

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИКИ РАН  
Д. ф.-м.н., чл.-корр. РАН



*А.А. Петрукович*

«26» мая 2022 г.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) на диссертацию «Рентгеновское излучение диффузной среды и звездных остатков в центральной части Галактики», представленную Кузнецовой Екатериной Александровной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

В период подготовки диссертации соискатель Кузнецова Екатерина Александровна работала в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника лаборатории 523.

Кузнецова Е.А. окончила с отличием Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова по направлению «Физика» по программам бакалавриата и магистратуры в 2015 и 2017 гг. Поступила в аспирантуру ИКИ РАН в 2017 г., где в тот же год устроилась на работу в отдел Астрофизики высоких энергий. По окончании аспирантуры в 2021 г. защитила диплом с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2021 г. федеральным государственным бюджетным учреждением науки ИКИ РАН.

Научные руководители: Лутовинов Александр Анатольевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора ИКИ РАН, и Кривонос Роман Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

Тема кандидатской диссертации Кузнецовой Е.А. утверждена на

заседании Учёного совета ИКИ РАН, протокол № 4 от 25.04.2022 г. Доклад Кузнецовой Е.А по теме диссертации заслушан и обсужден на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН 25.04.2022 г.

По результатам рассмотрения диссертации «Рентгеновское излучение диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики»  
**ПРИНЯТО СЛЕДУЮЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

#### **Актуальность темы и направление исследования**

В современной науке является открытым вопрос формирования и роста сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД), которые, предположительно, расположены в центрах галактик. Важной задачей, которая поможет прояснить физическую картину формирования и свойств чёрных дыр, 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 и совпадающая с радиоисточником Стрелец А\*. В окрестности этой СМЧД имеется большое разнообразие астрофизических объектов. 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. Основными целями диссертационной работы являются: изучение рентгеновского излучения диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики.

Первая часть работы посвящена исследованию прошлой активности СМЧД Стрелец А\* по излучению молекулярных облаков ГЦ. В области ГЦ расположена Центральная Молекулярная Зона (ЦМЗ), облака которой излучают в рентгеновском континууме и флуоресцентной К $\alpha$  линии железа на энергии 6,4 кэВ, что, предположительно, вызвано отражением от вещества молекулярных облаков яркой рентгеновской вспышки СМЧД Стрелец А\*, произошедшей в недавнем прошлом (механизм «комптоновского зеркала»). Ещё одной гипотезой, которая способна объяснить рентгеновское излучение молекулярных облаков, является взаимодействие нейтрального вещества облаков с частицами космических лучей (КЛ).

Примерами облаков, излучение которых, скорее всего, вызвано именно

механизмом «комптоновского зеркала», являются массивное облако Стрелец B2 и облако, расположенное около звёздного скопления Арки. Эти облака около 8 лет демонстрировали постоянный уровень излучения, которое в какой-то момент начало затухать. 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. Важны 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.

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. Вторая часть диссертации посвящена исследованию остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946, который расположен вдоль луча зрения по направлению к ГЦ на проекционном расстоянии  $\sim 13^\circ$  от СМЧД Стрелец А\*. Остаток вспышки сверхновой 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 (около  $1^\circ$  в диаметре), что делает его сложной мишенью для наблюдений на энергиях выше 10 кэВ. Исследование рентгеновского излучения RX J1713.7-3946 важно 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 расположен на угловом расстоянии  $2,4''$  от Стрельца А\*. Магнитары — это молодые нейтронные звезды, обладающие сильными магнитными полями с напряжённостью  $B \sim 10^{14} - 10^{15}$  Гс. 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. Однако, существуют и другие гипотезы образования магнитаров, например, коллапс массивных звёзд с сильными магнитными полями или эволюция двойной системы массивных звёзд. Таким образом, в звёздном диске вокруг СМЧД Стрелец А\*, содержащем большое количество массивных молодых звёзд 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. Кроме того, на данный момент существуют открытые вопросы механизма формирования излучения магнитаров, для чего требуется как можно больше данных об этих объектах. Фазирующая спектроскопия рентгеновского излучения магнитара SGR J1745-2900, которой посвящена третья часть диссертации, дополнит картину формирования излучения магнитаров.

### **Личный вклад автора**

Диссертант принимал активное участие на всех этапах работы. Совместно с соавторами диссертант 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.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность диссертации обеспечена использованием в своей основе наблюдательных данных различных космических обсерваторий, обработка и анализ которых проводились с помощью соответствующего программного обеспечения и известных статистических методов. Основные положения и выводы диссертации опубликованы в четырёх статьях рецензируемых научных изданий и были представлены на всероссийских и международных конференциях и школах и на семинарах отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

### **Научная новизна и практическая значимость результатов исследований**

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 с 2003 по 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 в 2016 г. 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 2015 г. обсерватории ХММ-Ньютон, который показал, что излучение облака Арки является комбинацией излучений с различными спектральными параметрами, что может быть обусловлено различной геометрией отражения вспышки и/или разными вспышками СМЧД Стрелец А\*.

Исследования рентгеновского излучения молекулярных облаков ГЦ позволят дополнить картину отражения рентгеновской вспышки СМЧД Стрелец А\*, 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.

Впервые проведено детальное пространственное и спектральное исследования 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 укрупняется с ростом энергии, что согласуется с аналитической моделью электронов, ускоренных на ударной волне в режиме диффузии, близкому к пределу Бома. Исследование рентгеновского излучения оболочек сверхновых дополняет картину механизма ускорения КЛ.

Впервые была проведена подробная фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745-2900 по данным 2013 г. 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. Подробная фазированная спектроскопия рентгеновского излучения магнитаров может помочь в исследовании процесса формирования излучения и вспышек магнитаров.

### **Ценность научных работ соискателя**

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

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», MNRAS, 484, 2019, 1627

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», 2019, MNRAS, 489, 1828

3. **Кузнецова Е.А., Лутовинов А.А., Семена А.Н.**, «Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745-2900 по данным обсерватории NuSTAR», Письма в Астрономический журнал, 47, 2021, 250-259

4. **Kuznetsova, E., Krivonos, R., Lutovinov, A., Clavel, M.**, «Sgr B2 hard X-ray emission with INTEGRAL after 2009: still detectable?», 2022, MNRAS, 509, 1605

Журналы, в которых опубликованы результаты диссертации, входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования и в перечень ВАК. Данные журналы являются ведущими изданиями по соответствующим научным направлениям, что позволяет сделать вывод о высокой ценности опубликованных в них материалов.

### **Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»**

Работа Е.А. Кузнецовой посвящена исследованию рентгеновского излучения диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики. Данное направление исследований соответствует требованиям паспорта специальности 01.03.02 «Астрофизика и звездная астрономия». Задачи данной диссертации относятся к следующей области исследования:

«Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям».

### **ВЫВОД.**

Диссертационная работа «Рентгеновское излучение диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики» Кузнецовой Екатерины Александровны соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней» и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» - 17 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «25» апреля 2022 г.

Ученый секретарь НТС  
отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН,  
к.ф.-м.н.

 В.А. Арефьев