

ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук *Кузнецовой Екатерины Александровны* на тему:  
*«Рентгеновское излучение  
диффузной среды и звёздных остатков в центральной части Галактики»*  
по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

За свою полувековую историю рентгеновская астрономия прошла длинный путь от простых аэростатных экспериментов до современных высокоточных орбитальных обсерваторий. В настоящее время наблюдения в этом диапазоне энергий являются одним из основных источников получения новой информации о многих объектах, как внегалактического, так и галактического происхождения, а рентгеновская астрономия — сравнительно молодая область астрофизики, которая быстро развивается благодаря прогрессу в компьютерной, детекторной и космической технике — продолжает приносить новую уникальную информацию об объектах во Вселенной.

Кандидатская диссертация Е.А. Кузнецовой посвящена обработке и анализу данных рентгеновских наблюдений с целью исследования физических параметров источников трех различных классов галактических объектов: молекулярных облаков Галактического Центра (Sagittarius B2 и окрестность звёздного скопления Арки), остатка сверхновой RX J1713.7–3946 и магнитара SGR J1745–2900. Используемые в диссертации данные наблюдений источников рентгеновскими обсерваториями являются новыми, а полученные в результате обработки результаты — актуальными.

Диссертация состоит из введения, трёх глав основного содержания, заключения, благодарностей, списка литературы из 183 наименований и представляет собой законченное оригинальное научное исследование. Полный объем диссертации – 128 страниц текста с 38 рисунками и 15 таблицами.

Во введении дан краткий обзор современных представлений о наблюдаемых объектах, перечислены цели и задачи работы, а также применяемые методы исследования, и обсуждена их актуальность, научная новизна, личный вклад автора в работу. Также обсуждаются степень достоверности и апробация результатов и приводятся положения, выносимые на защиту.

Первая глава разделена на 2 части. Первая часть посвящена облаку Sagittarius B2. Вначале даётся введение в историю наблюдений рентгеновского потока от этого облака и обсуждается его переменность. Приводится интерпретация этой переменности на основе модели отражения от облака произошедшей в прошлом вспышки излучения от сверхмассивной черной дыры Sagittarius A. В основной части описываются результаты исследования долговременной эволюции рентгеновского излучения от молекулярного облака, полученные в результате анализа данных детектора ISGRI обсерватории INTEGRAL за 2002 — 2020

годы. В работе проводился анализ изображений, кривых блеска и спектров. В результате было подтверждено зарегистрированное ранее падение по стенному закону интенсивности рентгеновского излучения (на энергиях больше 20 кэВ) до 2011 года. Однако, с 2011 до 2019 года, как было обнаружено, поток излучения от облака совместим с постоянным. В диссертации приводятся возможные интерпретации этого факта в рамках модели излучения облака при взаимодействии с Галактическими космическими лучами, в рамках модели многократных рассеяний в модели отражения и в рамках модели комбинации излучения неразрешенных точечных источников. В тексте обсуждаются плюсы и минусы этих моделей, но на основе имеющихся данных однозначный выбор модели невозможен. Вопрос остаётся открытым и требует дополнительных исследований. Вторая часть первой главы посвящена изучению излучения окрестности массивного звёздного скопления Арки. При этом основное внимание уделяется нетепловому излучению скопления из близлежащей области, ассоциированной с молекулярным облаком. Дается обзор истории этих наблюдений. Далее приводится анализ наблюдений излучения области Арки, выполненных обсерваториями NuSTAR и XMM-Newton в 2015-2016 годах, включающий анализ изображений и спектральный анализ излучения. В результате анализа обнаружено, что морфология нетеплового излучения в 2016 году по-прежнему совместима с облаком (а не скоплением). Также получено, что в 2016 году поток нетеплового излучения остался на уровне 2015 года, что, по мнению соискателя, может свидетельствовать о выходе потока на плато после периода зарегистрированного ранее падения. Однако, как показано в диссертации этот вопрос остаётся открытым, поскольку интервал в 1 год оказывается недостаточным для того, чтобы утверждать это с полной уверенностью. Нужны дополнительные наблюдения.

Во второй главе рассматривается излучение остатка сверхновой RX J1713.7–3946. Вначале обсуждается история открытия и изучения остатка. В основной части главы описывается исследование излучения остатка на основе данных обсерваторий INTEGRAL за 2002-2017 гг. XMM-Newton за 2001-2017 гг. Как оказалось, изображения остатка, полученные по данным обсерватории INTEGRAL в диапазонах 17–27, 27–36, 36–50 и 17–60 кэВ, хорошо согласуются с картой в диапазоне энергий 1–10 кэВ, построенной по данным обсерватории XMM-Newton. Спектральный анализ данных показал, что спектр излучения детектора ISGRI/INTEGRAL лучше описывается степенным спектром с изломом, чем степенным спектром с экспоненциальным завалом. Также в работе было получено, что спектр хорошо описывается моделью синхротронного излучения электронов, ускоренных на ударной волне диффузионным механизмом в регулярном магнитном поле с учетом синхротронных потерь.

В третьей главе обсуждается излучение магнитара SGR J1745–2900, расположенного на расстоянии около 2.4 секунды дуги от галактической сверхмассивной черной дыры Sagittarius A. После введения, описывающего

основные характеристики и историю наблюдений этого объекта, в основной части главы описываются результаты анализа данных его наблюдений обсерваторией NuSTAR в 2013г. Основное внимание в тексте уделяется фазово-разрешенной спектроскопии излучения SGR J1745–2900, доля пульсирующего излучения которого (в диапазонах 3-5, 5-10 кэВ) была оценена в 40-50%.

В диссертации Е.А.Кузнецовой получен ряд новых интересных результатов. Среди наиболее важных результатов, полученных автором диссертации, стоит отметить следующие:

1. На основе исследования 17-летней эволюция рентгеновского потока молекулярного облака Sagittarius B2 на энергиях выше 17 кэВ по данным обсерватории INTEGRAL, была обнаружена возможная постоянная составляющая рентгеновского излучения облака после фазы линейного уменьшения потока и определены её спектральные характеристики.

2. На основе анализа данных наблюдений NuSTAR и XMM-Newton в 2015-2016 годах показано, что поток нетеплового излучения молекулярного облака в окрестности звёздного скопления Арки предположительно достиг постоянного уровня после стадии линейного уменьшения.

3. На основе анализа данных наблюдений обсерваторий INTEGRAL и XMM-Newton впервые построена карта остатка сверхновой RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ и показано, что положения максимумов излучения RX J1713.7–3946 на энергиях ниже 10 кэВ и выше 17 кэВ согласуются между собой, что свидетельствует о едином механизме излучения. Измерен спектральный индекс излучения RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ, равный  $\sim 3.1$ .

4. На основе анализа данных наблюдений обсерватории NuSTAR проведена фазированная спектроскопия излучения сложного для анализа объекта – магнитара SGR J1745–2900, удаленного от Галактической сверхмассивной черной дыры Sagittarius A всего на 2.4 секунды дуги.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных аналитических и численных методов, а также сравнением, где возможно, полученных данных с результатами других научных групп. Основные результаты диссертации в 2018-2022 годах прошли проверку на авторитетных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в статьях в журналах MNRAS, ПАЖ.

Результаты диссертации представляют существенный интерес для исследования центральной части Галактики в рентгеновском диапазоне. Выводы и положения диссертации соответствуют полученным и представленным результатам. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Существенных недостатков представленная диссертация не содержит, имеются некоторые замечания, суммированные ниже:

1. В первой главе для описания межзвездного поглощения используется модель *wabs*, а в главах 2,3 – *Tbabs*, что, безусловно, вполне допустимо, но поднимает вопрос о причине такого выбора.

2. В разделе 2.5 главы 2 результаты наблюдений остатка SN RX J1713.7–3946 сравниваются с модельными спектрами синхротронного излучения ускоренных на ударной волне электронов (с учетом эффекта синхротронных потерь). При этом сравнении учитывается возможность анизотропии магнитного поля, но не учитывается его возможная пространственная неоднородность. Здесь следует отметить, что в работе N.Tsujii et al [Astrophys. J. 877:96, (2019)] был ранее выполнен спектральный и морфологический анализ на основе данных обсерватории NuSTAR, обладающей лучшим угловым разрешением в жестком рентгеновском диапазоне, совместно с данными обсерваторий Chandra и XMM-Newton. Рентгеновские изображения остатка неоднородны и имеют волокнистую структуру. В частности, были рассмотрены несколько различных фрагментов рентгеновских волокон, обладающих различными собственными скоростями. Только для волокон со скоростями ударной волны  $\sim 4000$  км/с, было получено согласие однородной модели излучения с наблюдаемым спектром излучения. Для остальных волокон, движущихся с меньшими скоростями, энергия завала синхротронного спектра превышает ожидаемую для случая модели диффузионного ускорения с бомовским коэффициентом диффузии частиц (см Рис 5 из работы Tsujii). Учитывая угловое разрешение детектора INTEGRAL, использование в работе оценки скорости ударных волн остатка  $\sim 4000$  км/с для всех ярких областей (неразрешимых обсерваторией INTEGRAL волокон) представляется необоснованным. Соответственно, вывод о полном согласии однозонной модели диффузионного ускорения с бомовским коэффициентом диффузии нуждается в дополнительном обосновании. В частности, для согласия наблюдаемого спектра с моделью может потребоваться учет дополнительных эффектов, например, влияния магнитной турбулентности на спектр синхротронного излучения.

3. На рисунке 3.2 диссертации приведены 2 цикла профиля импульса SGR J1745–2900 в различных спектральных диапазонах. Вертикальным пунктиром показано разделение на фазовые бины. Однако, во втором цикле приведенные бины оказываются в 3 раза шире.

Указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Результаты, полученные в диссертационной работе Е.А.Кузнецовой, могут быть использованы в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике и астрономии: ИКИ РАН, ФТИ им. Иоффе, ИЯИ РАН, ФИАН им

П.Н. Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, АКЦ  
ФИАН, СПбГУ и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих журналах и  
цитируется в научных изданиях. Автореферат полностью отвечает содержанию  
диссертации.

Диссертационная работа Е.А. Кузнецовой является законченным научным  
исследованием. Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК при  
Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор несомненно  
заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

*Официальный оппонент:*

доктор физ.-мат. наук, профессор, член.-корр. РАН, Руководитель отделения  
физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе  
Быков Андрей Михайлович

*Контактные данные:*

194223, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,

д. 26, ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,

тел.: +7(812) 2927160; e-mail: byk@astro.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защита диссертация: 01.03.02, астрофизика и радиоастрономия

Подпись сотрудника ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе

Быкова А.М. удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе



Патров М.И.

16.08.2022