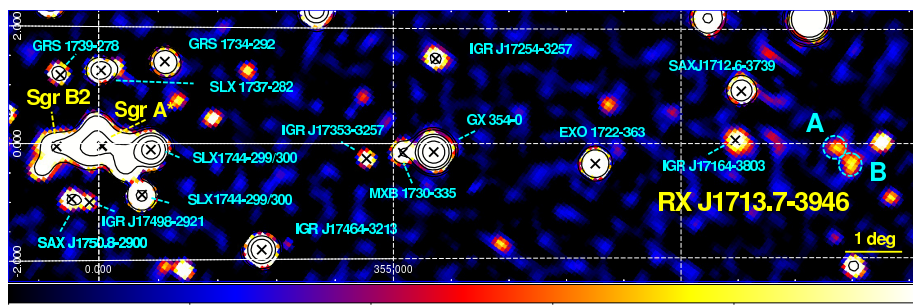


Рис. 2 — Изображение плоскости Галактики по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в единицах значимости регистрации, построенное в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ. Самые яркие источники обозначены крестиками. Название каждого источника указано на рисунке. Чёрные контуры соответствуют следующим уровням значимости регистрации: 10, 20, 60, 100 и 200 $\sigma$ . На данной карте крупным шрифтом отмечены источники, исследуемые в данной диссертации. Стоит отметить, что остаток вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* проявляет себя как две яркие области, обозначенные «А» и «В». Координатная сетка соответствует Галактическим координатам.

эволюция двойной системы массивных звёзд [15]. Таким образом, в звёздном диске вокруг СМЧД Стрелец  $A^*$ , содержащем большое количество массивных молодых звёзд [16], должны образовываться нейтронные звёзды, проявляющие себя как пульсары. SGR J1745–2900 — самый близкий к СМЧД пульсар, что делает его уникальным инструментом, позволяющим исследовать популяцию звёздного населения ГЦ.

В рентгеновском диапазоне магнитары проявляют себя как источники постоянного излучения и мощных рентгеновских вспышек со светимостями до  $L_X \sim 10^{47}$  эрг  $s^{-1}$  и длительностями от долей до сотен секунд. На данный момент известно 30 магнитаров [17], которые составляют не менее 10% популяции молодых нейтронных звёзд. Процессы формирования излучения магнитаров имеют большое количество открытых вопросов, для решения которых нужно как можно больше данных наблюдений этих объектов. Исследования рентгеновского излучения SGR J1745–2900 дополняют картину формирования этого излучения и процессов, приводящих к рентгеновским вспышкам магнитаров и происходящих во время самой вспышки.

**Основными целями диссертационной работы являются:** изучение рентгеновского излучения диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики. **Задачи работы:** исследование излучения молекулярного облака около скопления Арки и облака Стрелец Б2, исследование рентгеновского излучения остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 и исследование

переменности излучения магнитара SGR J1745–2900 с целью определения физических параметров.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Исследования рентгеновского излучения молекулярных облаков ГЦ позволят дополнить картину отражения рентгеновской вспышки СМЧД Стрелец  $A^*$ , определить геометрию расположения облаков, количество вспышек и их возраст и энерговыделение, что прольёт свет на процессы аккреции, приводящие к вспышкам на СМЧД. Считается, что аккреция вещества из Галактического балджа на СМЧД приводит к росту её массы. Таким образом, знание механизмов, приводящих к вспышкам на СМЧД, поможет пролить свет и на процессы увеличения массы СМЧД. Также такие исследования помогут ограничить популяцию КЛ в ГЦ. Исследование рентгеновского излучения оболочек сверхновых дополнит картину механизма ускорения КЛ. Подробная фазированная спектроскопия рентгеновского излучения магнитаров может помочь в исследовании процесса формирования излучения и вспышек магнитаров.

### **Методология и методы исследования**

Методом диагностики прошлой активности СМЧД Стрелец  $A^*$  является исследование свойств отражённого жёсткого рентгеновского континуума и флуоресцентной линии железа 6,4 кэВ, регистрируемых от молекулярного облака Стрелец Б2 и облака, расположенного в окрестности скопления Арки. Для получения информации об излучении молекулярного облака около скопления Арки были использованы наблюдения орбитального телескопа *NuSTAR* в 2015–2016 г. и обсерватории *XMM-Ньютон* в 2015 г. Проведённые исследования пространственных и спектральных особенностей излучения молекулярного облака Арки поставили под сомнение продолжение затухания его нетеплового излучения в 2016 г., что может указывать на изменение механизма формирования этого излучения. По данным всех доступных наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, собранных с 2003 по 2019 гг., была получена эволюция излучения облака Стрелец Б2, которая затем была аппроксимирована разными моделями. В результате аппроксимации кривой блеска и спектрального анализа излучения облака Стрелец Б2, было выявлено, что до 2011 г. излучение облака скорее всего было следствием прошлой активности СМЧД Стрелец  $A^*$ , в то время как дальнейшее излучение может быть связано с другими причинами. Была проведена проверка различных гипотез, объясняющих наблюдаемый уровень остаточного излучения облака Стрелец Б2.

Исследование процессов формирования рентгеновского излучения на оболочках сверхновых проводилось на примере остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946. Для этого использовались данные обсерваторий *XMM-Ньютон* с 2001 по 2017 гг. на энергиях до 10 кэВ и *ИНТЕГРАЛ* с 2003 по 2017 гг. на энергиях выше 17 кэВ. Сравнение изображений RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий *XMM-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ* и анализ радиальных профилей излучения на низких и высоких энергиях позволили сделать вывод о том, что в этих диапазонах положения ударных волн согласуются друг с другом, что

указывает на единый механизм формирования излучения. Кроме того, с помощью аппроксимации был измерен фотонный индекс степенного закона спектра RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ. Широкополосный спектральный анализ излучения остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий *ХММ-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ* позволил обнаружить изменение наклона степенного закона с ростом энергии. Сопоставление наклонов, измеренных по данным различных обсерваторий, помогло подтвердить теоретическую модель ускорения КЛ на оболочках сверхновых и уточнить её параметры.

Для исследования ближайшего окружения СМЧД Стрелец  $A^*$  были использованы данные орбитального телескопа *NuSTAR*, содержащие наблюдения активного состояния магнитара SGR J1745–2900 в 2013 г. Полученные в энергетических диапазонах 3–5 и 5–10 кэВ профили импульса рентгеновского излучения магнитара продемонстрировали три ярких пика. Используя статистические методы, были получены верхние пределы на наличие пульсаций на более высоких энергиях 10–20 кэВ. Также была определена доля пульсирующего излучения и проанализирована её зависимость от энергии и потока излучения магнитара. Фазируемая спектроскопия в широком рентгеновском диапазоне энергий для состояний с разным уровнем интенсивности излучения магнитара SGR J1745–2900 позволила выявить значимые изменения видимых размеров излучающей области, отвечающей за тепловое излучение, которые коррелируют с профилем импульса в диапазоне энергий 3–5 кэВ, при этом температура самого излучения остаётся постоянной с фазой.

### **Научная новизна**

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми.

Впервые была построена многолетняя эволюция рентгеновского излучения молекулярного облака Стрелец Б2 в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ по всем доступным данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* за период 2003–2019 гг. По сравнению с предыдущими работами рассматриваемый интервал времени был увеличен на 10 лет. Полученная кривая блеска согласуется как с линейным уменьшением потока на всем периоде наблюдений, так и с появлением постоянной компоненты после фазы линейного спада, причем согласно статистическим параметрам вторая модель является более предпочтительной. Для фаз второй модели были определены спектральные характеристики и проведено обсуждение возможных физических гипотез.

Впервые был проведён подробный пространственный и спектральный анализ излучения окрестности скопления Арки по данным наблюдений телескопа *NuSTAR* и получено указание на возможный выход излучения облака Арки на постоянный уровень. Также впервые был проведён подробный спектральный анализ отдельных частей излучения облака по данным обсерватории *ХММ-Ньютон*, который показал, что нетепловое излучение облака Арки является комбинацией излучений с различными спектральными параметрами, что может быть обусловлено различной геометрией отражения вспышки и/или разными вспышками СМЧД Стрелец  $A^*$ .



Впервые проведено детальное пространственное и спектральное исследование остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Сравнение изображения RX J1713.7–3946, полученного обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, с картой распределения поверхностной яркости RX J1713.7–3946 в рентгеновском диапазоне на энергиях ниже 10 кэВ по данным обсерватории *ХММ-Ньютон* показало, что положения ударных волн на низких и высоких энергиях рентгеновского диапазона согласуются, что указывает на единый механизм формирования излучения. Кроме того, было показано, что спектр RX J1713.7–3946 укручается с ростом энергии, что согласуется с аналитической моделью электронов, ускоренных на ударной волне в режиме диффузии, близкому к пределу Бомы.

Впервые была проведена подробная фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 по данным орбитального телескопа *NuSTAR* в широком энергетическом диапазоне, в результате которой были выявлены изменения видимой области формирования теплового излучения, коррелирующие с профилем импульса, при неизменной температуре. Обнаружено, что доля пульсирующего излучения в энергетических диапазонах 3–5 и 5–10 кэВ увеличивается с уменьшением потока излучения магнитара, что, возможно, обусловлено уменьшением радиуса области формирования теплового излучения.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность диссертации обеспечена использованием в своей основе наблюдательных данных различных космических обсерваторий, обработка и анализ которых проводились с помощью соответствующего программного обеспечения и статистических методов. Основные положения и выводы диссертации опубликованы в четырёх статьях рецензируемых научных изданий.

Кроме того, результаты диссертации были представлены на:

#### **– Международных конференциях и школах:**

1. XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, 2018 г., Вена, Австрия
2. Школа современной астрофизики ASTROSOMA, 2018 г., Долгопрудный, Россия
3. «XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии», симпозиум «The Periodic Table through Space and Time», 2019 г. Санкт-Петербург, Россия
4. «GCWS2019 — New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond», 2019 г., Иокогама, Япония

#### **– Всероссийских конференциях:**

1. «Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования"», 2018–2021 гг., Москва, Россия
2. «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», 2018–2019, 2021 гг., Москва, Россия

– семинарах отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

**Личный вклад автора.** Диссертант принимал активное участие на всех этапах работы, в том числе, участвовал в постановке задач и выборе методов их исследования, анализе экспериментальных данных и интерпретации результатов. По результатам диссертации было опубликовано 4 статьи 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. Исследована 17-летняя эволюция рентгеновского потока молекулярного облака Стрелец B2 на энергиях выше 17 кэВ. Обнаружена возможная постоянная составляющая рентгеновского излучения Стрельца B2 после фазы линейного уменьшения потока и определены её спектральные характеристики. Для объяснения излучения Стрельца B2 было рассмотрено несколько физических гипотез.
2. Показано, что поток нетеплового излучения молекулярного облака в окрестности звёздного скопления Арки предположительно достиг постоянного уровня после линейного уменьшения. Показано, что излучение молекулярного облака является комбинацией излучений с различными спектральными параметрами.
3. Построена первая крупномасштабная морфология остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ и показано, что положения ударных волн RX J1713.7–3946 на энергиях ниже 10 кэВ и выше 17 кэВ согласуются между собой, что указывает на единый механизм излучения. Измерен наклон спектра RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ  $\Gamma \sim 3,1$  и показано, что его укрупнение с ростом энергии согласуется с аналитической моделью излучения электронов, ускоренных на ударной волне в режиме диффузии, близком боровскому.
4. Показано, что размер видимой области формирования теплового излучения магнитара SGR J1745–2900 коррелирует с профилем импульса в энергетическом диапазоне 3–5 кэВ при неизменной температуре. Обнаружено увеличение доли пульсирующего излучения с уменьшением потока излучения источника, предположительно связанное с уменьшением радиуса области формирования теплового излучения.

**Список публикаций в рецензируемых журналах.**

1. Kuznetsova E., Krivonos R., Clavel M., Lutovinov A., Chernyshov D., Hong J., Mori K., Ponti G., Tomsick J., Zhang S., «Investigating the origin of the faint non-thermal emission of the Arches cluster using the 2015–2016 NuSTAR and XMM-Newton X-ray observations», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, Vol. 484, no. 2, P. 1627, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz119>
2. Kuznetsova E., Krivonos R., Churazov E., Lyskova N., Lutovinov A., «Progressive steepening of the SNR RX J1713.7–3946 X-ray spectrum from

- XMM-Newton to INTEGRAL», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, Vol. 489, no. 2, P. 1828, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2261>
3. Кузнецова Е. А., Лутовинов А. А., Семена А. Н., «Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745-2900 по данным обсерватории NuSTAR», *Письма в Астрономический журнал*, 2021, Т. 47, № 4, С. 250, <https://doi.org/10.31857/S0320010821040070>
  4. Kuznetsova E., Krivonos R., Lutovinov A., Clavel M., «Sgr B2 hard X-ray emission with INTEGRAL after 2009: still detectable?», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, Vol. 509, no. 2, P. 1605, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3004>

#### **Список публикаций в трудах конференций.**

1. Кузнецова Е. А., Кривonos Р. А., «Мониторинг нетеплового излучения звёздного скопления Арки в центре Галактики по данным обсерваторий NuSTAR и XMM-Newton», *Труды конференции «Конференция молодых ученых — КМУ2018»*
2. Kuznetsova E., Krivonos R., Churazov E., Lyskova N., Lutovinov A., Pavlinsky M., «Detailed analysis of the supernova remnant RX J1713.7-3946 at energies up to 120 keV with XMM-Newton, INTEGRAL and ART-XC», *New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond, ASP Conference Series*, 2021, Vol. 528, P. 441
3. Kuznetsova E., Krivonos R., «Hard X-ray non-thermal emission of the Arches cluster complex observed in 2015–2016 with NuSTAR and XMM-Newton», *New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond, ASP Conference Series*, 2021, Vol. 528, P. 79

## **Содержание работы**

Во **Введении** описываются актуальность и научная разработанность темы диссертации, цели и задачи, на решение которых нацелена диссертация, теоретическая и практическая значимость, научная новизна и методология исследования.

**Первая глава** посвящена исследованию прошлой активности СМЧД по рентгеновскому излучению молекулярных облаков ГЦ, а именно: облака Стрелец B2 и облака в окрестности скопления Арки.

**Первый раздел** этой главы содержит описание исследования рентгеновского излучения молекулярного облака Стрелец B2 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* на энергиях выше 17 кэВ. Для этой работы использовались все доступные данные телескопа с кодирующей апертурой *IBIS* с декабря 2002 по январь 2020 г. Изображение области ГЦ, полученное в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ по данным *IBIS*, демонстрирует источник IGR J17475–2822 [18] со значимостью регистрации  $24\sigma$ , положение которого согласуется с пиком распределения молекулярного газа облака Стрелец B2 [19]. Полученная кривая блеска

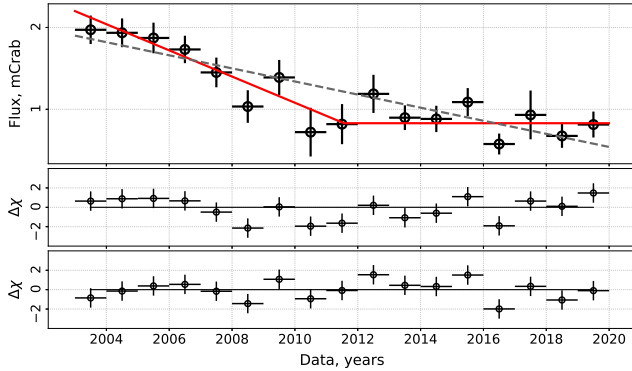


Рис. 3 — Кривая блеска молекулярного облака Стрелец B2 по данным телескопа *IBIS*, полученная в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ за период 2003–2019 гг. Пунктирная и сплошная линии на верхней панели рисунка демонстрируют линейную и кусочно-линейную функции наилучшей аппроксимации соответственно. Невязки линейной и кусочно-линейной функций расположены на средней и нижней панелях соответственно.

излучения Стрельца B2 в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ показала хорошее согласие с линейной функцией, описывающей постепенное затухание излучения, и кусочно-линейной, в которой линейно затухающее излучение переходит в постоянное в точке излома  $T_{\text{break}} = 2011 \pm 3$  г. При этом было показано, что вторая модель имеет тенденцию лучше описывать полученную кривую блеска Стрельца B2. Были получены оценки характерного времени, за которое поток уменьшается в два раза,  $\tau = 12 \pm 2$  лет и  $\tau = 6 \pm 2$  лет для линейной и кусочно-линейной функций соответственно. Стоит отметить, что оценка характерного времени для линейной функции слегка превышает оценку  $\tau = 8,2 \pm 1,7$  лет, полученную в работе Террьерера и др. за 2003–2009 гг. [9], в то время как характерное время для кусочно-линейной функции полностью с ней согласуется. Постоянный уровень потока Стрельца B2 был оценён на значении  $C = 0,83 \pm 0,10$  мКраб<sup>1</sup>, несовместимом с нулевым.

Было показано, что во время постоянной фазы излучения (после 2011 г.) источник IGR J17475–2822 продолжает регистрироваться на уровне значимости  $11\sigma$  с локализацией, согласующейся с положением Стрельца B2 [19]. Спектры Стрельца B2, полученные до и после 2011 г., что соответствует фазам линейного затухания и постоянного уровня потока излучения облака, показали хорошее согласие с моделью степенного закона с фотонным индексом  $\Gamma \sim 1,4$  и экспоненциальным завалом на энергии  $E_{\text{cut}} \sim 43$  кэВ. Также было показано, что оба спектра хорошо описываются моделью отражённого излучения *CREFL16* [20]

<sup>1</sup>Единица потока 1 мКраб эквивалентна потоку  $1,07 \times 10^{-11}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ для источника со спектром, аналогичным спектру Крабовидной Туманности, который может быть представлен в виде:  $10,0 \times E^{-2,1}$  кэВ фотонов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{кэВ}^{-1}$

для молекулярного облака с радиальной оптической толщиной Томсона  $\tau_T = 0,4$  и обилием тяжёлых элементов относительно солнечного  $Z/Z_\odot = 1,9$  [18]. При этом предполагалось, что облако и источник первичного излучения Стрелец  $A^*$  расположены в одной плоскости [18]. В результате был определён фотонный индекс первичной рентгеновской вспышки  $\Gamma = 2,34 \pm 0,13$ , согласующийся с  $\Gamma \sim 2$ , наблюдаемом в реальных вспышках СМЧД Стрелец  $A^*$  [21] и полученном по рентгеновскому излучению других молекулярных облаков [22;23]. Была оценена светимость, требуемая для получения наблюдаемого уровня потока Стрельца Б2 за периоды фазы линейного уменьшения  $L_{2-10 \text{ кэВ}} \sim 6 \cdot 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$  и постоянной фазы  $\sim 3 \cdot 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$  при радиусе облучаемой области 10 пк, что согласуется с предыдущими оценками для Стрельца Б2 [8;9;18]. Модель низкоэнергетических КЛ (протонов, *LECRp*) [6] применялась только к спектру постоянной фазы, в результате чего был определён наклон спектра КЛ  $s = 2,7 \pm 0,5$ .

По результатам анализа спектров и кривой блеска Стрельца Б2 был сделан вывод о том, что линейное затухание излучения, которое наблюдалось до 2011 г., хорошо согласуется со сценарием отражения прошлой вспышки СМЧД Стрелец  $A^*$ . Если же линейное затухание излучения происходит на всем периоде наблюдений 2003–2019 гг., сценарий отражения также является основным. Были приведены рассуждения о возможной природе остаточного излучения Стрельца Б2, наблюдающегося после 2011 г. Это излучение может быть результатом многократных рассеяний в предположении, что вспышка СМЧД покинула облако и однократные рассеяния уже не дают доминирующего вклада в рентгеновское излучение облака [24]. Для сценария КЛ был получен нижний предел на скорость ионизации КЛ  $\zeta_H \sim 5,6 \cdot 10^{-14} \text{ Н}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , который значительно превышает оценки, полученные ранее для облака Стрелец Б2  $\zeta_H \sim (6 - 10) \cdot 10^{-15} \text{ Н}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [8] и для области ГЦ  $\zeta_H \sim (1 - 3) \cdot 10^{-15} \text{ Н}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [25]. Высокое значение скорости ионизации КЛ делает гипотезу КЛ маловероятной для объяснения излучения Стрельца Б2 после 2011 г. Ещё одним возможным объяснением постоянного излучения, регистрирующегося из области Стрельца Б2, являются неразрешённые рентгеновские источники. Однако было установлено, что суммарный поток от источников, зарегистрированных орбитальным телескопом *NuSTAR* [8;26] в круговой области с радиусом  $12'$  (соответствует разрешающей способности телескопа *IBIS*), в  $\sim 2$  раза меньше потока, наблюдаемого от источника IGR J17475–2822 обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Это может быть связано с существованием дополнительных источников или с недостаточным учётом диффузного излучения телескопом *NuSTAR*.

**Второй раздел первой главы** посвящён исследованию рентгеновского излучения молекулярного облака, расположенного около звёздного скопления Арки, по данным обсерваторий *NuSTAR* и *ХММ-Ньютон* в 2015–2016 гг. В результате пространственного анализа изображений скопления Арки было показано, что в 2016 г. вокруг скопления наблюдается протяжённое излучение, которое не связано излучением самого скопления. Также было выявлено, что

параметры протяжённого излучения по данным 2016 г., совпадают с параметрами излучения, измеренными в 2015 г. Спектральный анализ в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ показал, что в 2016 г. помимо теплового излучения самого скопления, обусловленного множественными столкновениями звёздных ветров, наблюдается нетепловая компонента, характеризующаяся степенным законом с фотонным индексом  $\Gamma = 2,7_{-0,5}^{+0,4}$  и флуоресцентной линией Fe  $K_{\alpha}$  на энергии 6,4 кэВ с эквивалентной шириной  $EW_{6,4 \text{ кэВ}} = 580 \pm 250$  эВ. Полученные параметры нетепловой компоненты согласуются с результатами 2015 г., в том числе и с обнаруженным уменьшением эквивалентной ширины линии железа [23]. Нетепловой поток излучения, измеренный в 2016 г. остался на уровне 2015 г., что может говорить о возможном достижении постоянного уровня потока излучения. Однако, в пределах ошибок это же значение потока не противоречит и закону линейного уменьшения потока излучения, измеренному за период 2007–2015 гг. [23]. Так как ни пространственный анализ, ни спектральный не показали значимых изменений, была получена наиболее глубокая карта области скопления Арки по данным телескопа *NuSTAR* за 2015–2016 гг. (Рисунок 4). С добавлением информации по данным обсерватории *XMM-Ньютон*, полученным в 2015 г. на энергиях ниже 10 кэВ, были сделаны более точные оценки следующих спектральных параметров: межзвёздного поглощения  $N_H = (9,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-22} \text{ см}^{-2}$ , температуры теплового излучения  $kT = 1,95_{-0,12}^{+0,16}$  кэВ, фотонного индекса степенного закона нетеплового излучения  $\Gamma = 2,21 \pm 0,15$  и эквивалентной ширины флуоресцентной линии Fe  $K_{\alpha}$   $EW_{6,4 \text{ кэВ}} = 660 \pm 80$  эВ. Кроме того, был проведён спектральный анализ областей облака, которые отчётливо заметны в линии Fe  $K_{\alpha}$  6,4 кэВ в 2015 г. по данным обсерватории *XMM-Ньютон* (Рисунок 4). Анализ показал, что область S имеет более низкое значение эквивалентной ширины линии Fe  $K_{\alpha}$  6,4 кэВ на энергии 6,4 кэВ  $EW_{6,4 \text{ кэВ}} = 570 \pm 50$  эВ и более слабое поглощение  $N_H = (5,5 \pm 0,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ , чем остальные две области с  $EW_{6,4 \text{ кэВ}} \sim 900$  эВ и  $N_H \sim 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ . Это может быть следствием различного расположения частей облака на луче зрения и/или разными вспышками СМЧД СтрелецA\* [27].

**Вторая глава** представляет результаты исследования остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным космических обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *XMM-Ньютон*. На изображении RX J1713.7–3946, полученном по данным телескопа с кодирующей апертурой *IBIS* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ, выделяются две яркие области (Рисунок 5), обозначенные «А» и «В». Эти области совпадают с ярчайшими участками карты поверхностной яркости RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ, полученной по данным обсерватории *XMM-Ньютон*. Изображение RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ демонстрирует структуру двойной оболочки в западной части (Рисунок 5). Свёртка изображения обсерватории *XMM-Ньютон* с функцией распределения точечного источника (ФРТИ) телескопа *IBIS* (см. контуры на Рисунке 5) продемонстрировала хорошее согласие с изображением RX J1713.7–3946 в диапазоне 17–60 кэВ. Анализ радиальных

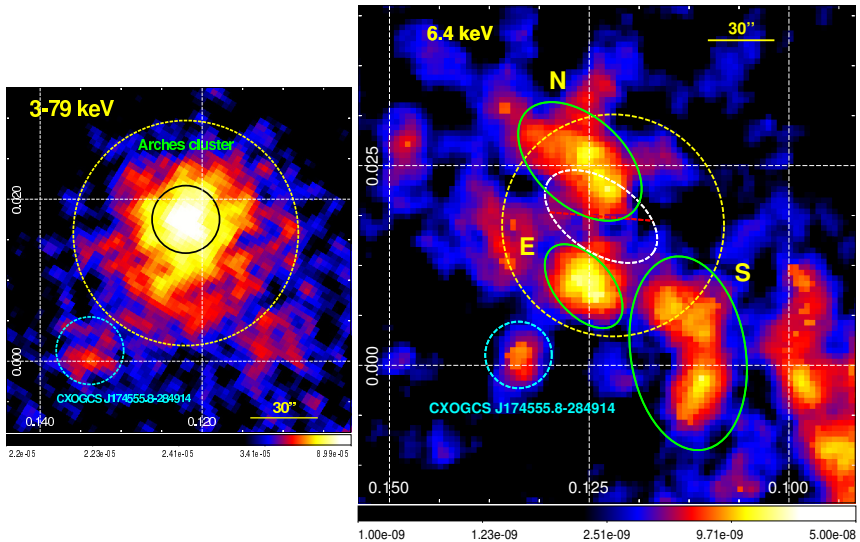


Рис. 4 — Слева: Изображение области скопления Арки по данным орбитального телескопа *NuSTAR* в 2015–2016 гг., построенное в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ. Сплошная окружность с радиусом  $15''$  обозначает положение звёздного скопления Арки. Диффузное излучение вокруг скопления принадлежит молекулярному облаку. Справа: Изображение в линии 6,4 кэВ по данным 2015 г. обсерватории *ХММ-Ньютон*. Сплошные эллипсы обозначают области излучения, для которых был проведён спектральный анализ. Ядро скопления Арки показано пунктирным эллипсом. На обоих изображениях большая пунктирная окружность с радиусом  $R = 50''$  показывает область извлечения широкополосного спектра, а малая пунктирная с радиусом  $R = 15''$  окружность обозначает положение точечного источника CXOGCS J174555.8–284914, который не учитывался в анализе.

профилей изображений RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *ХММ-Ньютон* выявил согласие положений ударных волн в энергетических диапазонах 1–10 кэВ и 17–60 кэВ, что указывает на единый механизм формирования излучения. Хорошее согласие изображений RX J1713.7–3946 на энергиях ниже 10 кэВ и выше 17 кэВ указывает на возможное наличие структуры двойной оболочки и на высоких энергиях.

Был получен суммарный спектр областей А и В по данным телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ, который хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом  $\Gamma = 3,13^{+0,36}_{-0,33}$ . Спектр RX J1713.7–3946 полученный по данным обсерватории *ХММ-Ньютон* на энергиях 0,8–10,0 кэВ из областей, соответствующих областям А и В, описывается поглощённым степенным законом с  $\Gamma = 2,24 \pm 0,01$ , что отличается от результата, полученного на более высоких энергиях. Различие в фотонных

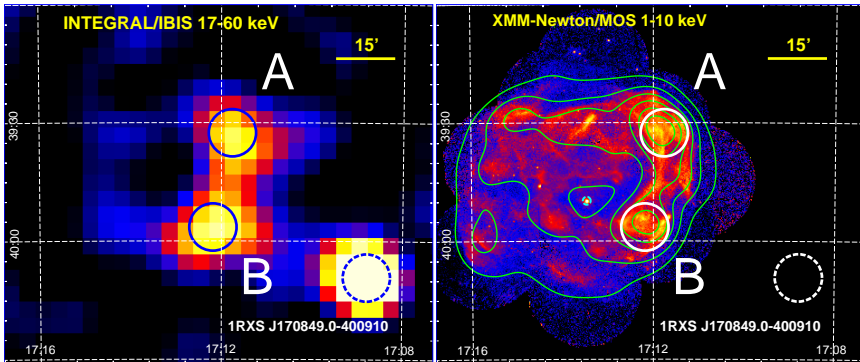


Рис. 5 — Изображения остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* (слева, 17–60 кэВ) и *ХММ-Ньютон* (справа, 1–10 кэВ), построенные в единицах значимости регистрации сигнала от  $0\sigma$  до  $10\sigma$  и поверхностной яркости  $(0,0 - 2,5) \cdot 10^{-3}$  отсчётов  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{угл. мин.}^{-2}$  соответственно. Сплошными окружностями отмечены области А и В, яркие в и их положение на карте *ХММ-Ньютон*. Большая пунктирная окружность демонстрирует расположение яркого источника 1RXS J170849.0–400910, который не связан с остатком вспышки сверхновой. Сплошные контуры демонстрируют изофоты изображения *ХММ-Ньютон*, свёрнутого с ФРТИ телескопа *IBIS* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* после удаления точечного источника 1WGA J1713.4–3949, отмеченного малой пунктирной окружностью на рисунке справа. Предположительно, этот источник является центральным компактным объектом остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 [28].

индексах для разных энергетических диапазонов указывает на изменение наклона спектра с ростом энергии. Для исследования формы широкополосного спектра RX J1713.7–3946, включающего данные обсерваторий *ХММ-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ*, использовались модели степенного закона с изломом и степенного закона с экспоненциальным завалом. Первая модель дала лучший результат и подтвердила предположение об изменении наклона спектра с  $\Gamma \sim 2$  на  $\Gamma \sim 3$  с увеличением энергии. Известно, что по результатам наблюдений в других энергетических диапазонах наклон степенного спектра RX J1713.7–3946 также имеет разные значения [29; 30], что ещё раз подтверждает предположение о постепенном изменении наклона спектра RX J1713.7–3946 с энергией. В качестве физически мотивированной модели была использована аналитическая модель синхротронного излучения электронов, ускоренных на нерелятивистской ударной волне остатка вспышки сверхновой с оболочкой, полученная Зиракашвили В. Н. и Агароняном Ф. А. в 2007 г. (далее *ZA07*) [31]. Важным параметром этой модели является характерная энергия  $\epsilon_0$ , зависящая от скорости ударной волны и отклонений коэффициента диффузии частиц от диффузии Бома и задающаяся соотношением синхротронных потерь и выигрыша в энергии частиц за



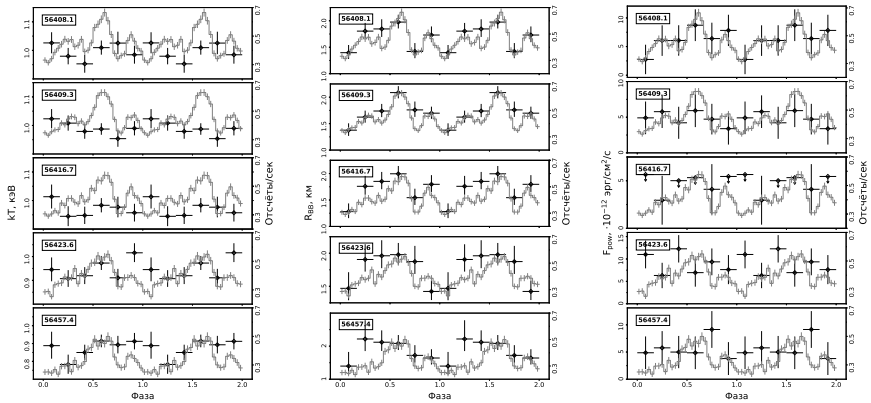


Рис. 6 — Изменения температуры  $kT$  (левая панель) и радиуса  $R_{\text{BV}}$  (средняя) области, излучающей тепловым образом, и полного потока нетеплового излучения  $F_{\text{pow}}$  (правая) в зависимости от фазы импульса и наблюдения (сверху вниз). Серым цветом и правой шкалой обозначены соответствующие профили импульса в энергетическом диапазоне 3–5 кэВ. Два цикла приведены для наглядности.

счёт ускорения на фронте ударной волны. Модель  $ZA07$  показала хорошее согласие с широкополосным спектром RX J1713.7–3946 при  $\epsilon_0 = 1,13 \pm 0,06$  кэВ для магнитного поля, перпендикулярного фронту ударной волны, и  $\epsilon_0 = 1,73 \pm 0,11$  кэВ для изотропного магнитного поля. Чтобы избежать неопределённостей, связанных с нормировкой спектров по данным разных телескопов, была построена диаграмма фотонных индексов, измеренных для RX J1713.7–3946 обсерваториями *XMM-Ньютон*, *ИНТЕГРАЛ*, *NuSTAR* и *Suzaku* [29; 30]. Сравнение фотонных индексов, предсказанных моделью  $ZA07$  и измеренных различными обсерваториями, позволило сделать вывод о том, что модель  $ZA07$  согласуется с наблюдаемыми данными при  $\epsilon_0 \sim 1,0 - 2,0$  кэВ и  $\sim 1,5 - 2,5$  кэВ для случаев перпендикулярного магнитного поля по отношению к фронту ударной волны и изотропного магнитного поля соответственно. Полученные значения  $\epsilon_0$  согласуются со значением  $\epsilon_0 \sim 1,55$  кэВ, соответствующем режиму диффузии Бома при скорости ударной волны  $3900 \text{ км с}^{-1}$  [30; 31]. Таким образом, можно заключить, что в остатке вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 реализуется режим диффузии, близкий бомовскому.

В **Третьей главе** представлено исследование рентгеновского излучения магнитара SGR J1745–2900 по данным космического телескопа *NuSTAR* 2013 г. Были получены профили импульса магнитара в разных энергетических диапазонах (3–5, 5–10 и 10–20 кэВ), демонстрирующие три ярких пика, которые хорошо заметны до 10 кэВ. Было обнаружено, что один пик со временем практически исчезает и уменьшается общая интенсивность излучения. Для энергетических диапазонов 3–5 и 5–10 кэВ была вычислена доля пульсирующего

излучения (ДПИ), которая составила около  $\sim 40 - 50\%$  для всех наблюдений, что согласуется с результатами для более низкоэнергетического диапазона [32]. Предположительно, такие высокие значения ДПИ могут указывать на асимметричное расположение областей теплового излучения [33], которое доминирует в диапазоне 3–10 кэВ. Кроме того, не было обнаружено пульсаций излучения магнитара в энергетическом диапазоне 10–20 кэВ, верхние пределы ДПИ которого составили 86–100%. Также было показано, что линейная зависимость ДПИ от светимости значительно более вероятна, чем отсутствие этой зависимости. Средние спектры излучения SGR J1745–2900, полученные для каждого наблюдения, хорошо описываются комбинацией моделей теплового излучения (модель излучения абсолютно чёрного тела) и нетеплового (степенной закон) с учётом межзвёздного поглощения. Спектральный анализ подтвердил наличие нетепловой компоненты с фотонным индексом  $\Gamma = 1,11^{+0,26}_{-0,24}$ . Параметры тепловой компоненты: температура излучающей области  $kT$  и полный поток  $F_{\text{ВВ}}$  — на масштабе  $\sim 80$  дней уменьшились на  $\sim 10\%$  и  $\sim 40\%$  соответственно, в то время как радиус излучающей области  $R_{\text{ВВ}}$  остался практически неизменным. Стоит отметить, что на более длительном временном интервале уменьшение радиуса излучающей области становится заметным [32], что подтверждает модель раскручивающейся магнитосферы нейтронной звезды [34]. Также были обнаружены указания на значимое увеличение ДПИ для энергетических диапазонов 3–5 и 5–10 кэВ с уменьшением теплового потока, в то время как зависимость от энергии значимо определена не была, что, предположительно, связано с возможным уменьшением радиуса области формирования теплового излучения. Полученные спектральные параметры хорошо согласуются с результатами Каспи и др. [35], что подтвердило правильность обработки данных и позволило перейти к более детальному анализу — фазированной спектроскопии. Наблюдаемый профиль импульса был разделён на шесть равных фаз так, чтобы на каждые максимум и минимум приходилось по одному фазовому бину. Каждый фазовый спектр, был аппроксимирован применявшейся к средним спектрам моделью, при этом поглощение и фотонный индекс были зафиксированы на значениях, определённых ранее. Было выявлено, что  $kT$  практически не меняется с фазой, а вот радиус излучающей области  $R_{\text{ВВ}}$  меняется значительно и визуально повторяет форму профиля импульса (Рисунок 6), что можно обосновать геометрически — чем большая площадь горячего пятна открывается наблюдателю, тем выше интенсивность наблюдаемого излучения. Поток, излученный нетепловым образом,  $F_{\text{pow}}$  практически не меняется с фазой (Рисунок 6), что может быть результатом недостаточной статистики для регистрации его переменности, либо формирования нетеплового излучения в других областях по отношению к горячим пятнам.

**В Заключение** приведены основные результаты работы и дальнейшие перспективы исследований.

## Литература

1. *Gravity Collaboration, Abuter R. [et al.]*. A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — May. — P. L10.
2. *Baganoff F. K. [et al.]*. Chandra X-Ray Spectroscopic Imaging of Sagittarius A\* and the Central Parsec of the Galaxy // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Jul. — Vol. 591, no. 2. — Pp. 891–915.
3. *Sunyaev R. A., Markevitch M., Pavlinsky M.* The center of the Galaxy in the recent past — A view from GRANAT // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Apr. — Vol. 407. — Pp. 606–610.
4. *Ponti G. [et al.]*. Discovery of a Superluminal Fe K Echo at the Galactic Center: The Glorious Past of Sgr A\* Preserved by Molecular Clouds // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — May. — Vol. 714, no. 1. — Pp. 732–747.
5. *Terrier R. [et al.]*. An X-ray survey of the central molecular zone: Variability of the Fe K $\alpha$  emission line // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — May. — Vol. 612. — P. A102.
6. *Tatischeff V., Decourchelle A., Maurin G.* Nonthermal X-rays from low-energy cosmic rays: application to the 6.4 keV line emission from the Arches cluster region // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Oct. — Vol. 546. — P. A88.
7. *Dogiel V. A. [et al.]*. On the origin of the 6.4 keV line in the Galactic Center region // *Astroparticle Physics*. — 2014. — Feb. — Vol. 54. — Pp. 33–39.
8. *Zhang S. [et al.]*. Hard X-Ray Morphological and Spectral Studies of the Galactic Center Molecular Cloud Sgr B2: Constraining Past Sgr A\* Flaring Activity // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Dec. — Vol. 815. — P. 132.
9. *Terrier R. [et al.]*. Fading Hard X-ray Emission from the Galactic Center Molecular Cloud Sgr B2 // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Aug. — Vol. 719. — Pp. 143–150.
10. *Clavel M. [et al.]*. Variation of the X-ray non-thermal emission in the Arches cloud // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Sep. — Vol. 443. — Pp. L129–L133.
11. *Rea N. [et al.]*. A Strongly Magnetized Pulsar within the Grasp of the Milky Way's Supermassive Black Hole // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2013. — Oct. — Vol. 775, no. 2. — P. L34.
12. *Esposito P., Rea N., Israel G. L.* Magnetars: A Short Review and Some Sparse Considerations // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by Tomaso M. Belloni, Mariano Méndez, Chengmin Zhang. — Vol. 461 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2021. — Jan. — Pp. 97–142.

13. Duncan R. C., Thompson C. Formation of Very Strongly Magnetized Neutron Stars: Implications for Gamma-Ray Bursts // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1992. — Jun. — Vol. 392. — P. L9.
14. Ferrario Lilia, Wickramasinghe Dayal. Modelling of isolated radio pulsars and magnetars on the fossil field hypothesis // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Apr. — Vol. 367, no. 3. — Pp. 1323–1328.
15. Clark J. S. [et al.]. A VLT/FLAMES survey for massive binaries in Westerlund 1. IV. Wd1-5 - binary product and a pre-supernova companion for the magnetar CXOU J1647-45? // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — May. — Vol. 565. — P. A90.
16. Genzel R. [et al.]. The Dark Mass Concentration in the Central Parsec of the Milky Way // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — Nov. — Vol. 472. — P. 153.
17. Olausen S. A., Kaspi V. M. The McGill Magnetar Catalog // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2014. — May. — Vol. 212, no. 1. — P. 6.
18. Revnivtsev M. G. [et al.]. Hard X-ray view of the past activity of Sgr A\* in a natural Compton mirror // *Astronomy & Astrophysics*. — 2004. — Oct. — Vol. 425. — Pp. L49–L52.
19. Protheroe R. J. [et al.]. Interpretation of radio continuum and molecular line observations of Sgr B2: free-free and synchrotron emission, and implications for cosmic rays // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — Oct. — Vol. 390, no. 2. — Pp. 683–692.
20. Churazov E. [et al.]. Polarization and long-term variability of Sgr A\* X-ray echo // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Jun. — Vol. 468, no. 1. — Pp. 165–179.
21. Zhang S. [et al.]. Sagittarius A\* High-energy X-Ray Flare Properties during NuSTAR Monitoring of the Galactic Center from 2012 to 2015 // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Jul. — Vol. 843, no. 2. — P. 96.
22. Mori K. [et al.]. NuSTAR Hard X-Ray Survey of the Galactic Center Region I: Hard X-Ray Morphology and Spectroscopy of the Diffuse Emission // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Dec. — Vol. 814. — P. 94.
23. Krivonos R. [et al.]. NuSTAR and XMM-Newton observations of the Arches cluster in 2015: fading hard X-ray emission from the molecular cloud // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Jul. — Vol. 468. — Pp. 2822–2835.
24. Khabibullin I. [et al.]. X-raying molecular clouds with a short flare: probing statistics of gas density and velocity fields // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Jun. — Vol. 495, no. 1. — Pp. 1414–1432.

25. Goto M. [et al.]. Absorption-Line Survey of  $H_3^+$  toward the Galactic Center Sources. III. Extent of Warm and Diffuse Clouds // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2011. — Apr. — Vol. 63. — Pp. L13–L17.
26. Hong J. [et al.]. NuSTAR Hard X-Ray Survey of the Galactic Center Region. II. X-Ray Point Sources // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Jul. — Vol. 825. — P. 132.
27. Chernyshov D. O. [et al.]. Time Variability of Equivalent Width of 6.4 keV Line from the Arches Complex: Reflected X-Rays or Charged Particles? // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Aug. — Vol. 863. — P. 85.
28. Lazendic J. S. [et al.]. X-Ray Observations of the Compact Central Object in Supernova Remnant G347.3-0.5 // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Aug. — Vol. 593. — Pp. L27–L30.
29. Tanaka T. [et al.]. Study of Nonthermal Emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Oct. — Vol. 685. — Pp. 988–1004.
30. Tsuji N. [et al.]. NuSTAR Observations of the Supernova Remnant RX J1713.7-3946 // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Jun. — Vol. 877, no. 2. — P. 96.
31. Zirakashvili V. N., Aharonian F. Analytical solutions for energy spectra of electrons accelerated by nonrelativistic shock-waves in shell type supernova remnants // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Apr. — Vol. 465. — Pp. 695–702.
32. Coti Zelati F. [et al.]. The X-ray outburst of the Galactic Centre magnetar SGR J1745-2900 during the first 1.5 year // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — May. — Vol. 449, no. 3. — Pp. 2685–2699.
33. Beloborodov A. M. Gravitational Bending of Light Near Compact Objects // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2002. — Feb. — Vol. 566, no. 2. — Pp. L85–L88.
34. Beloborodov A. M. Untwisting Magnetospheres of Neutron Stars // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Sep. — Vol. 703, no. 1. — Pp. 1044–1060.
35. Kaspi V. M. [et al.]. Timing and Flux Evolution of the Galactic Center Magnetar SGR J1745-2900 // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — May. — Vol. 786, no. 2. — P. 84.

