

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
Лутовинов Александр Анатольевич
кандидат физико-математических наук
Кривонос Роман Александрович

Москва — 2022

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Исследование прошлой активности СМЧД Стрелец А* по излучению молекулярных облаков ГЦ	15
1.1 Молекулярное облако Стрелец Б2	15
1.1.1 Введение	15
1.1.2 Наблюдения и обработка данных	17
1.1.3 Изображения области Стрельца Б2 по данным обсерватории <i>ИНТЕГРАЛ</i>	20
1.1.4 Долговременная кривая блеска Стрельца Б2	23
1.1.5 Спектральный анализ	26
1.1.6 Обсуждение	33
1.1.7 Заключение	39
1.2 Молекулярное облако звёздного скопления Арки	41
1.2.1 Введение	41
1.2.2 Наблюдения и обработка данных	43
1.2.3 Наблюдения скопления Арки телескопом <i>NuSTAR</i> в 2016 г.	47
1.2.4 Комбинированный набор данных телескопа <i>NuSTAR</i> 2015–2016 гг. и обсерватории <i>ХММ-Ньютон</i> 2015 г.	50
1.2.5 Спектральный анализ отдельных областей облака скопления Арки по данным обсерватории <i>ХММ-Ньютон</i>	57
1.2.6 Заключение	61
Глава 2. Детальное исследование остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий <i>ХММ-Ньютон</i> и <i>ИНТЕГРАЛ</i>	64
2.1 Введение	64
2.2 Наблюдения и обработка данных	66
2.3 Рентгеновская морфология RX J1713.7–3946	68
2.3.1 Двумерный пространственный анализ	72
2.4 Спектральный анализ	75
2.4.1 Систематические неопределённости в определении потока	78
2.4.2 Широкополосный спектр	78

	Стр.
2.5 Интерпретация результатов	82
2.6 Заключение	88
Глава 3. Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 по данным телескопа <i>NuSTAR</i>	90
3.1 Введение	91
3.2 Наблюдения и обработка данных	92
3.3 Временной анализ	94
3.4 Спектральный анализ	99
3.4.1 Усреднённые спектры	99
3.4.2 Фазово-разрешённые спектры	103
3.5 Заключение	104
Заключение	107
Благодарности	110
Список литературы	111

Введение

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] (другие оценки см. в [2; 3]) и совпадающая с радиосточником 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 [4; 5] при эддингтоновской скорости аккреции, предсказанной теорией аккреции из стандартного тонкого диска на чёрную дыру. Такой уровень светимости также значительно ниже типичных светимостей активных ядер галактик. Современное спокойное состояние чёрной дыры Стрелец A^* вызывает вопрос о том, была ли она активна в прошлом. Сюняев и др. [6] 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) [7–9].

ЦМЗ [10], расположенная в ГЦ, имеет размер около 200 пк и содержит около 10 % всего молекулярного газа Галактики. По предположению Сюняева и др. [6], 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. [7] 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^* .

Ещё одной гипотезой, способной объяснить рентгеновское излучение молекулярного вещества, может служить взаимодействие молекулярного газа с низкоэнергетическими космическими лучами (Low-energy cosmic rays, LECR) [11–14], которые посредством процессов тормозного излучения и флуоресценции могут произвести рентгеновский континуум и K_α линию излучения нейтрального железа на энергии 6,4 кэВ [12; 15]. 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 [14; 16]. Следует отметить, что электроны космических лучей ввиду очень интенсивных потерь энергии потенциально могут объяснить наблюдаемую переменность [14; 17], однако для этого необходимо, чтобы рядом с молекулярными облаками находилось несколько переменных источников электронов, что маловероятно [14]. Кроме того, оценки металличности среды для такой модели значительно превышают значения, измеренные в области ГЦ [18]. Тем не менее, в том случае, когда фронт рентгеновской вспышки завершит свое прохождение по облаку, постоянное излучение, вызванное космическими лучами (КЛ), может стать видимым [14].

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

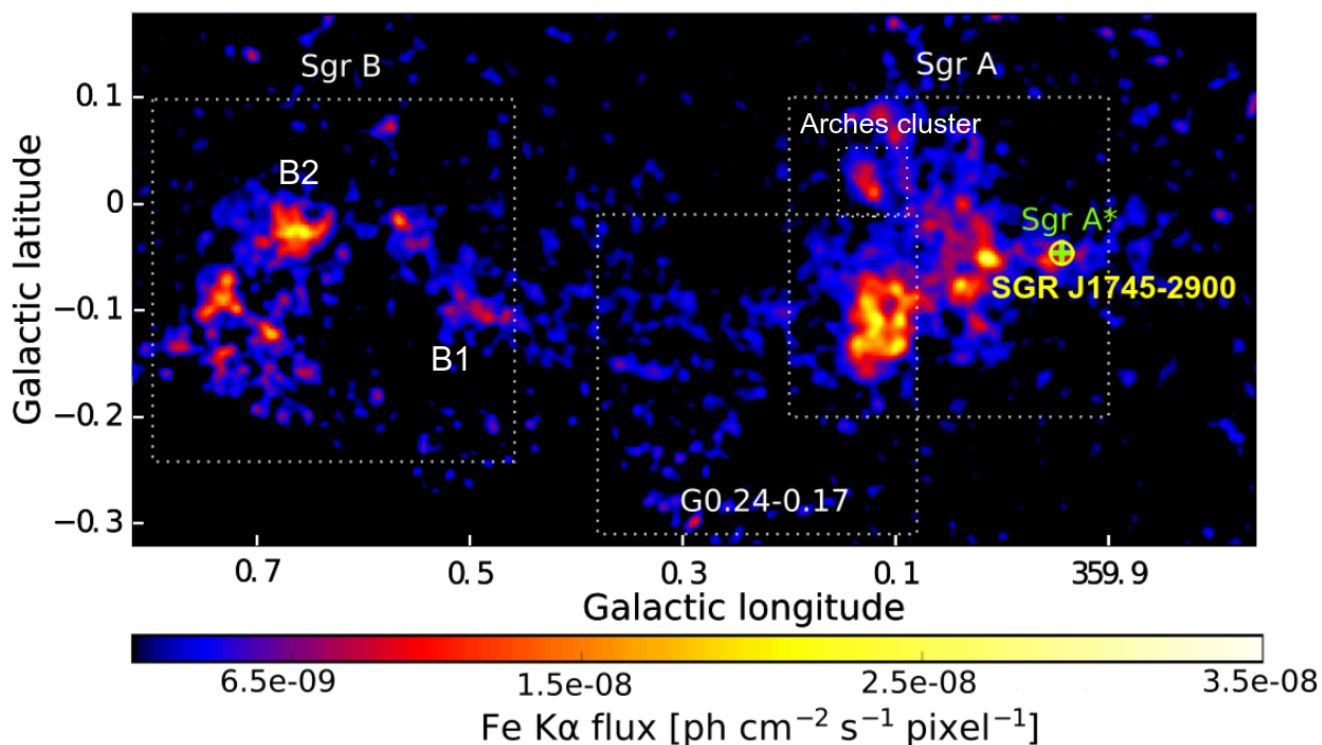


Рисунок 1 — Центральная область Галактики в линии излучения 6,4 кэВ по данным обсерватории *XMM-Ньютон* за период 2000–2001 гг. [9, Рисунок 3]. Карты построены в единицах интенсивности излучения $\text{фот. см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{пиксель}^{-1}$ с вычтенным фоном и скорректированные на экспозицию. Размер пикселя составляет $2''_5$. Изображение сглажено с ядром функции Гаусса с радиусом в 5 пикселей. 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.

показаны на Рисунке 1). Эти облака около 8 лет демонстрировали постоянный уровень излучения, которое в какой-то момент начало затухать [12; 19–21]. 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 A^* в прошлом и получить ограни-

чения 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 A^* (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° 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 A^* [22] (расположение источника показано на Рисунке 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 [23]. 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 [24; 25]. Однако, существуют и другие гипотезы образования магнитаров, например, коллапс массивных звёзд с сильными магнитными полями [26] или эволюция двойной системы массивных звёзд [23; 27]. Таким образом, в звёздном диске вокруг СМЧД Стрелец A^* , содержащем большое количество массивных молодых звёзд [28; 29, для примера], 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.

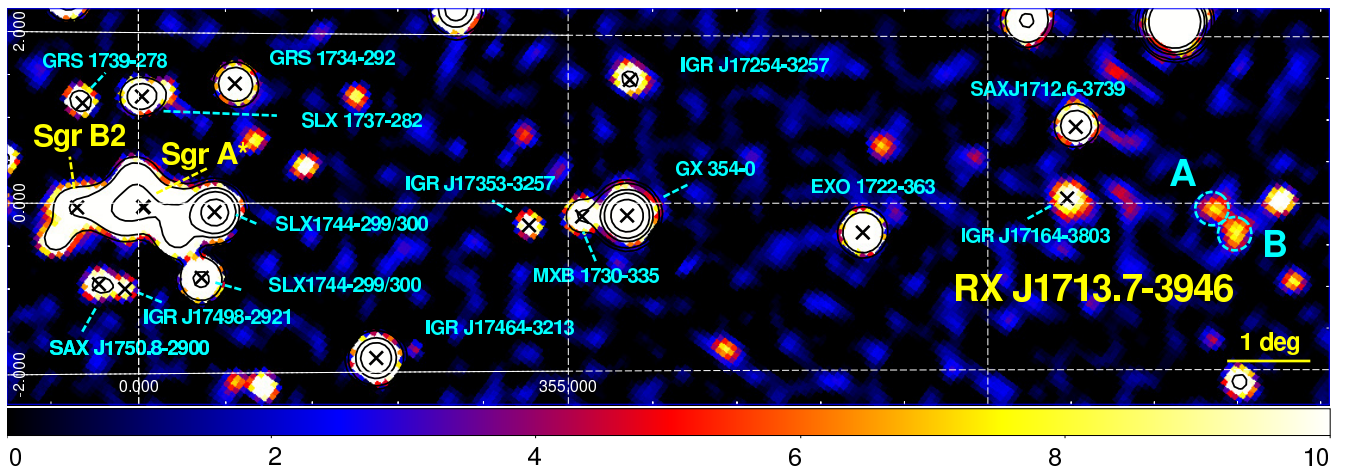


Рисунок 2 — Изображение плоскости Галактики по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, описанным в Главе 2, в единицах значимости регистрации, построенное в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ. Самые яркие источники обозначены крестиками. Название каждого источника указано на рисунке. Чёрные контуры соответствуют следующим уровням значимости регистрации: 10, 20, 60, 100 и 200 σ . На данной карте жёлтым цветом 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» (подробнее см. в Главе 2). Координатная сетка соответствует Галактическим координатам.

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 [30], которые составляют не менее 10% популяции молодых нейтронных звёзд [31]. 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 *ХММ-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 *XMM-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. Фазированная 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 сравне-

нию 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 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.

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 Б2 на энергиях выше 17 кэВ. Обнаружена возможная постоянная составляющая рентгеновского излучения Стрельца Б2 после фазы линейного уменьшения потока и определены её спектральные ха-

рактеристики. Для объяснения излучения Стрельца Б2 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., Кривонос 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

Объём и структура работы. Диссертация состоит из **Введения, трёх глав и Заключения**. Полный объём диссертации составляет 128 страниц, включая 38 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 183 наименования.

Глава **1** посвящена исследованию прошлой активности СМЧД Стрелец A^* по излучению молекулярных облаков ГЦ (облака в окрестности звёздного скопления Арки и облака Стрелец Б2) по данным обсерваторий *ИНТЕГРАЛ*, *ХММ-Ньютон* и *NuSTAR*. В Главе **2** представлены результаты пространственного и спектрального исследований рентгеновского излучения остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* и *ХММ-Ньютон*. В Главе **3** представлена фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 и временной анализ его излучения по данным обсерватории *NuSTAR*.

Глава 1. Исследование прошлой активности СМЧД Стрелец A^* по излучению молекулярных облаков ГЦ

Как уже упоминалось во Введении, рентгеновское излучение молекулярных облаков ГЦ может содержать информацию о прошлой активности СМЧД Стрелец A^* . Переменность излучения молекулярных облаков ЦМЗ уже была зарегистрирована различными обсерваториями, что подтверждает сценарий отражения и позволяет проследить распространение рентгеновского фронта по ЦМЗ [7]. Данная глава посвящена исследованиям рентгеновского излучения молекулярного облака Стрелец Б2 и облака, расположенного в окрестности звёздного скопления Арки, которые являются кандидатами на изменение режима формирования излучения, что может пролить свет не только на вспышки СМЧД A^* , но и на популяцию КЛ в ГЦ.

1.1 Молекулярное облако Стрелец Б2

Стрелец Б2 — самое плотное (10^6 см^{-3} в ядре) и самое массивное молекулярное облако ($\sim 10^6 M_{\odot}$) в ЦМЗ. Рентгеновское излучение этого облака демонстрировало переменность, предположительно вызванную активностью СМЧД A^* в прошлом. Следующая часть главы посвящена исследованию рентгеновского излучения Стрельца Б2 и его происхождения.

1.1.1 Введение

Наблюдения телескопом *ART-II*, установленном на обсерватории *ГРАНАТ*, зарегистрировали излучение в энергетическом диапазоне 8–20 кэВ от протяжённого источника в области ГЦ, ассоциированного с молекулярным облаком Стрелец Б2. Для объяснения рентгеновского излучения облака был предложен механизм отражения жёсткой рентгеновской вспышки [6; 32; 33]. Благодаря обсерватории *ASCA*, было зарегистрировано излучение Стрельца Б2 во флуорес-

центной линии Fe K_α и измерена её эквивалентная ширина [34]. Рентгеновское излучение Стрельца Б2 на энергиях выше 20 кэВ впервые было ассоциировано с жёстким рентгеновским источником IGR J17475–2822, зарегистрированным обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* [35]. Ревнивцев и др. [35] пришли к выводу, что молекулярное облако Стрелец Б2 могло быть облучено излучением от жёсткой рентгеновской вспышки Стрельца A^* со светимостью $L_{2-200 \text{ кэВ}} \approx 1,5 \cdot 10^{39} \text{ эрг с}^{-1}$ в энергетическом диапазоне 2–200 кэВ и степенным спектром с фотонным индексом $\Gamma \approx 1,8$. Предполагая, что Стрелец Б2 находится на проекционном расстоянии от Стрельца A^* в 100 пк, Ревнивцев и др. [35] заключили, что вспышка СМЧД Стрелец A^* должна была произойти 300–400 лет назад. Используя наблюдения обсерватории *ИНТЕГРАЛ* с 2003 по 2009 гг., Террьер и др. [19] построили кривую блеска Стрельца Б2, демонстрирующую линейное уменьшение его рентгеновского излучения. Новые измерения параллакса облака Стрелец Б2 [36] указывают на то, что Стрелец Б2 на 130 пк расположено к нам ближе, чем Стрелец A^* . Понти и др. [7], рассматривая новое расположение Стрельца Б2, сообщили, что в таком случае вспышка Стрельца A^* должна была произойти 100 лет назад. Используя моделирование Монте-Карло, Воллс и др. [37] рассмотрели два случая: равномерное и гауссово распределение плотности в Стрельце Б2. Первый случай дал оценку положения Стрельца Б2 на 50 пк ближе к Земле, чем к Стрельцу A^* , что соответствует более давней вспышке, чем оценка Понти и др. [7], в то время как второй случай предполагает, что облако Стрелец Б2 должно быть расположено на проекционном расстоянии в 100 пк, что поддерживает предположение о вспышке, произошедшей 300–400 лет назад. Наблюдения орбитальным телескопом *NuSTAR* облака Стрелец Б2 на энергиях до 40 кэВ в 2013 г. позволили зарегистрировать рентгеновские структуры и два компактных ядра в центральной круговой области с $R = 90''$, которые окружены диффузным излучением [18].

С 2013 г. новых исследований излучения Стрельца Б2 на энергиях выше 20 кэВ не проводилось и дальнейшее поведение его излучения оставалось неизвестным. Однако обсерватория *ИНТЕГРАЛ* продолжала свою работу, и к 2020 г. было собрано большое количество новых данных. Естественно ожидать, что рентгеновское излучение Стрельца Б2 либо продолжает затухать, либо вышло на постоянный уровень, либо повышается из-за ещё одной вспышки от Стрельца A^* . Действительно, ряд работ предполагает несколько вспышек Стрельца A^* в прошлом, которые в настоящее время распространяются в ЦМЗ [9; 38–40]. Данный раздел посвящён исследованию долговременной эволюции жёсткого

рентгеновского излучения Стрельца Б2, полученной из полного набора данных обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, накопленных вплоть до 2020 г. В статье Кузнецовой и др. [41] представлены результаты этого исследования.

1.1.2 Наблюдения и обработка данных

Для этой работы были использованы все доступные данные обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, собранные с декабря 2002 по январь 2020 г. Для исследования рентгеновского континуума облака Стрелец Б2 использовались данные детектора *ISGRI* [42] телескопа с кодирующей апертурой *IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite)* [43], который работает в мягком гамма-диапазоне от 17 кэВ до 10 МэВ и установлен на борту обсерватории *ИНТЕГРАЛ* [44]. Система кодирующей апертуры с вольфрамовой маской, расположенная на высоте 3,2 м над плоскостью детектора, предоставляет возможность получения изображения неба с угловым разрешением $12'$, определяющимся полной шириной на полувысоте (full width at half maximum, FWHM) функции размытия точечного источника телескопа *IBIS*. Эта величина соответствует масштабу ~ 30 пк на расстоянии 8 кпк. Таким образом, обсерватория *ИНТЕГРАЛ* позволяет зарегистрировать молекулярное облако Стрелец Б2, соразмерное с этим масштабом [45; 46].

Стоит отметить, что телескопы с кодирующей маской применяются для наблюдения не только точечных источников, но и протяжённых. Например, данные *IBIS* эффективно использовались для исследования протяжённого жёсткого рентгеновского излучения скоплений галактик в созвездиях Змееносец и Волосы Вероники [47–49].

Для восстановления энергии зарегистрированных фотонов использовалось программное обеспечение INTEGRAL Science Data Center Off-line Scientific Analysis (OSA) версии 10 для всех данных, но с 2017 г. к оставшимся данным применялось программное обеспечение OSA версии 11 (см. <https://www.isdc.unige.ch/integral/>). Данные обсерватории *ИНТЕГРАЛ* были повторно обработаны с помощью собственного пакета анализа, разработанного в Институте Космических Исследований Российской Академии Наук (подробности доступны в [50–52]), который был оптимизирован для восстановления изображения телескопа *IBIS* с использованием алгоритма подавления

систематических неопределённостей [50], который доказал свою эффективность в ряде работ [51; 53], что имеет решающее значение для анализа изображений Стрелец Б2, расположенного в области ГЦ — поле с большой плотностью источников. Для анализа были использованы отдельные изображения неба для каждого стандартного наблюдения обсерватории *ИНТЕГРАЛ* с типичным временем экспозиции 2–3 кс (индивидуальное наблюдение). Для компенсации продолжающейся деградации детектора все изображения неба индивидуальных наблюдений были перенормированы с использованием наблюдаемой скорости счёта Крабовидной туманности, измеренной в ближайшем наблюдении, что обеспечивает плавную калибровку вспомогательной функции отклика детектора на протяжении всего времени наблюдения. Типичное время между наблюдениями Стрелец Б2 и Крабовидной туманности составляет около 30 дней. В результате, окончательные изображения неба строятся из индивидуальных изображений неба телескопа *IBIS* в единицах мКраб. Следует отметить, что описанная процедура автоматически учитывает внутреннюю переменность потока Крабовидной туманности (подробнее см. Раздел 1.1.2). Для спектрального анализа этой работы использовалась диагональная матрица энергетического отклика детектора, построенная по наблюдениям Крабовидной туманности, спектр которой может быть представлен как $10,0 \times E^{-2.1}$ кэВ фот. см⁻² с⁻¹ кэВ⁻¹ [54; 55, например]. Спектры источников извлекались из изображений, построенных в энергетических диапазонах, соответствующих спектральным бинам. Необходимо добавить, что астрофизический (рентгеновские КЛ и фон хребта Галактики) и инструментальный фон телескопа *IBIS* уже вычтены в результате алгоритма реконструкции изображения, которое было получено телескопом с кодирующей маской, поэтому изображения неба, построенные в единицах значимости регистрации, имеют нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию.

Для анализа долговременной кривой блеска Стрельца Б2 был выбран энергетический диапазон 30–80 кэВ, т. к. он характеризуется практически постоянной эффективностью в течение более чем десятилетия наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, т. е. на него не сильно влияет продолжающаяся деградация детектора. Необходимо отметить, что ошибки для всех оцениваемых параметров даны для доверительного интервала на уровне 90 %.

Систематические неопределённости при измерении потока

Перед детальным анализом данных телескопа *IBIS* необходимо проверить наличие систематической неопределённости в измерениях потоков. Для этого использовался стандартный калибровочный источник Крабовидной туманности, поток которого измерялся в каждом индивидуальном наблюдении в следующих энергетических диапазонах: 30–80 кэВ (кривые блеска см. в следующем параграфе) и 17–26, 26–38, 38–57, 57–86, 86–129 кэВ для спектров Стрельца Б2 (см. раздел 1.1.5). Относительный систематический разброс измеренных потоков определялся путём деления стандартного отклонения индивидуальных измерений потока Крабовидной туманности на его среднее значение за время данного оборота космического аппарата, длительность которого составляет около 3 суток. Во всех энергетических диапазонах была обнаружена систематическая неопределённость на уровне $\sim 5-8\%$ за рассматриваемый интервал времени 2003–2019 гг. Полученный уровень систематической неопределённости измерения потока сравним с переменностью потока Крабовидной туманности, наблюдаемой на уровне 10 % [56]. Следует отметить, что из-за постепенной деградации детектора *ISGRI* на энергиях ниже 30 кэВ [57], относительная систематическая неопределённость увеличилась до 20–30 % после 2014 г. Оценённые систематические неопределённости были квадратично добавлены к ошибкам измерений потока при последующем анализе.

В качестве эталонного постоянного источника рентгеновского излучения для проверки процедуры извлечения кривой блеска использовалось скопление Змееносца, расположенное на расстоянии $\sim 9^\circ$ от Стрельца Б2. На Рисунке 1.1 показана многолетняя кривая блеска скопления Змееносца в диапазоне 30–80 кэВ, аппроксимированная постоянной функцией. В результате такой аппроксимации поток излучения скопления Змееносца был определён на значении $F_{\text{Oph}} = 1,37 \pm 0,11$ мКраб¹. Несмотря на то, что скопление Змееносца является относительно слабым источником в диапазоне 30–80 кэВ, была получена хорошая статистика аппроксимации с $\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 1,4/16$, где χ_{red}^2 — параметр хи-квадрат, приведённый к количеству степеней свободы, которые обозначены *d.o.f.* (degrees of freedom). Таким образом, можно заключить, что на процедуру

¹Единица 1 мКраб эквивалентна потоку $1,07 \cdot 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ для источника со спектром, подобным спектру Крабовидной туманности (см. Раздел 1.1.2).

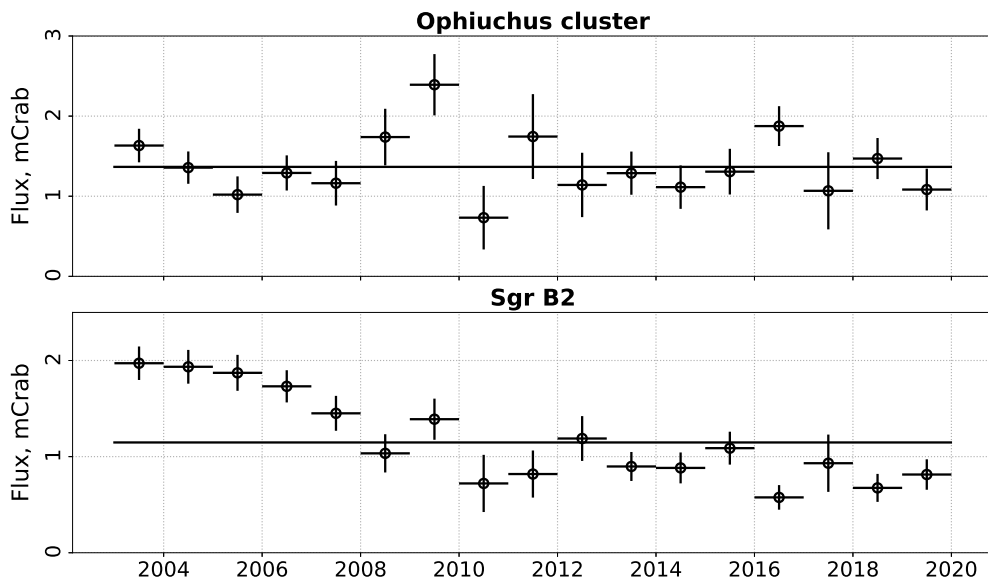


Рисунок 1.1 — Кривые блеска скопления Змееносца (верхний график) и молекулярного облака Стрелец Б2 (нижний график), полученные телескопом *IBIS* в 2003–2019 гг. Сплошные линии представляют постоянные функции наилучшей аппроксимации кривых блеска скопления Змееносца и Стрельца Б2, построенные на верхнем и нижнем графиках соответственно.

извлечения кривой блеска из данных телескопа *IBIS/ISGRI* в диапазоне 30–80 кэВ систематическая неопределённость, связанная с многолетней деградацией детектора *ISGRI*, не оказывает существенного влияния.

1.1.3 Изображения области Стрельца Б2 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*

Впервые была построена усреднённая карта области ГЦ по данным телескопа *IBIS/ISGRI* в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ с использованием всех доступных данных за период 2003–2019 гг. (Рисунок 1.2). Источник IGR J17475–2822, пространственно совпадающий с положением Стрельца Б2 [58; 59], был зарегистрирован в диапазоне 30–80 кэВ с потоком $1,25 \pm 0,04$ мКраб и координатами $RA = 17^{\text{h}}47^{\text{m}}29^{\text{s}}.28$ и $Dec. = -28^{\circ}21'57''.6$ (эпоха J2000). Положение центроида² IGR J17475–2822 оказалось смещённым на $\sim 2',1$ от центра пика колонки поглощения молекулярного газа Стрельца Б2, локализованного между

²Центроид определяется как средневзвешенные по потоку координаты элементов изображения источника.

ядрами Стрелец Б2(N) и Стрелец Б2(M) на координатах $RA = 17^h47^m20^s.35$ и $Dec. = -28^\circ22'43''.5$ [60]. Стоит отметить, что точность локализации точечного источника телескопом *ИНТЕГРАЛ/IBIS* зависит от значимости его регистрации [61]. Таким образом, обнаруженное смещение находится внутри неопределённости в $\sim 3'$ (2σ) соответствующей значимости регистрации источника $10 - 20\sigma$, что подтверждает ассоциацию IGR J17475–2822 с молекулярным облаком Стрелец Б2.

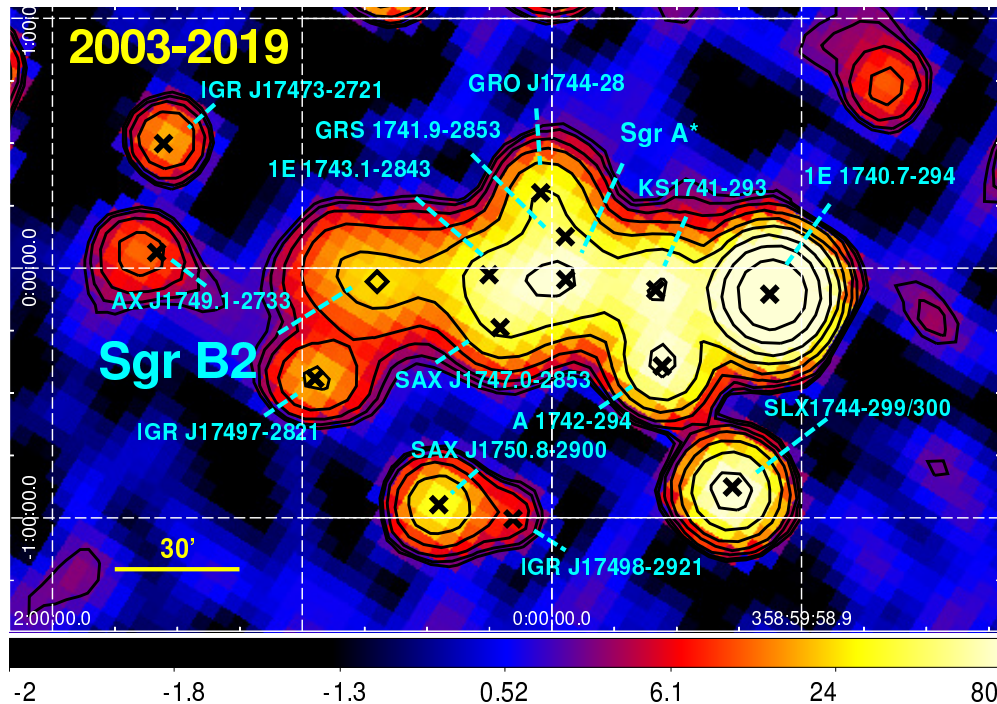


Рисунок 1.2 — Изображение области ГЦ в единицах значимости детектирования, построенное по данным телескопа *IBIS* за период 2003–2019 гг. в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ. Положения известных ярких рентгеновских источников отмечены крестиками. Сплошные чёрные контуры демонстрируют уровни значимости от 2σ до 800σ в логарифмическом масштабе. Молекулярное облако Стрелец Б2 показано ромбиком. Координатная сетка соответствует галактическим координатам.

Карты области ГЦ по данным телескопа *IBIS* (Рисунок 1.3), усреднённые за каждый год наблюдений, демонстрируют уменьшение потока с 2003 по 2009 гг. с соответствующим уменьшением значимости регистрации с 13σ до 4σ , что согласуется с результатом Террьеера и др. [19]. Следует отметить, что анализ, проведённый в данной диссертации, является независимым от анализа Террьеера и др. [19]. На изображениях неба после 2009 г. Стрелец Б2 проявляется как слабый рентгеновский источник, регистрируемый на уровне значимости $\sim 2 - 5\sigma$. Ви-

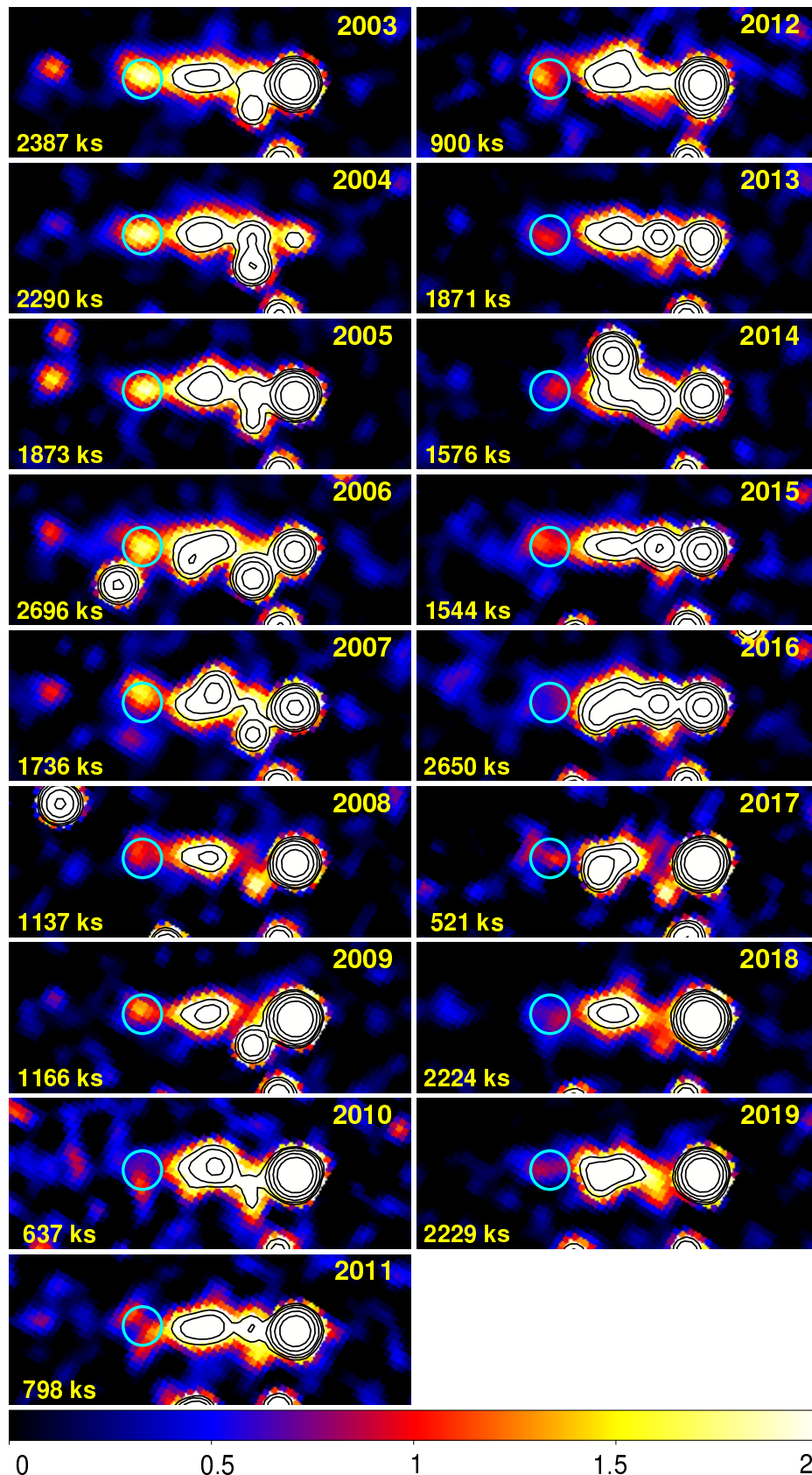


Рисунок 1.3 — Карты области ГЦ, усреднённые за каждый год наблюдений телескопа *IBIS* с 2003 по 2019 гг. Карты представлены в единицах потока (мКраб) и построены в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ. Голубой кружок с радиусом $R = 6'$ показывает положение источника Стрелец Б2. Соответствующие годы и времена экспозиции, скорректированные на мёртвое время, указаны на каждой панели. Контуры демонстрируют изофоты потока уровней 2, 3, 5, 10, и 20 мКраб.

димые изменения морфологии не связаны с реальными изменениями излучения, т. к. точность локализации слабых источников обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* составляет $4',2$ в доверительном интервале 2σ [61]. Также из Рисунка 1.3 хорошо видно, что некоторые источники ГЦ имеют сильные вариации потока на масштабе менее одного года. Контурные линии на Рисунке 1.3 соответствуют изофотам поверхностной яркости выше 2 мКраб и нанесены для лучшего представления близких рентгеновских источников с потоком, превышающим поток Стрельца Б2. На Рисунке 1.3 хорошо заметно, что рентгеновское излучение из области Стрелец Б2 всё ещё регистрируется после 2010 г.

1.1.4 Долговременная кривая блеска Стрельца Б2

Кривая блеска Стрельца Б2, полученная по данным телескопа *IBIS* за период 2003–2019 гг., показана на нижней панели Рисунка 1.1. Для начала кривая блеска была аппроксимирована постоянной функцией, которая не показала хорошего согласия с данными ($\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 7,4/16$, см. Таблицу 1), что главным образом вызвано хорошо заметным уменьшением потока рентгеновского излучения Стрельца Б2, наблюдаемым ранее до 2009 г. [19]. Таким образом, можно сделать вывод, что поток Стрельца Б2 не согласуется с постоянной функцией и демонстрирует переменность на масштабе нескольких лет. Также стоит отметить, что возможная кратковременная переменность Стрельца Б2, если она всё же присутствует, не может быть заметна на масштабе годичного временного интервала, а качество данных, собранных за меньшие временные интервалы, содержит большую систематическую неопределенность потока, что не позволяет проанализировать такие данные.

Для описания затухающего поведения излучения Стрельца Б2 применялась линейная функция вида: $A * T + B$, где A и B — коэффициенты линейной функции, выраженные в единицах мКраб/лет и мКраб соответственно, а T — время, выраженное в годах с 2003 г. Такая линейная модель лучше описывает кривую блеска Стрельца Б2, как показано на Рисунке 1.4 и приведено в Таблице 1. Для сравнения полученного результата с результатом Террьеера и др. [19] был выбран временной параметр $\tau_{1/2}$ — время, за которое поток уменьшается в 2 раза по сравнению с его начальным значением. Оценка $\tau_{1/2} = 12 \pm 2$ лет, полученная за период 2003–

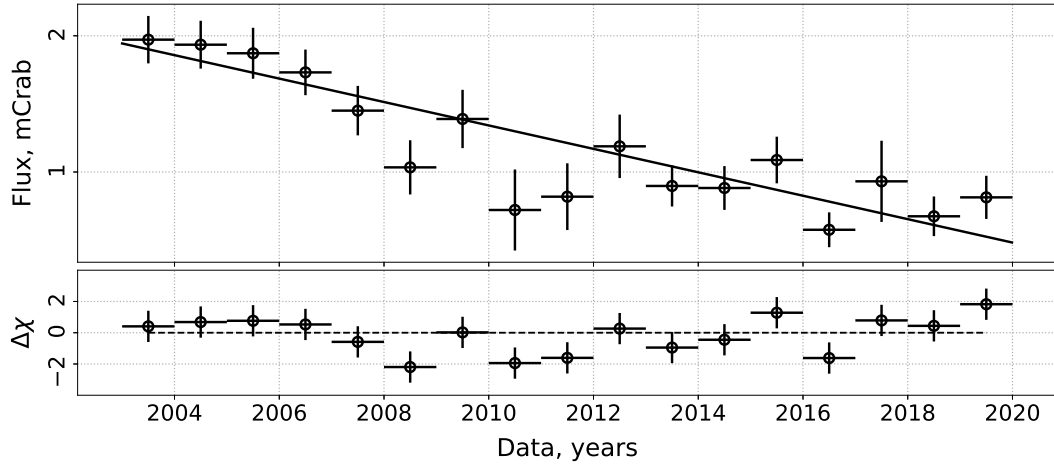


Рисунок 1.4 — Кривая блеска Стрелец Б2 в диапазоне энергий 30–80 кэВ, аппроксимированная линейной функцией (верхний график), и невязки (нижний график).

2019 гг., слегка превышает значение $\tau_{1/2} = 8,2 \pm 1,7$ лет, полученное в работе Террье́ра и др. [19] за 2003–2009 гг. Разница скорее всего вызвана тем, что в первом случае аппроксимация проводилась для более длительного периода времени.

Таблица 1 — Наилучшие параметры аппроксимации кривой блеска Стрельца Б2 постоянной, линейной, кусочно-линейной и экспоненциальной функциями.

Параметр	Постоянная	Линейная	Кусочно-линейная	Экспонента
A , мКраб/лет	—	$-0,08 \pm 0,01$	$-0,16 \pm 0,06$	—
B , мКраб	—	$1,9 \pm 0,14$	$2,2 \pm 0,2$	—
T_{break} , лет	—	—	2011 ± 3	—
$\tau_{1/2}$, лет	—	12 ± 2	6 ± 2	—
C , мКраб	$\sim 1,1$	—	$0,83 \pm 0,10$	$0,5^{+0,3}_{-0,6}$
F_0 , мКраб	—	—	—	$1,7^{+0,5}_{-0,3}$
τ , лет	—	—	—	$7,5^{+7,1}_{-3,5}$
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$	7,4/16	1,48/15	1,09/14	1,04/14

В предположении существования постоянного уровня в затухающем потоке Стрельца Б2 для описания кривой блеска использовалась следующая кусочно-линейная функция:

$$F(T) = \begin{cases} A * T + B & \text{при } T \leq T_{\text{break}} \\ C & \text{при } T > T_{\text{break}} \end{cases}, \quad (1.1)$$

где T_{break} — год, в который излучение Стрельца Б2 выходит на постоянный уровень C . Аппроксимация кривой блеска такой функцией представлена на Рисунке 1.5, а

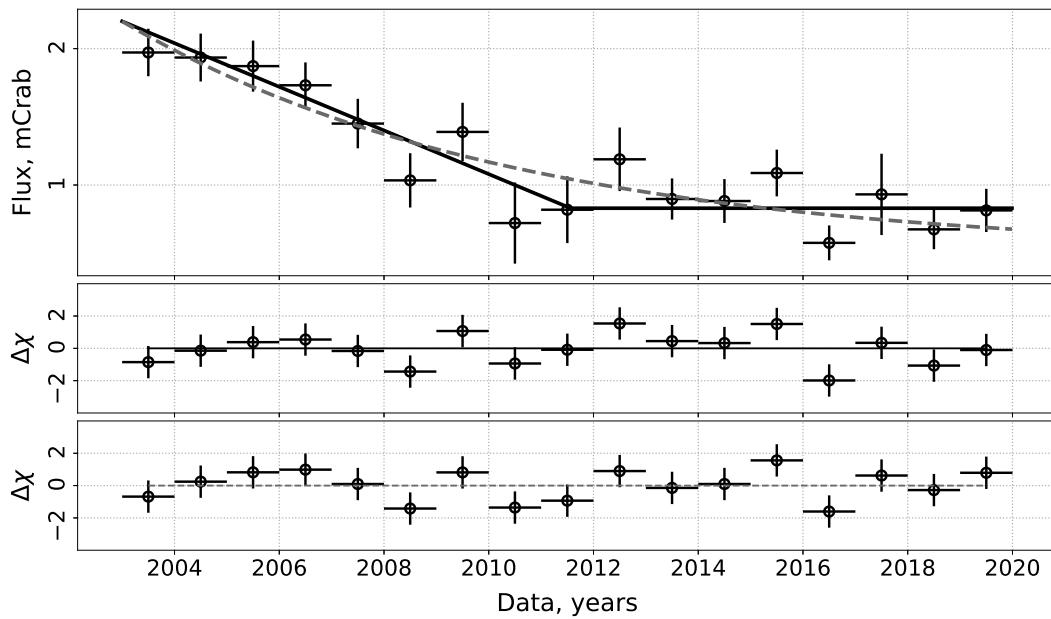


Рисунок 1.5 — Кривая блеска Стрельца Б2 в диапазоне 30–80 кэВ, аппроксимированная кусочно-линейной и экспоненциальной функциями, что показано на верхнем графике сплошной и пунктирной линиями соответственно. Невязки для кусочно-линейной и экспоненциальной функций показаны на средней и нижней панелях соответственно.

наилучшие параметры приведены в Таблице 1. Характерное время $\tau_{1/2} = 6 \pm 2$ лет согласуется с результатом Террьер и др. [19] в пределах ошибок. Стоит отметить, что постоянный уровень потока $C = 0,8 \pm 0,1$ мКраб, измеренный после $T_{\text{break}} = 2011$ г. не согласуется с нулевым уровнем потока фонового излучения, который ожидался для метода восстановления изображения неба телескопа с кодирующей маской [50].

Для сравнения различных моделей был применён критерий перекрестной проверки выборок параметров, полученных методом Монте-Карло с марковскими цепями, на основе алгоритма «отбрасывания одного события» (leave-one-out, [62]). В результате было определено, что линейная функция может быть принята, как истинная гипотеза, по сравнению с постоянной функцией с вероятностью 98 %. При сравнении кусочно-линейной и постоянной функций оказалось, что последняя может быть отброшена, т. к. с вероятностью почти 100 % (против 10^{-13} %) кусочно-линейная функция является истинной. Если сравнивать модели, предполагающие наличие переменности излучения с течением времени, то с вероятностью ~ 70 % кусочно-линейная функция является истинной (против ~ 30 %-ой вероятности для простой линейной функции), однако этот результат не является статистически значимым, чтобы сделать однозначный вывод об ис-

тинности одной из моделей. Таким образом, кусочно-линейная функция имеет тенденцию лучше описывать полученную кривую блеска Стрельца Б2.

Весь набор данных, полученный с 2003 по 2019 гг., был разделён на два временных интервала $T1$ и $T2$ измеренным $T_{\text{break}} = 2011$ г., в котором излучение после линейного затухания достигает постоянного уровня в соответствии с аппроксимацией кусочно-линейной функцией (Раздел 1.1.4). На Рисунке 1.6 показаны карты значимости для временных интервалов $T1$ и $T2$ в диапазоне энергий 30–80 кэВ. Поток Стрельца Б2 в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ был измерен на уровнях 1,6 мКраб ($23,5\sigma$ значимость) и 0,8 мКраб ($10,7\sigma$) соответственно для наборов данных $T1$ и $T2$.

Положения центроида Стрельца Б2, измеренные за $T1$ ($RA = 17^{\text{h}}47^{\text{m}}28^{\text{s}}.32$, $Dec. = -28^{\circ}21'10''.8$) и $T2$ ($RA = 17^{\text{h}}47^{\text{m}}25^{\text{s}}.75$, $Dec. = -28^{\circ}25'08''.2$) смещены соответственно на $2',3$ и $2',7$ относительно положения максимума колонки плотности облака [60]. Наблюдаемые смещения хорошо согласуются с $3'$ неопределённостью локализации (2σ доверительный интервал) слабых источников, зарегистрированных телескопом *ИНТЕГРАЛ/IBIS* [61].

В заключение кривая блеска Стрельца Б2 была аппроксимирована функцией экспоненциального затухания с компонентой постоянного потока C : $F_0 \times \exp^{-T/\tau} + C$, где F_0 — начальный поток в мКраб; τ — время жизни излучения, выраженное в годах. Наилучшая модель описывает кривую блеска с приемлемым значением статистики $\chi^2_{\text{red}}/d.o.f. = 1,04/14$, как показано в Таблице 1 и на Рисунке 1.5. Время жизни излучения составило $\tau = 7,5_{-3,4}^{+7,1}$ лет, что согласуется в пределах ошибок с $\tau \sim 11$ лет, полученным для круговой области ядра молекулярного облака Стрелец Б2 с радиусом $R = 90''$ по данным космического телескопа *NuSTAR* [18].

1.1.5 Спектральный анализ

В этом разделе описывается анализ спектральной информации об излучении Стрельца Б2 в широком диапазоне энергий 17–129 кэВ, полученной для временных интервалов $T1$ и $T2$ (Раздел 1.1.4). Спектры были извлечены из изображений неба в разных энергетических диапазонах в положении Стрельца Б2, как показано на Рисунке 1.6. Следует обратить внимание, что область

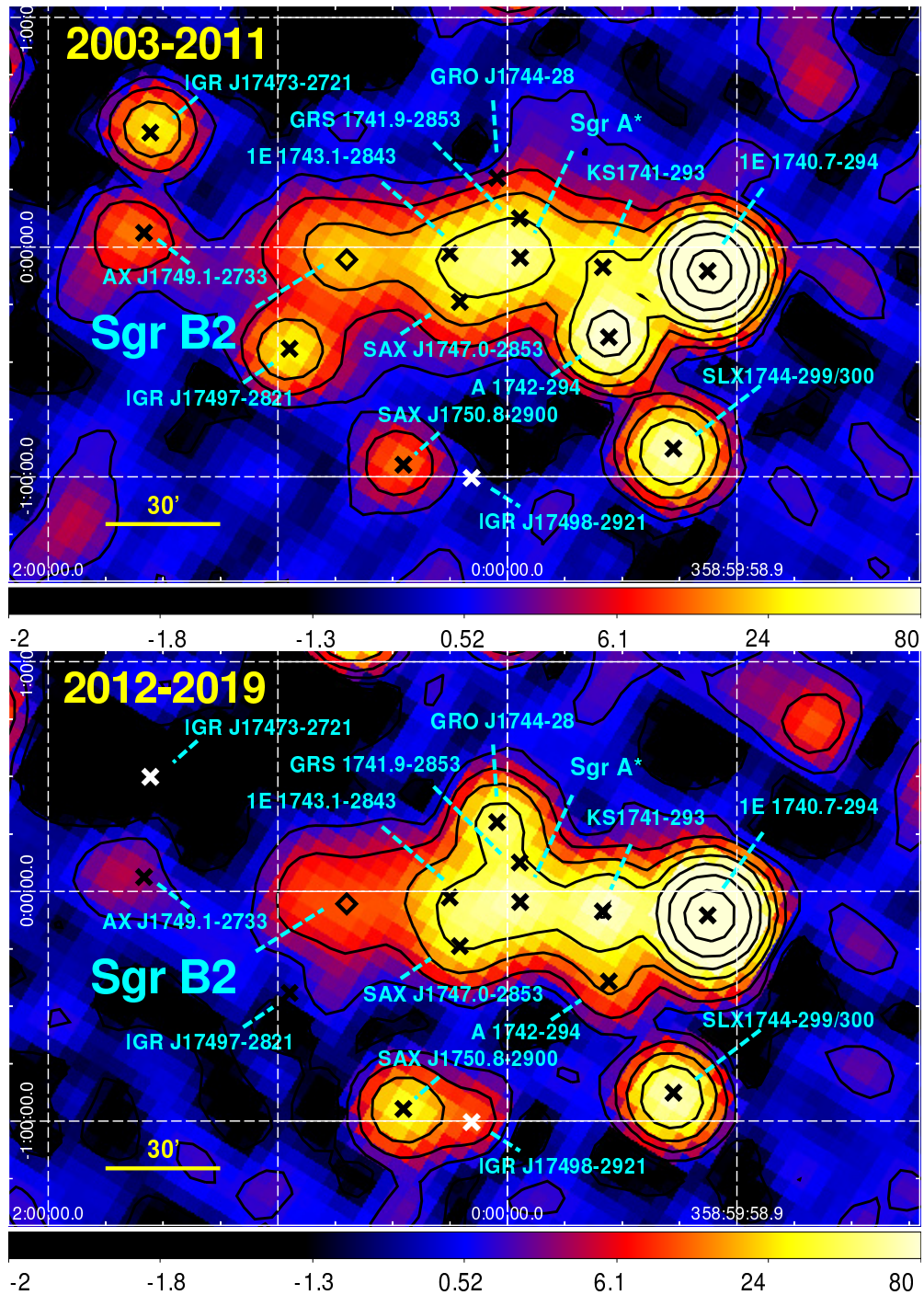


Рисунок 1.6 — Изображения области ГЦ в диапазоне энергий 30–80 кэВ, полученные по данным телескопа *IBIS* для временных интервалов $T1$ (верхняя панель) и $T2$ (нижняя) и выраженные в единицах значимости регистрации. Все обозначения соответствуют указанным на Рисунке 1.2.

извлечения спектров соответствует угловому разрешению телескопа *IBIS/ISGRI*, составляющему $12'$. Из спектра *T2* был исключён первый энергетический бин из-за продолжающейся деградации детектора *ISGRI* и потери чувствительности при низких энергиях [57]. При аппроксимации спектров добавлялась систематическая ошибка на уровне 5 %.

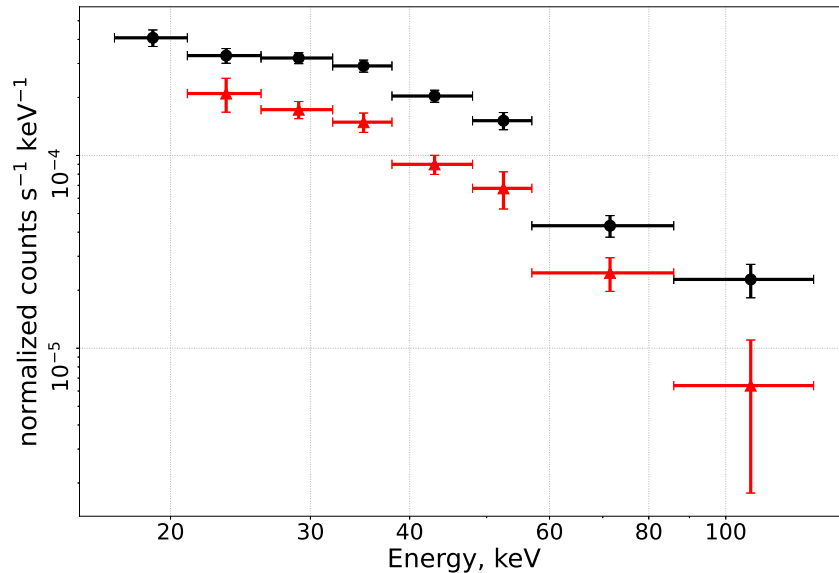


Рисунок 1.7 — Спектры области Стрельца Б2, полученные в диапазоне энергий 17–129 кэВ (чёрные кружки) и 21–129 кэВ (красные треугольники) по данным *IBIS* для *T1* (кружки) и *T2* (треугольники) соответственно.

Вначале полученные спектры области Стрельца Б2 (см. Рисунок 1.7) были аппроксимированы моделью степенного закона (*power-law*) вида: $N \cdot E^{-\Gamma}$, где E — энергия фотонов, выраженная в кэВ, N — нормировка на энергии 1 кэВ в единицах фот. кэВ $^{-1}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, Γ — фотонный индекс. Для этого использовался пакет XSPEC версии 12.11.0 [63], который является частью программного обеспечения HEASOFT V6.27. Результаты приведены в Таблице 2. Для этой и всех последующих моделей приводится поток $F_{25-50 \text{ кэВ}}$, вычисленный в энергетическом диапазоне 25–50 кэВ. Степенная модель согласуется только со спектром *T2* (см. Таблицу 2). Кроме того, его фотонный индекс Γ значительно больше, чем $\Gamma = 2,07 \pm 0,05$, полученный для высокоэнергетической части широкополосного спектра Стрельца Б2 [19]. На левом графике Рисунка 1.8 показаны спектры области Стрельца Б2, аппроксимированные степенной моделью. Невязки спектра *T1* указывают на присутствие некоторого завала спектра на высоких энергиях около 40 кэВ.

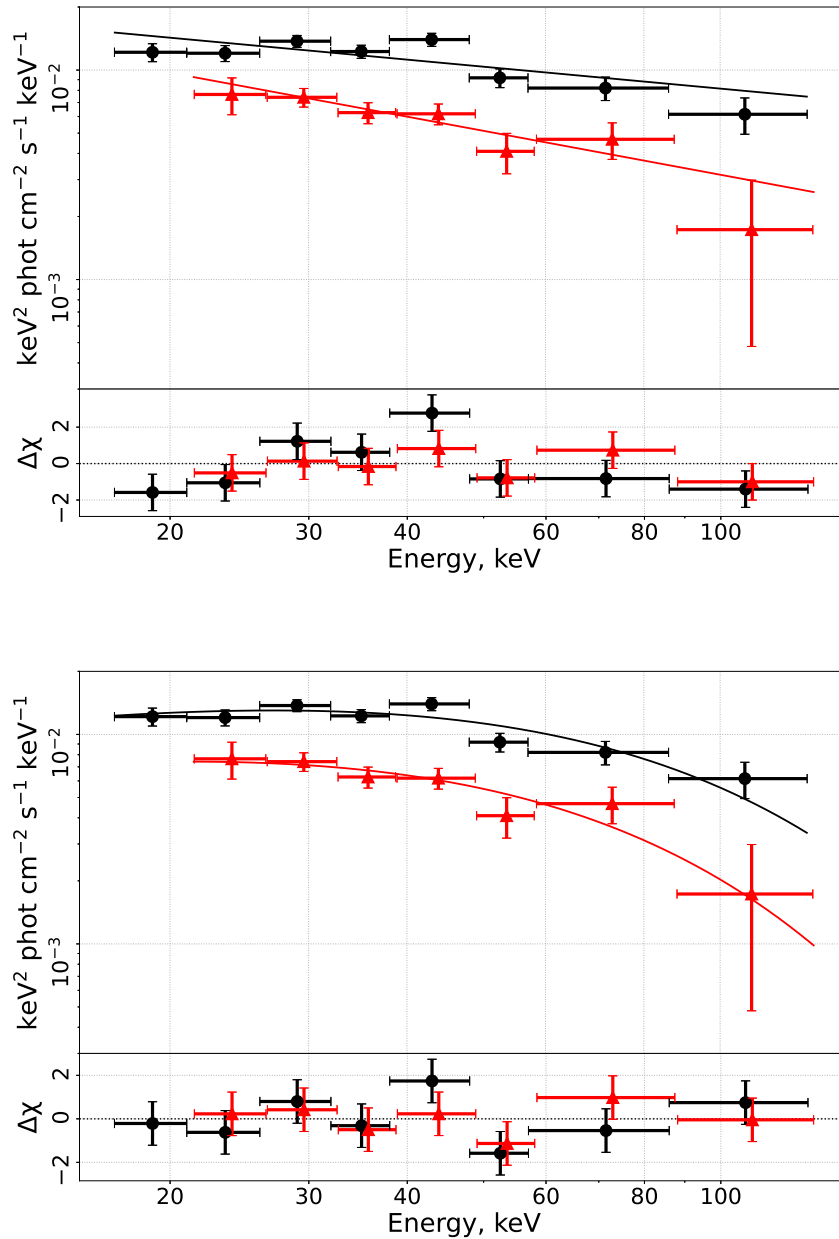


Рисунок 1.8 — Спектры области Стрельца Б2, полученные в энергетических диапазонах 17–129 и 21–129 кэВ телескопом *IBIS* за временные интервалы $T1$ (кружки) и $T2$ (треугольники) соответственно. Чёрная и красная сплошные линии представляют наилучшие модели простого степенного закона (верхняя панель) и степенного закона с экспоненциальным завалом (нижняя панель) для спектров Стрельца Б2, полученных до и после T_{break} соответственно.

Затем оба спектра были аппроксимированы моделью степенного закона с экспоненциальным завалом *cutoff* следующего вида: $N \cdot E^{-\Gamma} e^{-E/E_{\text{cut}}}$, где E_{cut} — энергия экспоненциального завала, выраженная в кэВ, а остальные параметры соответствуют обозначениям, указанным для простого степенного закона. Параметры модели наилучшей аппроксимации приведены в Таблице 2. Спектр $T1$ области Стрельца Б2 хорошо согласуется с этой моделью с энергией завала $E_{\text{cut}} = 44_{-18}^{+61}$ кэВ (см. нижнюю панель на Рисунке 1.8). Из-за недостаточно хорошей статистики данных $T2$ аппроксимация не даёт ограничения на фотонный индекс, поэтому этот параметр был зафиксирован на ранее полученном значении $\Gamma = 1,4$. По результатам аппроксимации был сделан вывод о том, что степенной закон с экспоненциальным завалом лучше описывает спектр $T1$, чем простой степенной закон (см. Таблицу 2).

В предположении, что форма спектра не изменилась с временного интервала $T1$ до $T2$, оба спектра были аппроксимированы совместно моделью степенного закона с завалом (см. столбец «Совместно» в Таблице 2). В Таблице 2 C_{cross} — постоянная кросс-нормировки спектра $T2$ по отношению к спектру $T1$. Измеренное значение C_{cross} , равное $0,51 \pm 0,06$, показывает, что поток $T1$ уменьшился примерно в 2 раза. Результат аппроксимации обладает хорошей статистикой, которая указывает на возможное сходство между спектральными формами $T1$ и $T2$.

На следующем этапе была использована физически мотивированная табличная модель *CREFL16* [64], которая описывает спектр однородного облака газа, освещённого внешним источником параллельного рентгеновского излучения. Эта модель позволяет восстановить спектр отражённого излучения вспышки СМЧД Стрелец A^* от молекулярных облаков ГЦ. Отражённое излучение зависит от пяти параметров: радиальной оптической толщины Томсона облака τ_T , наклона первичного степенного спектра Γ , обилия тяжёлых элементов относительно солнечного [65] Z/Z_{\odot} , косинуса угла рассеяния $\mu = \cos\Theta$ и нормировки. В соответствии со значениями, определёнными в работе Ревнивцева и др. [35], были зафиксированы следующие параметры $\tau_T = 0,4$, $Z/Z_{\odot} = 1,9$. Данная модель применялась для случая, когда Стрелец Б2 находится в одной плоскости со Стрельцом A^* , т. е. $\mu = \cos 90^\circ = 0$. (см. Таблицу 2). В этой конфигурации модель *CREFL16* хорошо описывает спектр $T1$ с $\Gamma = 2,30 \pm 0,13$. Спектр $T2$ не позволяет оценить Γ , поэтому фотонный индекс был зафиксирован на значении, полученном для $T1$, в предположении одинаковой вспышки для обоих временных

Таблица 2 — Параметры наилучшей аппроксимации спектров Стрельца Б2, полученных за периоды $T1$ и $T2$, различными моделями. Здесь и далее фиксированные параметры обозначены «фикс.»

Параметры	$T1$	$T2$	Совместно
<i>Power – law</i>			
Γ	$\sim 2,3$	$2,7 \pm 0,3$	—
$F_{25-50 \text{ кэВ}}$ $10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	~ 13	$7,2 \pm 0,7$	—
C_{cross}			—
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$	2,75/6	0,63/5	—
<i>Cutoff power – law</i>			
Γ	$1,4 \pm 0,6$	1,4 (фикс.)	$1,4_{-0,6}^{+0,5}$
$E_{\text{cut}}, \text{ кэВ}$	44_{-18}^{+61}	35_{-8}^{+12}	43_{-17}^{+48}
$F_{25-50 \text{ кэВ}},$ $10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	14 ± 1	$7,3_{-0,8}^{+0,7}$	$13,9 \pm 0,9$
C_{cross}			$0,51 \pm 0,06$
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$	1,51/5	0,55/5	1,08/11
<i>CREFL16</i>			
Γ	$2,30 \pm 0,13$	2,3 (фикс.)	$2,35 \pm 0,12$
$F_{25-50 \text{ кэВ}},$ $10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$13,6 \pm 0,8$	$7,0 \pm 0,7$	$13,6 \pm 0,8$
C_{cross}			$0,52 \pm 0,06$
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$	1,53/6	0,85/6	1,14/12
<i>LECRp</i>			
Γ	—	$2,7 \pm 0,5$	—
$N, 10^{-6} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	—	$2,7_{-1,3}^{+3,5}$	—
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$	—	0,87/5	—

интервалов, в результате чего была получена хорошая статистика аппроксимации (см. Таблицу 2).

Модель *CREFL16* позволяет оценить светимость первичного источника по наблюдаемому спектру молекулярных облаков. В предположении, что облако Стрелец Б2 и СМЧД Стрелец A^* (или другой рентгеновский источник) удалены от Земли на расстояние 8,178 кпк [2], и с использованием ранее выбранные параметры модели и фотонный индекс вспышки $\Gamma = 2,3$, определённый по спектру $T1$, была оценена светимость первичного источника в диапазоне 2–10 кэВ $L_{2-10 \text{ кэВ}} \sim 6 \cdot 10^{38} \text{ эрг с}^{-1} (D/8,178 \text{ кпк})^2 (r/10 \text{ пк})^{-2} (d/100 \text{ пк})^2$ и $\sim 3 \cdot 10^{38} \text{ эрг с}^{-1} (D/8,277 \text{ кпк})^2 (r/10 \text{ пк})^{-2} (d/100 \text{ пк})^2$, необходимая для объяснения наблюдаемого уровня излучения облака Стрелец Б2 за периоды $T1$ и $T2$ соответственно, где r — радиус облучаемой части облака, D — расстояние от Земли до облака Стрелец Б2, d — расстояние от облака до первичного источника. Оценка светимости, данная по спектру фазы линейного спада $T1$ согласуется с предыдущими результатами [19; 35]. Также стоит отметить, что оба полученных значения светимости первичного источника, оценённые и по спектру $T1$, и по спектру $T2$, согласуются с результатом Жанг и др. [18].

Другим механизмом, объясняющим рентгеновское излучение Стрельца Б2, может быть взаимодействие молекулярного вещества облака с частицами КЛ. Татищев и др. [12] исследовали нетепловое излучение нейтральной окружающей среды, вызванное электронами и протонами низкоэнергетических КЛ (далее *LECR_e* и *LECR_p* соответственно), и разработали соответствующие спектральные модели. Из-за неправдоподобных параметров модели *LECR_e*, оценённых по данным телескопа *NuSTAR* для излучения Стрельца Б2 [18], для данных обсерватории *ИНТЕГРАЛ* использовалась только модель *LECR_p*. Модель *LECR_p* зависит от пяти параметров: наклона степенного спектра ускоренных КЛ s , минимальной энергии КЛ E_{\min} , металличности окружающей среды Z/Z_{\odot} , длины пробега КЛ в исследуемой области Λ и нормировки модели N_{LECR_p} . Были зафиксированы параметры $Z/Z_{\odot} = 2,5$, $\Lambda = 5 \cdot 10^{24} \text{ атомов Н см}^{-2}$, $E_{\min} = 10 \text{ МэВ}$ в соответствии с [18], а N_{LECR_p} и s оставили свободными параметрами. Из-за переменности кривой блеска Стрелец Б2 на масштабе нескольких лет, зарегистрированной для временного интервала $T1$ (см. Раздел 1.1.4) и противоречащей сценарию КЛ [12; 14], модель *LECR_p* применялась только к спектру $T2$. Полученные результаты представлены в Таблице 2.

1.1.6 Обсуждение

Затухание рентгеновского излучения Стрельца Б2 наблюдалось рентгеновскими телескопами *XMM-Ньютон*, *NuSTAR*, *Suzaku* и *ИНТЕГРАЛ* [9; 18; 19; 66; 67]. Наиболее подходящей гипотезой, объясняющей переменность по времени рентгеновского излучения Стрельца Б2, является отражение рентгеновской вспышки СМЧД Стрелец A^* . Однако, остается открытым вопрос о том, как долго излучение Стрельца Б2 будет сохранять тенденцию к затуханию и какой механизм будет доминировать в наблюдаемом рентгеновском излучении после того, как световой фронт вспышки от Стрельца A^* покинет облако.

Предыдущие наблюдения области Стрельца Б2 рентгеновскими обсерваторией *XMM-Ньютон* и телескопом *NuSTAR* показали, что поток в линии излучения Fe K_α центральной области ($R = 90''$) в 2013 г. согласуется с потоком, измеренным в 2012 г., но в то же время поток 2013 г. соответствует и линейному затуханию [18]. Жанг и др. [18] пришли к выводу, что если излучение Стрельца Б2 достигло своего фонового уровня, основной вклад могут вносить именно протоны КЛ (LECRp). Хотя, если поток Стрельца Б2 всё же продолжает уменьшаться, сценарий отражения лучше описывает наблюдаемое поведение излучения. Кроме того, с помощью обсерватории *XMM-Ньютон* было показано, что в 2012 г. протяжённое рентгеновское излучение всё ещё наблюдается в области Стрельца Б2 [9]. Стоит отметить, что аналогичный случай возможного достижения постоянного уровня был обнаружен для нетеплового излучения молекулярного облака вблизи звёздного скопления Арки в ГЦ (см. Раздел 1.2 и [68]).

Обсерватория *ИНТЕГРАЛ* позволила собрать долговременную информацию об излучении из области Стрельца Б2 за 17 лет с 2003 г. Пространственно согласующийся с облаком Стрелец Б2 источник жёсткого рентгеновского излучения IGR J17475–2822 регистрировался в течение всего рассматриваемого интервала времени. Кривая блеска IGR J17475–2822, полученная в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ, демонстрирует линейное уменьшение, вышедшее на постоянный уровень в 2011 г., что позволило разделить временной интервал 2003–2019 гг. на эпохи $T1$ и $T2$. Этот результат согласуется с предположением, что поток Стрельца Б2, измеренный в 2013 г. по данным телескопа *NuSTAR*, остался на уровне 2012 г. [18]. Линейное затухание излучения, наблюдающееся до 2011 г., характеризуется величиной $\tau_{1/2} = 6 \pm 2$ лет, что согласуется с преды-

дущим результатом $\tau_{1/2} = 8,2 \pm 1,7$ лет, полученным за 2003–2009 гг. по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* [19]. Таким образом, кривая блеска по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* поддерживает сценарий отражения для излучения Стрельца Б2 до ~ 2011 г. В случае сценария отражения, доминирующего на всём исследуемом периоде с 2003 по 2019 гг., при котором излучение характеризуется одним линейным затуханием, τ оценивается в 12 ± 2 лет. Это значение немного больше, чем полученное ранее [19]. Стоит отметить, что уменьшение потока рентгеновского континуума Стрельца Б2 на энергиях выше 17 кэВ, наблюдаемое обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, согласуется с общим падением потока в линии 6,4 кэВ, измеренным обсерваторией *ХММ-Ньютон* для той же области неба [69]. Это свидетельствует о том, что поток в линии Fe K_α и жёсткий рентгеновский континуум связаны друг с другом, что подтверждает сценарий отражения.

Спектральный анализ также указывает на сценарий отражения, поскольку спектры Стрельца Б2, полученные в энергетическом диапазоне 17–129 кэВ по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* за временные интервалы линейного затухания $T1$ и постоянного излучения $T2$, согласуются с моделью *CREFL16*. Наклон спектра первичной вспышки для временного интервала $T1$ оценивается как $\Gamma = 2,30 \pm 0,13$ (на уровне доверительного интервала 90 %), что согласуется с $\Gamma \sim 2$, полученной для центральной области ($R = 90''$) Стрельца Б2 по данным телескопа *NuSTAR* [7; 18; 70]. Кроме того, Ревнивцев и др. [35] оценили наклон первичного спектра на значении $\Gamma = 1,8 \pm 0,2$ (доверительный интервал 1σ), что было получено по данным наблюдений Стрельца Б2 обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* в 2003–2004 гг. Кроме того, аналогичный наклон $\Gamma \sim 2$ был оценён для других молекулярных облаков ГЦ по отражённому излучению [21; 70] и для наблюдаемых рентгеновских вспышек Стрельца A^* [4; 71–77].

Гипотеза КЛ для излучения за временной интервал $T1$ может быть отвергнута из-за многолетней переменности излучения Стрельца Б2. Для протонов КЛ переменность нетеплового излучения не ожидается [16; 78]. Электроны КЛ интенсивно теряют энергию при прохождении сквозь облако, что может привести к наличию переменности нетеплового излучения облака [17], но чтобы объяснить переменность рентгеновского излучения облаков ГЦ, необходимо наличие локальных переменных источников электронов, что маловероятно [14].

Точечные источники могут давать дополнительный вклад в поток IGR J17475–2822 на интервале $T1$, но не основной, поскольку не было обнаружено никакой быстрой переменности, а суммарный поток от точечных источников

не может объяснить весь поток из области Стрельца Б2 (см. Раздел 1.1.6). Таким образом, сценарий отражения является наиболее подходящим для объяснения излучения Стрельца Б2 до 2011 г.

Основной вопрос заключается в происхождении постоянного излучения, наблюдаемого после 2011 г., когда поток Стрельца Б2 уменьшился в ~ 2 раза и остался на этом уровне до 2019 г. Не было обнаружено существенной разницы между спектральными формами излучения Стрельца Б2, измеренного за временные интервалы $T1$ (до 2011 г.) и $T2$ (после 2011 г.). Связано ли рентгеновское излучение IGR J17475–2822, наблюдаемое после 2011 г., с молекулярным облаком Стрелец Б2 или нет?

Сценарий отражения после 2011 г.

Ранее, при упоминании сценария отражения имелось в виду доминирование однократных рассеяний фотонов на веществе молекулярных облаков. Однако, в предположении, что световой фронт вспышки Стрельца A^* в основном покинул облако, другое возможное объяснение наблюдаемого остаточного излучения Стрельца Б2 связано с долгоживущим альbedo двойных рассеяний [33; 79; 80], которое, вероятно, стало видимым после 2011 г. Ожидается, что альbedo двойных рассеяний будет преобладать над однократными рассеяниями в жёстком рентгеновском излучении из-за низкого фотопоглощения и дополнительного усиления за счёт рассеяния фотонов высоких энергий в обратном направлении из-за эффекта Комптона [81; 82].

Сценарий космических лучей

Постоянный поток $T2$ может быть признаком взаимодействия нейтрального вещества молекулярного облака с КЛ. Жанг и др. [18] предположили, что в случае, если излучение Fe K_α центральной области ($R = 90''$) Стрельца Б2 достигло своего постоянного уровня в 2013 г., модель LECRp может быть основным объяснением наблюдаемого излучения. Авторы [18] отвергли гипотезу LECRe из-за

неправдоподобно высокой металличности $Z/Z_{\odot} = 4,0_{-0,6}^{+2,0}$ и очень низкой энергии электронов. Высокое значение фотонного индекса $\Gamma = 2,7 \pm 0,3$, определённое для данных обсерватории *ИНТЕГРАЛ* за период $T2$ в диапазоне энергий 21–129 кэВ, легко объясняется гипотезой LECRp, а не LECRe [12, Рисунки 7 и 9 для LECRp и Рисунки 2 и 4 для LECRe]. Хорошее соответствие между спектром $T2$ по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* и моделью LECRp указывает, что эта модель может быть причиной наблюдаемого излучения.

В предположении, что молекулярное облако Стрелец Б2 удалено от Земли на $D = 8,178$ кпк [1], была оценена мощность, инжектируемая протонами LECR с энергиями от 10 МэВ до 1 ГэВ в область Стрельца Б2, $dW/dt = 4\pi D^2 N_{\text{LECR}} = 2,1_{-1,0}^{+2,6} \cdot 10^{40}$ эрг с^{-1} . Это значение значительно больше (примерно в 10 раз), чем оценка по данным телескопа *NuSTAR* [18], вероятно, из-за того, что область извлечения спектров *ИНТЕГРАЛ* больше, чем выбранная для спектра Стрельца Б2 по данным телескопа *NuSTAR*. С учётом неопределённостей на минимальную энергию протонов E_{min} [12, см. Раздел 5.2] была получена оценка $dW/dt = (4 - 90) \cdot 10^{39}$ эрг с^{-1} . Стоит отметить, что определённая по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* оценка наклона спектра источника КЛ $s = 2,7 \pm 0,5$ противоречит наклону $1,5 < s < 2$ [83], предсказанному теорией диффузионного ускорения на ударных волнах, рассматриваемой в работе Татищева и др. [12]. Поэтому вклад сверхтепловых протонов и возможных более тяжёлых ядер не учитывался, а оценка $dW/dt = (4 - 90) \cdot 10^{39}$ эрг с^{-1} является лишь нижним пределом полной мощности КЛ.

Для исследования скорости ионизации сначала нужно определить мощность КЛ, запасённую в облаке Стрелец Б2. Полученная ранее мощность LECRp равна $dW/dt \sim 2,1 \cdot 10^{40}$ эрг с^{-1} . Мощность, полученная облаком, ниже инжектируемой dW/dt по двум причинам: КЛ с энергиями $E < E_{\text{min}}$ не проникают в облако; КЛ самых высоких энергий проходят сквозь облако, не взаимодействуя с веществом [12]. Важно отметить, что для данного расчёта рассматривались только частицы КЛ с $E > E_{\text{min}}$. При $\Lambda = 5 \cdot 10^{24}$ атомов H cm^{-2} протоны с $E > 180$ МэВ не останавливаются в облаке [12]. После интегрирования мощности КЛ только с учётом частиц с $E > 10$ МэВ/нуклон и $E < 180$ МэВ/нуклон было определено, что мощность, инжектируемая КЛ в облако, равна $\dot{W}_d \sim 1,9 \cdot 10^{40}$ эрг с^{-1} (90 % от dW/dt). С использованием полной массы молекулярного облака Стрелец Б2 $M = 6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ [84] была оценена скорость ионизации КЛ $\zeta_{\text{H}} \sim 5,6 \cdot 10^{-14} \text{H}^{-1} \text{с}^{-1}$ [12, уравнение 11]. Такая скорость ионизации КЛ слишком велика по сравнению

со скоростью ионизации КЛ в ГЦ $\zeta_{\text{H}} \sim (1 - 3) \cdot 10^{-15} \text{ H}^{-1} \text{ c}^{-1}$ [85] и несколько выше оценки для облака Стрелец Б2 $\zeta_{\text{H}} \sim (6 - 10) \cdot 10^{-15} \text{ H}^{-1} \text{ c}^{-1}$ [18]. Из-за высокой оценки скорости ионизации КЛ сценарий LECRp кажется маловероятным.

Догель и др. [86] предсказали, что в случае субрелятивистских протонов, образующихся в результате процессов аккреции на СМЧД Стрелец A^* , от молекулярного облака должны наблюдаться две компоненты рентгеновского излучения: переменное по времени отражённое излучение и квазистационарное излучение, вызванное этими протонами. Авторы также предсказали изменения по времени эквивалентной ширины линии Fe K_{α} с энергией 6,4 кэВ при прохождении фронта вспышки Стрельца A^* через облако Стрелец Б2 и полное падение отражённого потока. Будущие наблюдения Стрельца Б2 в линии излучения 6,4 кэВ прольют свет на его природу.

Сценарий неразрешённых точечных источников

Остаточное излучение Стрельца Б2 можно было бы также объяснить интегральным потоком неразрешённых рентгеновских источников в этой области. Для проверки были просуммированы потоки от известных рентгеновских источников в области Стрелец Б2.

Жанг и др. [18] представили результаты наблюдений Стрельца Б2 телескопом *NuSTAR* с покрытием области, почти совпадающей с областью неба (круг с радиусом $R = 12'$, равным FWHM ФРТИ телескопа *IBIS*), из которой было собрано излучение IGR J17475–2822 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. В этой области телескоп *NuSTAR* обнаружил только три ярких источника в диапазоне энергий 10–40 кэВ: ядро Стрельца Б2 (круговая область с радиусом $R = 90''$), протяжённую структуру G0.66–0.13, точечный источник CXOUGC J174652.9–282607 [18, Рисунок 1]. Также были учтены точечные источники рентгеновского излучения, обнаруженные орбитальным телескопом *NuSTAR* во время рентгеновского обзора ГЦ [87, Таблица 5] с максимальным удалением на $11,4'$ от положения Стрельца Б2, определённого обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* для временного интервала $T2$ (см. Раздел 1.1.5). На Рисунке 1.9 показано расположение источников, зарегистрированных телескопом *NuSTAR*, на карте обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, построенной в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ. Потоки каждого

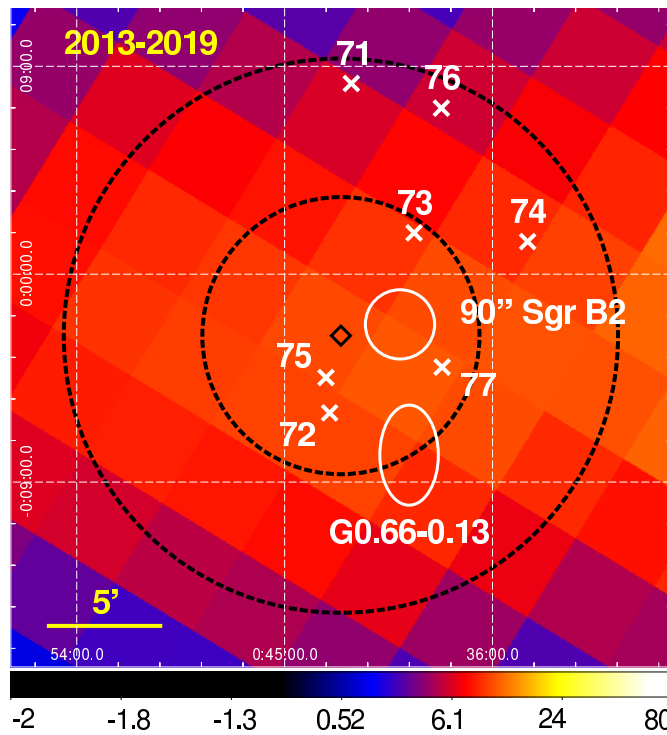


Рисунок 1.9 — Увеличенная часть изображения Стрельца Б2, построенного за временной интервал T_2 (Рисунок 1.6). Чёрные пунктирные окружности с радиусами $R = 6' - 12'$, центрированные на положении Стрельца Б2, которое было определено по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* за период T_2 (отмечено ромбиком), демонстрируют примерную область, из которой собиралось излучение Стрельца Б2. Сплошная окружность и эллипс — центральная область с $R = 90''$ Стрельца Б2 и структура G0.66–0.13 из работы Жанг и др. [18] соответственно. Точечные источники, указанные в работе Хонга и др. [87], отмечены крестиками.

Координатная сетка соответствует галактическим координатам.

источника телескопа *NuSTAR* были пересчитаны для энергетического диапазона телескопа *IBIS* 25–50 кэВ и просуммированы для получения полного потока $\sim 3,4 \cdot 10^{-12}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, что оказалось примерно в 2 раза меньше потока $F_{25-50 \text{ кэВ}} = (7,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-12}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, измеренного обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Таким образом, можно заключить, что интегральный поток от известных источников рентгеновского излучения составляет не более половины наблюдаемого обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* излучения Стрельца Б2 после 2011 г.

1.1.7 Заключение

Благодаря регулярным наблюдениям космической обсерватории *ИНТЕГРАЛ* области ГЦ появилась уникальная возможность проследить многолетнюю эволюцию рентгеновского излучения молекулярного облака Стрелец Б2 на энергиях выше 17 кэВ, которое обычно связывают с отражённым рентгеновским излучением прошлой вспышечной активности Стрельца A^* от вещества облака.

В данной работе были построены карты области ГЦ, усреднённые за каждый год наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в 2003–2019 гг., подтверждающие ослабление рентгеновского континуума источника IGR J17475–2822, совпадающего с молекулярным облаком Стрелец Б2. Карты неба после 2011 г. демонстрируют значимое излучение в области Стрельца Б2. Была построена кривая блеска Стрельца Б2 для временного интервала с 2003 по 2019 гг. и было обнаружено, что она лучше описывается кусочно-линейной функцией, чем простой линейной. Процедура аппроксимации кусочно-линейной функцией показала, что в 2011 ± 3 г. наблюдался переход кривой блеска потока Стрельца Б2 в диапазоне 30–80 кэВ из затухающей в постоянную. Наличие излома во временной эволюции Стрельца Б2 может свидетельствовать об изменении механизма формирования излучения. Однако нельзя полностью исключить возможность того, что вся кривая блеска согласуется с линейным затуханием, связанным со сценарием отражения.

Спектральный анализ показал, что не наблюдаются значимые отличия в форме спектров до и после ~ 2011 г. Оба спектра хорошо согласуются с моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на высоких энергиях ~ 43 кэВ. Также оба спектра поддерживают сценарий отражения рентгеновской вспышки с $\Gamma \sim 2,3$. Требуемая светимость первичного источника была оценена на уровне $L_{10-20 \text{ кэВ}} \sim 6 \cdot 10^{38}$ эрг с^{-1} для излучения Стрельца Б2, наблюдаемого до 2011 г. Затухающее излучение, наблюдавшееся до 2011 г., хорошо объясняется сценарием отражения рентгеновской вспышки со светимостью $L_{10-20 \text{ кэВ}} \sim 3 \cdot 10^{38}$ эрг с^{-1} , тогда как природа остаточного излучения до сих пор не ясна.

Модель низкоэнергетических протонов КЛ с наклоном их первичного спектра $s = 2,7 \pm 0,5$ хорошо описывает спектр 2011–2019 гг., но оценка скорости ионизации КЛ $\zeta_{\text{H}} \sim 5,6 \cdot 10^{-14}$ $\text{H}^{-1} \text{с}^{-1}$ оказалась на порядок выше, чем значение, полученное для ГЦ $\zeta_{\text{H}} \sim (1 - 3) \cdot 10^{-15}$ $\text{H}^{-1} \text{с}^{-1}$ [85]. Поэтому маловероят-

но, что этот сценарий объясняет излучение, наблюдаемое после 2011 г. Часть этого излучения может быть результатом комбинации неразрешённых точечных источников. Известные источники, зарегистрированные орбитальным телескопом *NuSTAR*, могут объяснить лишь около 50 % наблюдаемого обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* потока в 25–50 кэВ и не доминируют в потоке Стрельца Б2 за временной интервал 2011–2019 гг. Другая значительная часть остаточного излучения Стрельца Б2 может быть вызвана многократными рассеяниями в случае сценария отражения. Необходимы дальнейшие наблюдения для детального изучения молекулярного облака Стрелец Б2 на низких и высоких энергиях рентгеновского диапазона, чтобы определить природу излучения Стрельца Б2 и проследить его дальнейшую эволюцию.

1.2 Молекулярное облако звёздного скопления Арки

Скопление Арки [88; 89] — массивное звёздное скопление, расположенное в центре Галактики на проекционном угловом расстоянии $11'$ (28 пк) от Стрельца A^* . Это скопление содержит более 160 звёзд типа O с начальными массами выше $20M_{\odot}$. Его плотность достигает $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$ [90; 91]. Радиус ядра скопления составляет $9''$ ($\sim 0,35$ пк на расстоянии 8 кпк) [90].

Помимо теплового излучения, исходящего от самого звёздного скопления, в его окрестности наблюдается протяжённое рентгеновское излучение, имеющее нетепловую природу и ассоциированное с ближайшим молекулярным облаком, возможные изменения которого и представляют научный интерес.

1.2.1 Введение

Впервые область скопления Арки была исследована в рентгеновском диапазоне благодаря наблюдениям обсерватории Чандра [92], в результате чего было обнаружено яркое излучение скопления. В узкой области, совпадающей с положением скопления Арки (ядром скопления), было зарегистрировано сильное тепловое излучение, характеризующееся наличием линии излучения горячего железа на энергии 6,7 кэВ. Такое тепловое излучение звёздного скопления связано с множественными столкновениями сильных ветров массивных звёзд [92–94]. Помимо теплового излучения из узкой области ядра скопления, было обнаружено и протяжённое нетепловое излучение, пространственно совпадающее с близким молекулярным облаком (далее «облако Арки»). На нетепловую природу этого излучения указывают наблюдающиеся линия излучения нейтрального железа $\text{Fe } K_{\alpha}$ 6,4 кэВ и степенной континуум [12; 20; 21; 93; 95–97].

Существуют две основные гипотезы, объясняющие нетепловое излучение облака Арки: отражение рентгеновской вспышки и взаимодействие с LECR [12]. Первая гипотеза предполагает облучение молекулярного облака внешним рентгеновским источником, которым может служить близко расположенный к скоплению источник. Рентгеновской светимостью, достаточной для формирования наблюдаемого потока в линии железа 6,4 кэВ [12; 97], обладают близкий

источник 1E1740.7–2942 [98] и возможная вспышка на СМЧД Стрелец A^* , произошедшая в прошлом, как было предсказано Сюняевым и др. [6] для объяснения уровня флуоресцентной линии излучения, обнаруженной в гигантском молекулярном облаке Стрелец Б2 в области ГЦ [18; 19; 33–35; 99]. Кроме того, обнаружение затухающего рентгеновского континуума и флуоресцентной линии Fe K_α 6,4 кэВ от Стрельца Б2 может являться следствием покидания облака световым фронтом рентгеновской вспышки (см. Раздел 1.1 и [9; 18; 19; 41; 66; 67]). Предположение о вспышечной активности Стрельца A^* также подтверждается обнаружением следов распространения по облакам ЦМЗ фронта, излучающего в линии Fe K_α 6,4 кэВ, где СМЧД является предполагаемым источником первичного излучения [7; 8; 38; 100–102].

В течение первых десяти лет наблюдений скопления Арки поток нетеплового излучения облака оставался примерно на одном уровне, что рассматривалось как указание на возможный подогрев облака КЛ (модель LECR, [12]). Однако, Клавель и др. [20] зарегистрировали уменьшение потока нетеплового излучения в континууме и в линии железа Fe K_α 6,4 кэВ, что противоречит гипотезе LECR (см., например, [14]).

Используя наблюдения облака Арки в 2015 г. обсерватории *XMM-Ньютон* и телескопа *NuSTAR*, Кривонос и др. [21] показали, что помимо уменьшения потока нетеплового излучения, также произошло уменьшение эквивалентной ширины линии излучения Fe K_α 6,4 кэВ. Такое поведение может указывать на изменение геометрии отражения (облучение разных частей облака вдоль луча зрения) или на то, что компонента излучения, вызванная взаимодействием вещества облака с КЛ, стала более значимой. Тем не менее, остается открытым вопрос, достигнут ли нетепловой континуум и линия железа 6,4 кэВ нулевого уровня потока, когда излучающий фронт покинет молекулярное облако, или станет видимым фоновое излучение, обусловленное LECR.

Как обсуждалось выше, переменная составляющая нетеплового излучения скопления Арки формируется в результате томсоновского рассеяния фотонов рентгеновской вспышки, покидающих молекулярное облако. Чернышов и др. [39] предположили, что другая (возможно, стационарная) составляющая может быть вызвана: 1) томсоновским рассеянием фотонов от той же или другой рентгеновской вспышки; 2) другим комплексом молекулярных облаков, расположенным на большом расстоянии от скопления Арки, но на том же луче зрения; 3) возбуждением частицами КЛ с некоторыми дополнительными ограничениями. Авторы

утверждают, что для единого комплекса молекулярных облаков изменения эквивалентной ширины могут быть связаны с изменением содержания железа в облаке при продвижении вспышки. Для второго случая с двумя разными комплексами молекулярных облаков Чернышов и др. [39] рассчитали временную задержку комптоновского излучения, вызванного вспышкой СМЧД, для первой переменной компоненты излучения примерно в 100 лет. Это согласуется с результатом Чуразова и др. [101], которые оценили возраст рентгеновской вспышки в 110 лет. Для второй переменной компоненты время задержки было оценено около 230 лет [39]. Более вероятно, что эти две компоненты были вызваны разными вспышками, а не одной и той же. Предположение о двух разных вспышках согласуется со сценарием двух вспышек Стрельца A^* 110 и 240 лет назад [9; 37; 38; 40].

Изменения в морфологии облака скопления Арки аналогичны изменениям, наблюдаемым для молекулярного облака Стрелец Б2, где нетепловое излучение, вероятно, достигло фонового уровня, выявляя детальную структуру двух компактных ядер и нового возникшего облака, что подтверждает распространение одного или нескольких освещающих фронтов рентгеновской вспышки Стрельца A^* [18, см. также Раздел 1.1]. Эти сходства между излучением облака скопления Арки и облаков ГЦ [21] подтверждают механизм отражения нетеплового излучения.

В этом разделе были проанализированы наблюдения области скопления Арки с помощью космического телескопа *NuSTAR* и обсерватории *XMM-Ньютон*, проведённые для исследования изменений нетеплового излучения вокруг скопления в 2015–2016 гг. Кроме того, был проведён детальный спектральный анализ отдельных областей излучения, обнаруженных по наблюдениям обсерватории *XMM-Ньютон* [20]. Все результаты, представленные в этом разделе опубликованы в работе Кузнецовой и др. [68].

1.2.2 Наблюдения и обработка данных

Наблюдения звёздного скопления Арки были проведены в октябре 2016 г. рентгеновским телескопом *NuSTAR* с полным временем экспозиции 150 кс.

Рентгеновский телескоп *NuSTAR* [103], запущенный на орбиту в 2012 г., предоставляет возможность получения изображений неба в рентгеновском диа-

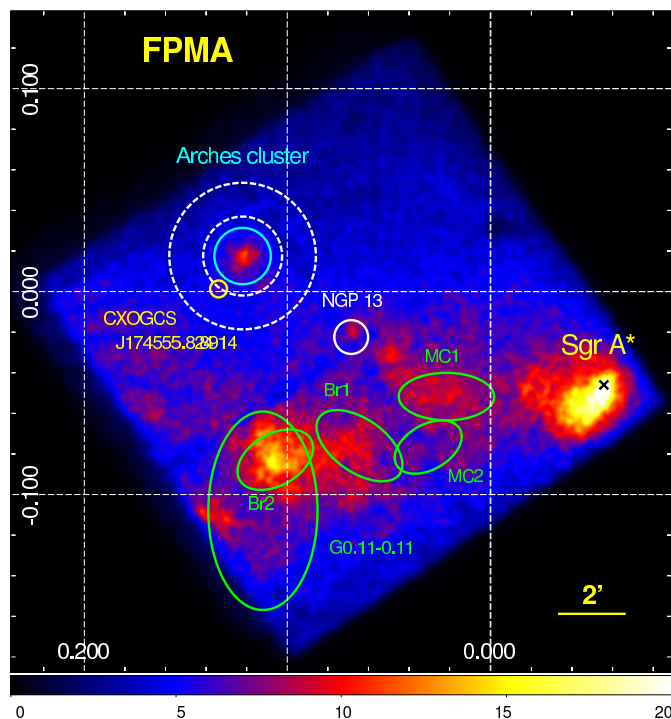


Рисунок 1.10 — Изображение в галактических координатах области молекулярных облаков Стрелец А, включающей в себя скопление Арки, полученное по данным 2016 г. модуля *FPMA* телескопа *NuSTAR* в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ с экспозицией 150 кс. Области извлечения спектров источника и фона представлены кругом с радиусом $R = 50''$ и кольцом ($70'' < R < 130''$) соответственно. Молекулярные облака Стрелец А обозначены сплошными эллиптическими областями [38]. Надпись «NGP 13» демонстрирует положение рентгеновского источника, зарегистрированного телескопом *NuSTAR* в ходе обзора области ГЦ [87]. Маленькая сплошная окружность с надписью «CXOGCS J174555.8–284914» отмечает положение соответствующего источника (Раздел 1.2.4). Положение СМЧД Стрелец А* отмечено крестиком. Данное изображение было сглажено с использованием утилиты *dmimgadapt* программного обеспечения CIAO-v.4.9 со следующими параметрами: ядро «tophat», масштаб сглаживания 1–20, количество масштабов — 30, минимальное число отсчетов — 20.

пазоне с угловым разрешением в несколько долей угловой минуты. Космический телескоп *NuSTAR* представляет собой два идентичных сонаправленных рентгеновских телескопических модуля, названных *FPMA* и *FPMB*, чья ФРТИ обладает FWHM, равной $18''$. Оба модуля оперируют в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ и обладают спектральным разрешением 400 эВ (FWHM) на 10 кэВ.

Таблица 3 — Список наблюдений скопления Арки, использованных в данной работе. ObsID — индивидуальный номер наблюдения.

Обсерватория	ObsID	Начало наблюдений	Экспозиция, с
<i>XMM-Ньютон</i>	0762250301	2015-09-27 15:48:39	114000
<i>NuSTAR</i>	40101001002	2015-10-19 06:21:08	107189
	40101001004	2015-10-25 13:56:08	107856
	40202001002	2016-10-28 13:16:08	150856

В связи с известной проблемой боковой засветки [104], при которой детекторы могут быть засвечены рентгеновскими лучами, пришедшими из внешней области относительно поля зрения, данные с модуля *FPMB* были значительно испорчены фотонами от яркого рентгеновского источника GX 3+1, из-за чего было принято решение исключить данные этого модуля из анализа. Рисунок 1.10 демонстрирует изображение области скопления Арки, полученное модулем *FPA* в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ. Скопление Арки оказалось смещенным относительно оптической оси на $4'$, что приводит к некоторому понижению эффективности, однако значимых искажений ФРТИ не наблюдается.

Стоит отметить, что небесные координаты каждого фотона, зарегистрированного телескопом *NuSTAR*, подвержены систематическому смещению, которое может достигать $14''$ [70]. В процессе работы было обнаружено смещение между положением центроида скопления и его каталогизированными координатами на уровне $3'' - 4''$. В соответствии с работой Кривоноса и др. [21] была проведена астрометрическая коррекция путём сдвига координат каждого фотона с использованием опорного положения центроида ядра скопления Арки, которое было измерено при первом наблюдении этой области телескопом *NuSTAR* в 2012 г. [97], когда смещение было незначительным.

Спектр молекулярного облака и звёздного скопления Арки (далее «комплекса Арки») был извлечен с помощью утилиты `purproducts` программного обеспечения *NuSTAR* Data Analysis Software (NUSTARDAS v.1.8.0), являющегося частью программного обеспечения HEASOFT (версия 6.20). В качестве области извлечения спектра источника был выбран круг с радиусом $50''$, центрированный на положении звёздного скопления $RA = 17^h45^m50^s.52$,

$Dec. = -28^{\circ}49'22''.4$ [21; 97]. Кольцо с внутренним и внешним радиусами, равными $70''$ и $130''$ соответственно (см. Рисунок 1.10), за исключением области вокруг источника CXOGCS J174555.8–284914 с радиусом $R = 15''$ (см. Раздел 1.2.4), использовалось для извлечения спектра фона. Спектральный и пространственный методы исследования были проведены с помощью пакетов XSPEC [63] и Sherpa [105], включенных в программные обеспечения HEASOFT и CIAO-v.4.9 [106] соответственно. Стоит отметить, что статистические неопределённости для спектральных параметров указаны для доверительного интервала $2,7\sigma$, в то время как параметры пространственной аппроксимации указаны с 1σ ошибками.

В состав обсерватории *XMM-Ньютон* входят три рентгеновских зеркальных телескопа, каждому из которых соответствует свой детектор. Эти детекторы (*MOS1*, *MOS2* и *PN*) объединены в общую конфигурацию European Photon Imaging Camera (*EPIC*) и оперируют на энергиях до ~ 10 кэВ [107; 108]. Обработка данных обсерватории *XMM-Ньютон* (детекторы *MOS1*, *MOS2* и *PN*) проводилась с использованием программного обеспечения XMM-Newton Extended Source Analysis Software (ESAS, [109]), являющегося частью программного обеспечения XMM-Newton Science Analysis Software (SAS) версии 14. Сведения об используемом наблюдении приведены в Таблице 3. Чтобы получить калиброванные списки событий и вычистить интервалы времени, загрязнённые вспышками, использовались стандартные программы *emchain*, *epchain* и программы ESAS *mos-filter*, *pn-filter* соответственно. Спектры извлекались из чистых списков событий программы ESAS *mos-spectra*, *pn-spectra*. Кроме того, проводилась чистка данных от фона частиц высоких энергий (quiescent particle background), взаимодействующих со структурами, окружающими детекторы, и самими детекторами. Для этого использовались закрытые списки событий колеса фильтров, предоставленные базой данных ESAS, которые были нормированы на уровень фона частиц высоких энергий, соответствующий выбранному наблюдению, с помощью утилит ESAS *mos-back* и *pn-back*. В результате были получены спектры, которые были сгруппированы таким образом, чтобы в каждом бине было не менее 30 отсчётов. Области извлечения спектров представлены далее в тексте.

1.2.3 Наблюдения скопления Арки телескопом *NuSTAR* в 2016 г.

Поскольку скопление Арки продемонстрировало сильное уменьшение своего нетеплового излучения в 2007–2015 гг. [20; 21], можно было бы ожидать дальнейшее затухание даже ниже порога обнаружения. Главный вопрос, который рассматривается в этом разделе, заключается в том, наблюдается ли ещё вокруг звёздного скопления Арки протяжённое излучение, ранее обнаруженное с помощью телескопа *NuSTAR* в 2012–2015 гг. [21; 97], и изменились ли спектральные параметры этого излучения по сравнению с 2015 г.

Пространственный анализ изображения

Угловое разрешение телескопа *NuSTAR*, равное $18''$ (FWHM), не позволяет напрямую разрешить излучение вокруг ядра скопления и излучение самого звёздного скопления, которое для телескопа *NuSTAR* является точечным источником. Для оценки пространственного уширения излучения вокруг скопления по сравнению с ожидаемым от ФРТИ телескопа *NuSTAR* был использован простой анализ двумерных изображений при помощи программного пакета Sherpa. Данный пакет позволяет провести пространственную аппроксимацию данных изображения, используя исходную двумерную модель, свёрнутую с инструментальной ФРТИ.

Вначале были проанализированы данные наблюдений области скопления Арки, проведённые орбитальным телескопом *NuSTAR* в 2016 г. в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ, с использованием модели двумерной функции Гаусса $G1$ с фиксированным значением FWHM (эффект размытия ФРТИ), равным $4''$, и свободным параметром центрального положения. Такая модель соответствует морфологии излучения от источника, подобного точечному. Полная запись используемой модели в нотации пакета Sherpa выглядит следующим образом $psf(gauss2d.G1) * map + const2d.bkg * map$, где psf проводит свёртку с ФРТИ телескопа *NuSTAR*, $G1$ — это двумерная функция Гаусса, ассоциируемая с излучением звёздного скопления, map содержит карту экспозиции, компонента $const2d.bkg$ оценивает фоновую скорость счёта в предположении плоского распределения. Как показано на Рисунке 1.10, область применения модели огра-

ничена круговым регионом с $R = 50''$ с центром в положении центроида скопления Арки, а фоновая скорость счёта оценивалась в кольце с $70'' < R < 130''$ и тем же центральным положением, исключая круговую область с $R = 15''$ рентгеновского источника CXOGCS J174555.8–284914 (см. раздел 1.2.4). Разница между изображением в диапазоне 3–79 кэВ и наилучшей моделью показала сильные отклонения, что говорит о том, что рентгеновское излучение скопления Арки не согласуется с излучением рентгеновского источника, подобного точечному [93; 110]. Чтобы количественно оценить пространственный масштаб уширенного излучения вокруг скопления Арки была добавлена ещё одна двумерная функция Гаусса $G2$ со свободными параметрами положения центра и FWHM. Список свободных параметров новой сложной модели включает в себя положение центра $G1$, положение центра и ширину $G2$ и уровень плоского фона. Расширенная модель показала хорошее соответствие с данными, что характеризуется отсутствием сильных отклонений в невязках модели и хорошей статистикой аппроксимации $\chi_{\text{red}}^2 \approx 1$. В результате был оценён пространственный масштаб протяжённого излучения $G2$ на значении $32'' \pm 7''$ (FWHM), что значительно превышает значение ФРТИ телескопа *NuSTAR* ($18''$ FWHM). Этот результат указывает, что в 2016 г. протяжённое излучение всё ещё присутствует вокруг скопления Арки. Положение уширенной компоненты $G2$ смещено на $13'' \pm 3''$ относительно положения ядра скопления Арки ($G1$), что также указывает на присутствие уширенного излучения, не ассоциирующегося со звёздным скоплением.

Спектральный анализ

Как было показано в предыдущем разделе, протяжённое излучение, ассоциированное с нетепловым излучением нейтрального или слабо ионизованного вещества молекулярного облака всё ещё присутствует вокруг звёздного скопления. Для количественной оценки, был проведён спектральный анализ наблюдений телескопа *NuSTAR* в 2016 г., результаты которого сравнивались с предыдущими результатами работы Кривоноса и др. [21], основанной на данных телескопа *NuSTAR* и обсерватории *ХММ-Ньютон*, полученных в 2015 г.

Спектры источника и фона для наблюдения скопления Арки телескопом *NuSTAR* в 2016 г. извлекались из круговой и кольцевой областей с $R = 50''$ и

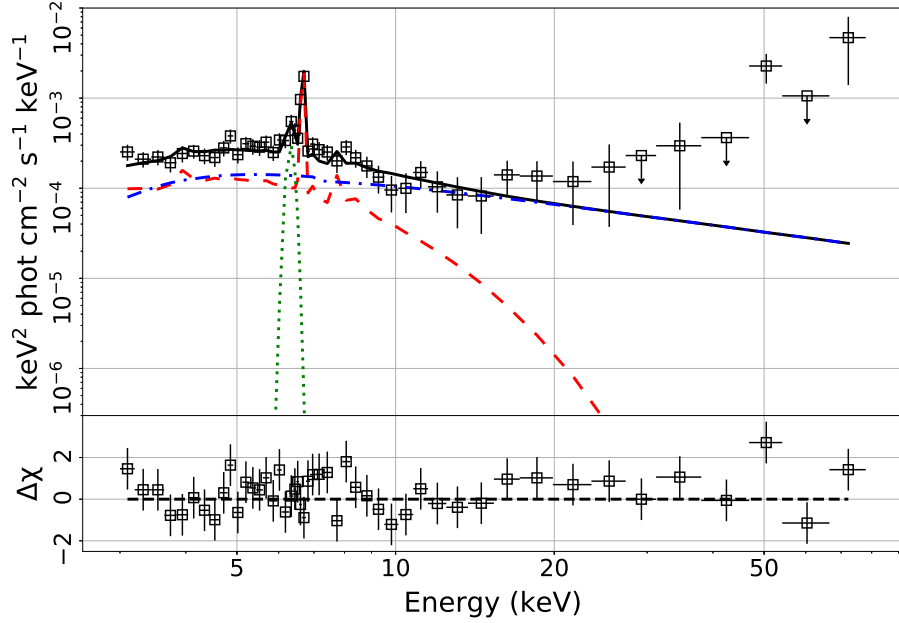


Рисунок 1.11 — Спектр скопления Арки по данным модуля *FPMA* телескопа *NuSTAR* в 2016 г., извлечённый из кругового региона $R = 50''$ с центром в положении ядра скопления. Сплошной, штриховой, пунктирной и штрихпунктирной линиями обозначены следующие компоненты спектральной модели (см. Таблицу 4): полная, тепловая *APEC*, $\text{Fe } K_\alpha$ 6,4 кэВ и нетепловая степенная соответственно.

$70'' < R < 130''$ соответственно, как описано в Разделе 1.2.2. Спектр по данным модуля *FPMA* с вычтенным фоном области скопления Арки представлен на Рисунке 1.11. Для аппроксимации спектра применялась спектральная модель $wabs \times (APEC + Gaussian + power - law)$, которая использовалась в работе Кривоноса и др. [21]. Эта модель содержит тепловое излучение звёздного скопления, описываемое моделью излучения столкновительно-ионизованной плазмы (*APEC*), нетепловое излучение молекулярного облака в виде степенного закона (*power - law*) и линию излучения $\text{Fe } K_\alpha$ 6,4 кэВ, описываемую одномерной функцией Гаусса (*Gaussian*). Тепловое излучение характеризуется параметрами kT , Z/Z_\odot и $I_{\text{КТ}}$, описывающими соответственно температуру в кэВ, металличность по отношению к солнечной и нормировку в единицах $10^{-18} \int n_e n_H dV / (4\pi D^2)$, где n_e и n_H — концентрации электронов и протонов в единицах см^{-3} , а D — расстояние до скопления, выраженное в см. Металличность была зафиксирована на значении $Z = 1,7Z_\odot$ в соответствии с работой Татищева и др. [12]. Нетепловое излучение было аппроксимировано степенным континуумом и линией $\text{Fe } K_\alpha$ 6,4 кэВ, описы-

ваемой функцией Гаусса с шириной, фиксированной на 0,1 кэВ. Все компоненты излучения были скорректированы на межзвёздное фотоэлектронное поглощение N_{H} , представленное моделью *wabs* в XSPEC. В связи с ограниченным энергетическим откликом телескопа *NuSTAR* на энергиях ниже 5 кэВ аппроксимация не позволяет достаточно хорошо оценить поглощение, из-за чего этот параметр был зафиксирован на значении $N_{\text{H}} = 9,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ [12]. Эквивалентная ширина линии Fe K_{α} 6,4 кэВ $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$ была оценена с использованием пакета *Sherpa* по отношению к компоненте *power – law*. Процедура аппроксимации, демонстрирующая сильную корреляцию между компонентами модели, вызывает вырождение модельных параметров: температуры плазмы kT и фотонного индекса степенного закона Γ . Чтобы избежать этого, при последующем анализе температура *APEC* была зафиксирована на значении 2,4 кэВ, которое было измерено Кривоносом и др. [21] по данным телескопа *NuSTAR* 2015 г. Параметры модели наилучшей аппроксимации приведены в Таблице 4. Для сравнения с наблюдениями телескопа *NuSTAR* в 2015 г. в таблицу были включены наиболее подходящие параметры из работы Кривоноса и др. [21], определённые для такой же модели.

Спектральный анализ наблюдений телескопом *NuSTAR* комплекса скопления Арки в 2015 и 2016 гг. не показывают значимых изменений ни теплового излучения, исходящего от самого скопления, ни нетеплового, окружающего скопление. Главные параметры нетеплового излучения — наклон степенного закона, его нормировка и эквивалентная ширина линии железа 6,4 кэВ, полученные для разных наблюдений, согласуются в пределах неопределённостей. Таким образом, чтобы подтвердить или опровергнуть выход нетеплового излучения облака Арки на постоянный уровень, необходимы дальнейшие наблюдения комплекса Арки.

1.2.4 Комбинированный набор данных телескопа *NuSTAR* 2015–2016 гг. и обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г.

В предположении, что с 2015 г. не произошло значимых изменений ни морфологии протяжённого излучения скопления Арки, ни его спектра (см. предыдущий параграф), был проведён совместный анализ данных 2015 и 2016 гг., чтобы лучше ограничить параметры этого излучения.

Таблица 4 — Параметры модели наилучшей аппроксимации спектров комплекса Арки, измеренных с помощью телескопа *NuSTAR* в 2015 [21] и 2016 гг. (эта работа). Модель: $wabs \times (APEC + Gaussian + power - law)$

Параметр	Единицы измерения	2015 г.	2016 г.	2015–2016 гг.
N_H	10^{22} см^{-2}	9,5 (фикс.)	9,5 (фикс.)	9,5 (фикс.)
kT	кэВ	$2,4^{+1,5}_{-0,4}$	2,4 (фикс.)	2,4 (фикс.)
I_{kT}	см. Раздел 1.2.3	$9,2 \pm 5,3$	$8,4^{+2,1}_{-4,4}$	$9,1^{+1,2}_{-1,4}$
$\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	0,1 (фикс.)	0,1 (фикс.)	0,1 (фикс.)
$E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	$6,3 \pm 1,1$	$6,3 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,1$
$F_{6,4 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$2,6 \pm 1,5$	$2,5^{+3,1}_{-1,7}$	$2,4 \pm 1,2$
$EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	эВ	450 ± 150	580 ± 250	540 ± 140
Γ		$2,4^{+0,6}_{-0,3}$	$2,7^{+0,4}_{-0,5}$	$2,6 \pm 0,2$
$F_{3-20 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$	$10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$5,6^{+1,2}_{-0,9}$	$4,4^{+2,1}_{-3,1}$	$5,8 \pm 0,8$
$\chi_{\text{red}}^2/\text{d.o.f.}$		0,97/364	0,82/204	0,91/574

Двумерный пространственный анализ

Наблюдения телескопа *NuSTAR*, проведённые с 2015 по 2016 гг., были объединены в один набор данных, в результате чего были построены суммарные изображения в трёх энергетических диапазонах: 3–79, 3–10 и 10–20 кэВ (см. Рисунок 1.12). На изображении, полученном для полного энергетического диапазона телескопа *NuSTAR* от 3 до 79 кэВ, хорошо заметны структуры как звёздного скопления, так и протяжённого излучения. Распределение поверхностной яркости скопления Арки в диапазоне 3–10 кэВ доминировано звёздным скоплением, в то время как изображение в жёстком рентгеновском диапазоне 10–20 кэВ демонстрирует распределение нетеплового излучения вокруг скопления Арки.

Для полученных изображений комплекса Арки был проведён пространственный анализ, описанный в Разделе 1.2.3, чтобы лучше определить свойства протяжённого излучения. Наилучшая модель и невязки аппроксимации для изображения в диапазоне энергий 3–79 кэВ показаны на Рисунке 1.13. Изображение с невязками показывает мелкомасштабные флуктуации с амплитудой на порядок меньшей, чем у исходного суммарного изображения телескопа *NuSTAR* 3–79 кэВ. Положения флуктуаций невязок модели пространственно согласуются с яркими областями излучения облака Арки на энергии 6,4 кэВ, описанными

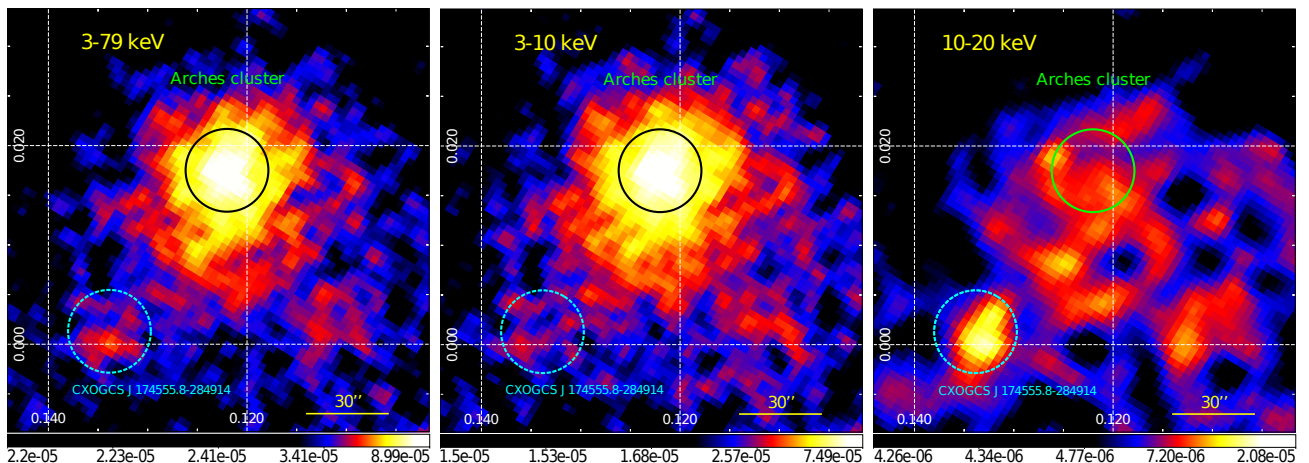


Рисунок 1.12 — Суммарные изображения области скопления Арки по данным орбитального телескопа *NuSTAR* 2015–2016 гг., построенные в энергетических диапазонах 3–79 кэВ (слева), 3–10 кэВ (по центру) и 10–20 кэВ (справа). Все изображения скорректированы на экспозицию и адаптивно сглажены с помощью утилиты *dmimgadapt* программного обеспечения CIAO-v.4.9 с ядром «*tophat*», параметры которого указаны в подписи к Рисунку 1.10. Сетка небесных координат демонстрирует галактические координаты, выраженные в градусах. Сплошная окружность с радиусом $15''$ обозначает положение звёздного скопления Арки. Положение жёсткого рентгеновского точечного источника CXOGCS J174555.8–284914 показано пунктирной окружностью с радиусом $15''$.

в Разделе 1.2.5. Стоит отметить, что модель $G1$ была исключена из процедуры аппроксимации в диапазоне 10–20 кэВ из-за незначительного вклада теплового излучения звёздного скопления на энергиях выше 10 кэВ. Параметры наилучшей аппроксимации модели показаны в Таблице 5. Во всех трёх энергетических диапазонах пространственный размер компоненты $G2$ больше, чем ФРТИ телескопа *NuSTAR*, что подтверждает наличие протяжённого излучения вокруг скопления выше 10 кэВ. Было проверено, что положения центроида протяжённой компоненты $G2$ на энергиях 3–10 и 10–20 кэВ согласуются друг с другом в пределах доверительного интервала 3σ , что указывает на одну и ту же протяжённую компоненту, обнаруженную на низких и высоких энергиях соответственно.

Стоит отметить, что компонента $G2$ более широкая в энергетическом диапазоне 10–20 кэВ, чем в 3–10 кэВ (Таблица 5). Главным образом, это обусловлено низкой статистикой нетеплового излучения Арки на энергиях выше 10 кэВ и флуктуациями изображения, возможно, связанными с систематическими неопределённостями. Для оценки систематических неопределённостей была проанализирована область изображения в энергетическом диапазоне 10–20 кэВ, которая

Таблица 5 — Параметры наилучшей пространственной аппроксимации с 1σ ошибками центральной области ($R = 50''$) скопления Арки для энергетических диапазонов 3–79, 3–10 и 10–20 кэВ по данным 2015–2016 гг.

Параметр	3–79 кэВ	3–10 кэВ	10–20 кэВ
Ядро (Двумерная функция Гаусса, $G1$)			
RA центра (J2000)	17:45:50,52	17:45:50,54	—
Dec. центра (J2000)	-28:49:22,4	-28:49:22,4	—
FWHM	4'' (фикс.)	4'' (фикс.)	—
Нормировка (10^{-3})	$3,7 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,5$	—
Облако (Двумерная функция Гаусса, $G2$)			
RA центра (J2000)	17:45:51,47	17:45:51,35	17:45:52,05
Dec. центра (J2000)	-28:49:30,8	-28:49:29,7	-28:49:31,7
FWHM	$41''9 \pm 3''5$	$37''5 \pm 3''5$	$61''0^{+14,1}_{-10,0}$
Нормировка (10^{-6})	$63,8 \pm 11,8$	$67,0 \pm 15,2$	$6,1^{+1,7}_{-1,3}$

свободна от источников излучения, в результате чего было обнаружено, что относительные нестатистические флуктуации могут достигать $\sim 15\%$.

Рисунок 1.12 также выявил превышение излучения, которое локализовано на $\sim 1'$ восточнее скопления, что хорошо заметно на изображениях, полученных в полном 3–79 кэВ и жёстком 10–20 кэВ диапазонах энергий. Положение его центроида $RA = 17^{\text{h}}45^{\text{m}}56^{\text{s}}0$, $Dec. = -28^{\circ}49'16''$ согласуется в пределах 3σ неопределённости с положением рентгеновского источника CXOGCS J174555.8–284914 [92; 110], согласно астрономической базе данных SIMBAD [111]. Этот источник, также обозначенный «A4» в [92], сильно поглощён ($N_{\text{H}} \sim 4 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$) и имеет жёсткий степенной спектр с пиком около линии Fe K_{α} 6,4 кэВ [110]. Чтобы избежать возможного вклада излучения от этого источника в оценку фоновой скорости счёта, круговой регион с $R = 15''$, центрированный на положение CXOGCS J174555.8–284914, был исключён из пространственного и спектрального анализа.

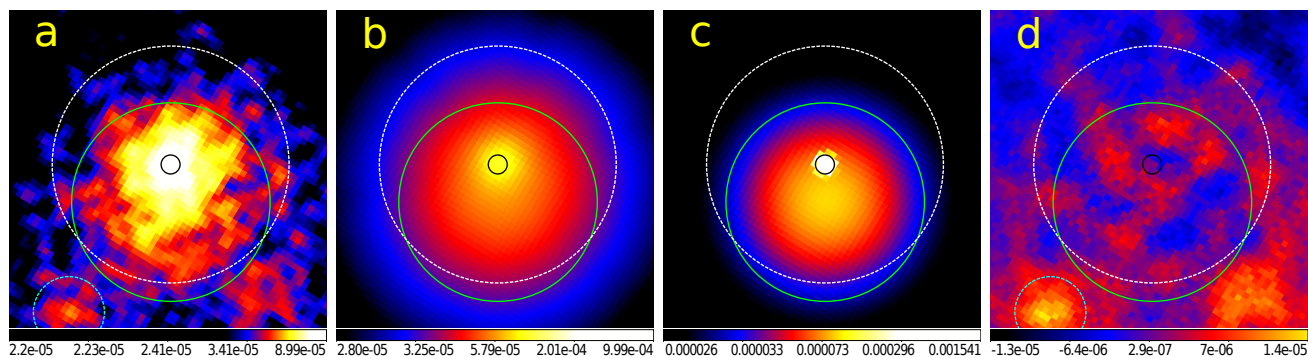


Рисунок 1.13 — Пример пространственной аппроксимации суммарного изображения скопления Арки. Малая и большая сплошные окружности — компоненты $G1$ и $G2$ наилучшей модели с двумя функциями Гаусса, параметры которых перечислены в Таблице 5 соответственно. Область, в которой проводилась аппроксимация, представляет собой круг с радиусом $R = 50''$ (отмечен большой пунктирной окружностью) с исключённым кругом $R = 15''$, содержащим излучение источника CXOGCS J174555.8–284914 (малая пунктирная окружность). а) Суммарное изображение в диапазоне 3–79 кэВ по данным телескопа *NuSTAR*. б) Наилучшая пространственная модель комплекса скопления Арки, полученная для энергий 3–79 кэВ с двумя двумерными функциями Гаусса $G1$ и $G2$, свёрнутыми с ФРТИ телескопа *NuSTAR*. в) То же, что и на изображении б), но не свёрнутое с ФРТИ. г) Невязки, оставшиеся после вычитания модели, сглаженные с ядром «tophat» ($R = 3$ пикселя).

Спектральный анализ

Для лучшей оценки параметров спектральной модели наборы данных наблюдений, проведённых орбитальным телескопом *NuSTAR* в 2015 и 2016 гг., были аппроксимированы совместно. В последней колонке Таблицы 4 показаны результаты аппроксимации с той же моделью, что использовалась в Разделе 1.2.3. На Рисунке 1.14 представлена модель наилучшей совместной аппроксимации спектров. Наилучшие параметры такой аппроксимации согласуются с результатами спектрального анализа индивидуальных наблюдений телескопа *NuSTAR* в 2015 и 2016 гг. Совместная аппроксимация спектров 2015 и 2016 гг. позволила улучшить точность определения параметров спектральной модели.

Чтобы расширить спектральный анализ до низких энергий и определить полную плотность колонки поглощения на луче зрения N_H , был также добавлен спектр, полученный по данным наблюдения обсерватории *ХММ-Ньютон*, про-

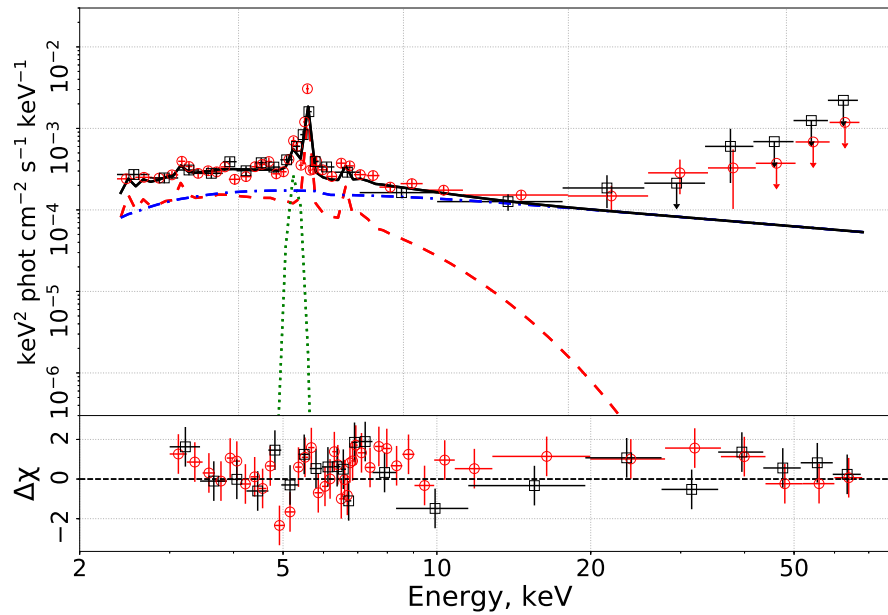


Рисунок 1.14 — Совместный спектр области скопления Арки по данным 2015–2016 гг. телескопа *NuSTAR*. Данные, полученные за 2015 и 2016 гг., отмечены кружками и квадратами соответственно. Полная модель обозначена сплошной линией. Штриховой, пунктирной и штрих-пунктирной линиями показаны следующие компоненты модели: тепловое излучение плазмы, линия излучения $\text{Fe } K_\alpha$ 6,4 кэВ (ширина фиксирована на 0,1 кэВ) и степенной континуум соответственно.

ведённого в 2015 г. (Таблица 3, Раздел 1.2.2). Этот спектр был извлечён из той же круговой области с радиусом $50''$ и центром на положении звёздного скопления [21]. Широкополосный спектр области скопления Арки, комбинированный из данных обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г. и телескопа *NuSTAR* 2015–2016 гг., представлен на Рисунке 1.15. Параметры наилучшей аппроксимации с освобождённым параметром поглощения перечислены в Таблице 6. Величина поглощения N_{H} была определена на значениях $(9,3 \pm 0,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что согласуется с $N_{\text{H}} = (9,5 \pm 0,3) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, измеренным Татищевым и др. [12]. Совместная аппроксимация позволила сделать более надёжное измерение степенного закона $\Gamma = 2,21 \pm 0,15$ на энергиях до 30–40 кэВ, которое согласуется в пределах 1σ неопределённости с измерением $\Gamma = 2,03 \pm 0,16$, полученным Кривоносом и др. [21].

Для описания нетеплового континуума комплекса Арки в комбинированном спектре по данным обсерватории *XMM-Ньютон* и телескопа *NuSTAR* 2015 г. дополнительно к простому степенному закону Кривонос и др. [21] также приме-

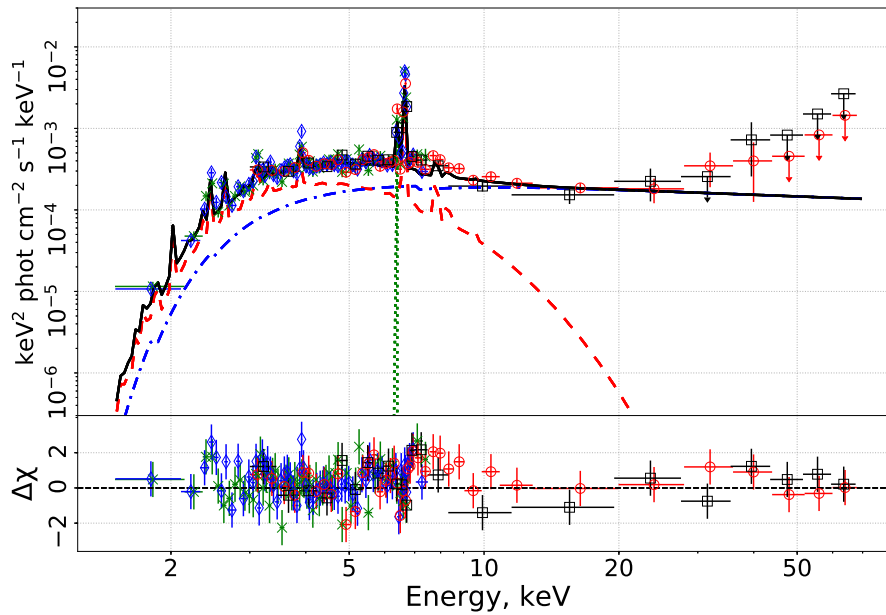


Рисунок 1.15 — Совместный спектр комплекса Арки по данным обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г. и телескопа *NuSTAR* 2015–2016 гг., извлеченный из круговой области с радиусом $R = 50''$ и центром в положении звёздного скопления. Крестиками и ромбиками обозначены данные детекторов *MOS1/MOS2* и *PN* обсерватории *XMM-Ньютон* соответственно. Кружочки и квадратики демонстрируют данные 2015 и 2016 гг. телескопа модуля *FPMA* телескопа *NuSTAR* соответственно. Спектральная модель наилучшей аппроксимации (сплошная линия, Таблица 6) включает в себя излучение тепловой плазмы (штриховая), флуоресцентную линию $\text{Fe } K_{\alpha}$ 6,4 кэВ (пунктирная) с фиксированной шириной, равной 0,01 кэВ, и степенной континуум (штрих-пунктирная).

няли модель излучения, вызванного взаимодействием вещества молекулярного облака с КЛ, которая была разработана Татищевым и др. [12], и самосогласованную модель рентгеновского отражения REFLIONX [112]. Добавление спектра, полученного по наблюдению телескопа *NuSTAR* в 2016 г., к комбинированному набору данных 2015 г. обсерватории *XMM-Ньютон* и телескопа *NuSTAR* при аппроксимации позволило лучше ограничить параметры этих моделей. Однако эти улучшения недостаточно значимы, чтобы подтвердить или опровергнуть любую из моделей. Для простоты список наилучших параметров для этих физически мотивированных моделей не приводится.

Таблица 6 — Параметры наилучшей аппроксимации спектра комплекса Арки (круговая область с $R = 50''$), извлечённого из наблюдений обсерватории *XMM-Ньютон* и телескопа *NuSTAR* в 2015 и 2015–2016 гг. соответственно. Для сравнения в таблице приведены параметры наилучшей аппроксимации для спектра 2015 г. по данным *NuSTAR+XMM-Ньютон* [21]. Модель: $wabs \times (APEC + Gaussian + power - law)$. C — параметр кросс-нормировки между данными обсерватории *XMM-Ньютон* и телескопа *NuSTAR*. Для данных обсерватории *XMM-Ньютон* C зафиксирован на единице.

Параметр	Единицы измерения	2015 г.	2015+2016 гг.
N_H	10^{-22} см^{-2}	$9,3_{-0,5}^{+0,9}$	$9,3 \pm 0,5$
kT	кэВ	$1,95 \pm 0,14$	$1,95_{-0,12}^{+0,16}$
$I_{кТ}$	см. Раздел 1.2.3	18 ± 3	17 ± 3
$\Delta E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	0,01 (фикс.)	0,01 (фикс.)
$E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	$6,38 \pm 0,02$	$6,38 \pm 0,03$
$F_{6,4 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$3,1 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$
$EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	эВ	700_{-90}^{+100}	660 ± 80
Γ		$2,03 \pm 0,16$	$2,21 \pm 0,15$
I_{pow}	$10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$	22_{-7}^{+10}	33_{-9}^{+13}
C		$0,82 \pm 0,04$	$0,69 \pm 0,04$
$\chi^2/\text{d.o.f.}$		1,00/918	0,97/1167

1.2.5 Спектральный анализ отдельных областей облака скопления Арки по данным обсерватории *XMM-Ньютон*

Широкополосный спектральный анализ нетеплового излучения комплекса Арки по данным телескопа *NuSTAR* был проведён в широком круговом регионе, покрывающим как молекулярное облако, так и звёздное скопление, что описано в Разделах 1.2.3 и 1.2.4. В других исследованиях, главным образом основанных на наблюдениях обсерваторией *XMM-Ньютон*, используется эллиптическая область, из которой исключено излучение звёздного скопления [12; 20; 21]. Таким образом, область извлечения спектра часто включает всё нетепловое излучение комплекса Арки, которое характеризуется регулярной и протяжённой формой и сопровождается линией излучения железа на энергии 6,4 кэВ [12]. Необходимо отметить, что интегрирование сигнала в большом регионе может усреднить

излучение, имеющее какие-то мелкомасштабные особенности и/или отличающееся происхождение [38]. Меньший эллипс, который использовался в предыдущем анализе данных обсерватории *XMM-Ньютон*, может быть всё ещё слишком большим, чтобы детально исследовать изменения эквивалентной ширины. Чтобы избежать усреднения по большому региону, был проведён новый анализ отдельных частей облака, выявленных по излучению в линии 6,4 кэВ по данным обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г.

Таблица 7 — Определения эллиптических областей неба, выбранных для спектрального анализа комплекса Арки.

Область	RA (J2000)	Dec. (J2000)	Параметры	Площадь, угл. сек. ²
S	17:45:52,92	-28:50:21,3	26'', 44'', 130°	3556
N	17:45:49,24	-28:48:54,7	20'', 33'', 169°	1437 ¹
E	17:45:52,82	-28:49:25,4	13'', 22'', 162°	906
Скопление (исключенная)	17:45:50,47	-28:49:15,7	16'', 29'', 177°	

¹) Площадь эллипса области N указана с вычтенным эллипсом, содержащим излучение звёздного скопления.

В результате анализа данных обсерватории *XMM-Ньютон* (Раздел 1.2.2) были получены спектры, извлечённые из трёх областей, обозначенных S, N и E (см. Рисунок 1.16), в диапазоне 2,0–7,5 кэВ из эллиптических регионов, параметры которых приведены в Таблице 7. Используемые регионы показаны на Рисунке 1.16. Из области N был исключён эллиптический регион, содержащий яркое излучение ядра скопления Арки в линии 6,7 кэВ. Полученные спектры областей Арки представлены на Рисунке 1.17. Каждый спектр был аппроксимирован моделью $XSPEC\ wabs \times (APEC + Gaussian^{2,45\text{ кэВ}} + (power - law) + Gaussian^{6,4\text{ кэВ}})$, что согласуется с предыдущим исследованием нетеплового излучения Арки с помощью обсерватории *XMM-Ньютон* [20]. Спектральная модель включает тепловое излучение астрофизической плазмы *APEC* с $kT = 2,2$ кэВ (выбранное для имитации комбинации компонентов плазмы с температурами 1 и 7 кэВ центра Галактики [20]), нетепловой степенной континуум с фиксированным фотонным индексом $\Gamma = 1,6$ и непоглощённую линию излучения Fe K_{α} 6,4 кэВ с фиксированной шириной 0,01 кэВ. Также была добавлена поглощённая гауссова линия на энергии 2,45 кэВ, предположительно принадлежащая K_{α} линии излучения от He-подобной серы (S). Коэффициент фотоэлектронного поглощения подбирался

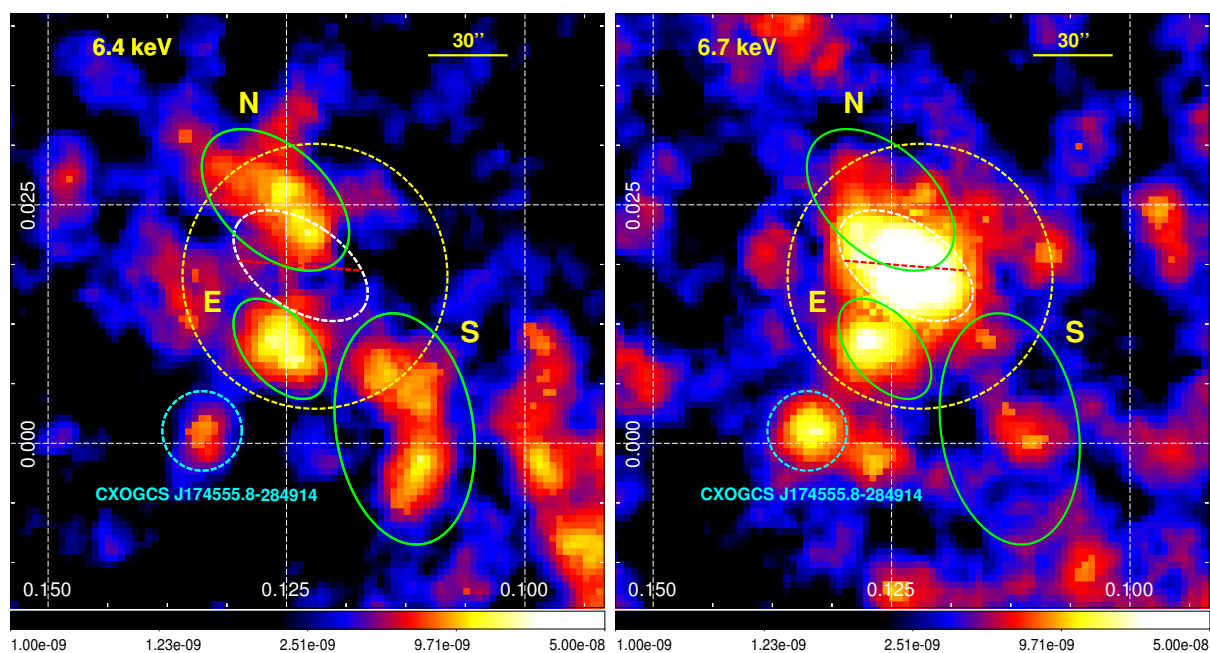


Рисунок 1.16 — Суммарные изображения, построенные в линиях 6,4 (слева) и 6,7 кэВ (справа) в энергетических диапазонах 6,32–6,48 и 6,62–6,78 кэВ соответственно [68]. Данные карты (с вычтенным фоном) представлены в галактических координатах. Сплошные эллипсы демонстрируют регионы извлечения спектров отдельных областей скопления Арки. Излучение ядра скопления, хорошо заметное в линии 6,7 кэВ, показано пунктирным эллипсом. Малая пунктирная окружность ($R = 15''$) обозначает положение жёсткого рентгеновского источника CXOGCS J174555.8–284914 [92; 110]. Большая пунктирная окружность ($R = 50''$) показывает область излучения спектра для нетеплового излучения скопления Арки (см. Раздел 1.2.2). Все изображения адаптивно сглажены с использованием утилиты `dmimgadapt` программного обеспечения CIAO-v.4.9 со следующими параметрами: ядро «tophat», масштабы сглаживания 0,1–5,0, количество масштабов — 10, минимальное число отсчётов — 20.

индивидуально для каждой исследуемой области Арки. Эквивалентная ширина гауссовых линий вычислялась относительно степенной составляющей без учёта поглощения. Результаты процедуры аппроксимации приведены в Таблице 8.

Спектральные свойства областей N и E близки, в том числе $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$, что свидетельствует об одинаковом происхождении излучения этих частей облака. Область S имеет наибольшие потоки в линии 6,4 кэВ и в континууме. Однако её значение эквивалентной ширины линии железа на энергии 6,4 кэВ $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$ ($570 \pm 50 \text{ эВ}$) меньше, чем у областей N и E ($980 \pm 170 \text{ эВ}$ и $830 \pm 200 \text{ эВ}$ соответственно). С другой стороны, область S имеет наибольший размер по сравнению

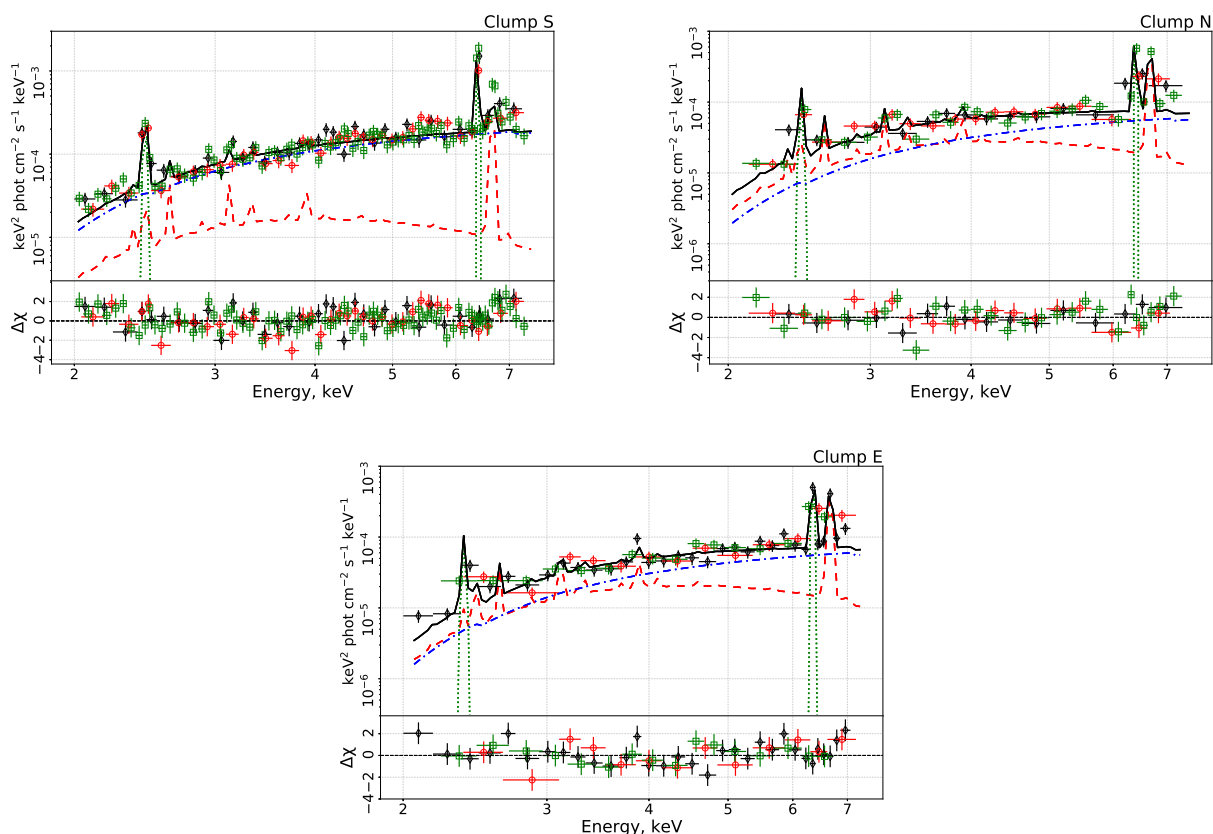


Рисунок 1.17 — Спектры отдельных областей излучения молекулярного облака в окрестности скопления Арки, полученные по данным обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г. Ромбиками, кружками и квадратиками обозначены данные детекторов обсерватории *XMM-Ньютон* *MOS1*, *MOS2* и *PN* соответственно. Спектры были извлечены в энергетическом диапазоне 2,0–7,5 кэВ для всех областей, за исключением области Е, для которой был выбран энергетический диапазон 2,0–7,3 кэВ в виду недостаточной статистики. Сплошная линия демонстрирует наилучшую спектральную модель ($wabs \times (APEC + Gaussian^{2,45 \text{ кэВ}} + power - law) + Gaussian^{6,4 \text{ кэВ}}$) со следующими компонентами: тепловой плазмы (штриховая), линий излучения серы 2,45 кэВ и железа 6,4 кэВ (пунктирные), нетеплового степенного континуума (штрих-пунктирная).

с остальными. Для оценки поверхностной яркости наблюдаемый поток каждой области, измеренный в энергетическом диапазоне 2,0–7,5 кэВ, был поделён на соответствующую площадь извлечения спектра источника, как указано в Таблице 8. Оказалось, что область Е имеет самое большое значение поверхностной яркости по сравнению с областями N и S, чьи значения согласуются друг с другом.

Таблица 8 — Параметры модели наилучшей аппроксимации спектров трёх нетепловых областей Арки, измеренные с помощью обсерватории *XMM-Ньютон* в 2015 г. Модель: $wabs \times (APEC + Gaussian^{2,45 \text{ кэВ}} + power - law) + Gaussian^{6,4 \text{ кэВ}}$.

Параметр ¹⁾	Единицы измерения	Область S	Область N	Область E
N_H	10^{22} см^{-2}	$5,5 \pm 0,5$	$7,2 \pm 1,0$	$8,2 \pm 1,1$
I_{kT}	см. Раздел 1.2.3	$0,9 \pm 0,5$	$1,7 \pm 0,6$	$1,3 \pm 0,5$
$E_{2,5 \text{ кэВ}}$	кэВ	$2,45 \pm 0,01$	$2,46 \pm 0,03$	$2,37^{+0,07}_{-0,05}$
$N_{2,5 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$5,3^{+1,8}_{-1,5}$	$4,3^{+3,0}_{-2,1}$	$4,9^{+4,0}_{-2,8}$
$EW_{2,5 \text{ кэВ}}$	эВ	260 ± 40	710 ± 150	1500 ± 400
$E_{6,4 \text{ кэВ}}$	кэВ	$6,39 \pm 0,02$	$6,39 \pm 0,03$	$6,35 \pm 0,03$
$N_{6,4 \text{ кэВ}}$	$10^{-6} \text{ фот. см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$2,6 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$
$EW_{6,4 \text{ кэВ}}$	эВ	570 ± 50	980 ± 170	830 ± 200
$N_{\text{на кэВ}}^{\text{pow}}$	$10^{-5} \text{ фот кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$9,1 \pm 0,8$	$2,9 \pm 0,7$	$3,0 \pm 0,6$
$F_{2,0-7,5 \text{ кэВ}}^{\text{кэВ}}$	$10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$3,35 \pm 0,28$	$1,08^{+0,25}_{-0,27}$	$1,30 \pm 0,22$
$S_{2,0-7,5 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$	$10^{-17} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ угл. сек.}^{-2}$	$9,4 \pm 0,8$	$7,5^{+1,7}_{-1,9}$	$14,3 \pm 2,4$
C		$1,02 \pm 0,05$	$0,72 \pm 0,06$	$1,1 \pm 0,1$
$\chi^2/d.o.f.$		1,33/151	1,18/54	1,07/53

1) $S_{2,0-7,5 \text{ кэВ}}^{\text{pow}}$ — поток в энергетическом диапазоне 2,0–7,5 кэВ, отнесённый к площади соответствующей области. C — параметр кросс-нормировки между данными *MOS1/MOS2* и *PN*. $N_{\text{на кэВ}}^{\text{pow}}$ — нормировка степенного закона на 1 кэВ.

1.2.6 Заключение

В данном разделе диссертации были представлены результаты длительных (150 кс) наблюдений комплекса Арки, проведённых в 2016 г. орбитальным телескопом *NuSTAR*. Комплекс Арки включает в себя звёздное скопление с ярким тепловым ($kT \sim 2 \text{ кэВ}$) рентгеновским излучением и близлежащее молекулярное облако, чьё излучение характеризуется протяжённым нетепловым рентгеновским континуумом и флуоресцентной линией $\text{Fe } K_{\alpha}$ 6,4 кэВ. Недавние наблюдения орбитальных телескопа *NuSTAR* и обсерватории *XMM-Ньютон* за нетепловым излучением Арки продемонстрировали резкое изменение как его морфологии, так и его интенсивности. Чтобы пролить свет на происхождение нетеплового излучения такого низкого уровня интенсивности, необходимы непрерывные наблюдения за комплексом Арки.

Из-за быстрого уменьшения потока нетеплового излучения, наблюдавшегося с 2007 по 2015 гг. [21], ожидалось, что в 2016 г. излучение может оказаться ниже уровня регистрации телескопом *NuSTAR*. Однако наблюдения в 2016 г. телескопом *NuSTAR* показали, что вокруг звёздного скопления Арки по-прежнему присутствует протяжённое излучение, что было продемонстрировано спектральным и пространственным анализом. При этом поток излучения, измеренный в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ в 2016 г., остался на том же уровне, что и в 2015 г., без существенного изменения формы спектра. Общее снижение $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$ с $\sim 0,9$ кэВ (2002–2015 гг.) до 0,6 – 0,7 кэВ (2015 г.) подтверждено результатом 2016 г. $EW_{6,4 \text{ кэВ}} = 580 \pm 250$ кэВ. Эти результаты могут свидетельствовать о том, что интенсивность нетеплового излучения комплекса Арки достигла своего постоянного уровня. Однако, стоит отметить, что годичного интервала между наблюдениями может оказаться недостаточно, чтобы зарегистрировать значимое изменение потока. Это следует из того факта, что измеренный в 2016 г. поток нетеплового излучения $F_{3-20 \text{ кэВ}} = 4,4_{-3,1}^{+2,1} \cdot 10^{-13}$ эрг см⁻² с⁻¹ (Таблица 4) не противоречит не только потоку, измеренному в 2015 г., но и потоку $F_{3-20 \text{ кэВ}} = 5,2_{-0,9}^{+1,1} \cdot 10^{-13}$ эрг см⁻² с⁻¹, предсказанному для 2016 г. по линейному затуханию, наблюдавшемуся в 2007–2015 гг. [21]. Таким образом, нельзя сделать однозначный вывод о том, вышло ли нетепловое излучение на стационарный уровень в 2016 г., и необходимы новые наблюдения, разделённые более длительным периодом времени.

Чтобы лучше ограничить спектральные свойства комплекса Арки в этом состоянии, был построен его широкополосный спектр по наблюдениям телескопа *NuSTAR* в 2015–2016 гг. и обсерватории *XMM-Ньютон* в 2015 г. с общими временами экспозиции 350 кс и 114 кс соответственно. Совместная аппроксимация позволила надёжно измерить степенной спектр до 30–40 кэВ с фотонным индексом $\Gamma = 2,21 \pm 0,15$, который оказался в согласии с предыдущим результатом $\Gamma = 2,03 \pm 0,16$, измеренным в работе Кривоноса и др. [21] в 2015 г. с тем же набором данных обсерватории *XMM-Ньютон*.

Двумерный пространственный анализ наблюдений телескопа *NuSTAR* показал, что морфология нетеплового излучения в 2016 г. по-прежнему связана с молекулярным облаком и не согласуется с возможным излучением звёздного скопления.

Также был проведён спектральный анализ трёх ярких областей излучения молекулярного облака Арки в линии Fe K_{α} 6,4 кэВ, основанный на наблюдениях

обсерватории *XMM-Ньютон* 2015 г. Анализ показал отличающиеся значения эквивалентной ширины линии Fe K_α $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$ для областей S (570 ± 50 эВ) и N, E (~ 900 эВ). Область S также демонстрирует более слабое межзвёздное поглощение по сравнению с двумя другими областями. Это открытие подтверждает, что рентгеновское излучение молекулярного облака представляет собой комбинацию двух компонент разного происхождения. Различные эквивалентные ширины линии железа K_α также могут быть вызваны различной геометрией отражения областей. Чернышов и др. [39] сценарий двух вспышек Стрельца A^* указали предпочтительным, что согласуется с различными значениями $EW_{6,4 \text{ кэВ}}$, обнаруженными в этой работе. Это также согласуется с исследованиями других молекулярных облаков в ЦМЗ, которые предполагают наличие двух вспышек Стрельца A^* [9; 38; 40]. Необходимы дальнейшие регулярные наблюдения за комплексом Арки, чтобы проследить продолжающуюся эволюцию областей, ярких в линии нейтрального железа 6,4 кэВ, и подтвердить (или опровергнуть) достижение нетепловым излучением молекулярного комплекса Арки его постоянного уровня.

Глава 2. Детальное исследование остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 по данным обсерваторий ХММ-Ньютон и ИНТЕГРАЛ

Остатки сверхновых являются хорошо известными ускорителями КЛ [113, например]. Исследования рентгеновского излучения остатков вспышек сверхновых необходимы для построения полной картины ускорения КЛ на оболочках сверхновых. RX J1713.7–3946, также известный как G347.3–0.5 [114], является одним из наиболее изученных молодых остатков вспышек сверхновой с оболочкой. Однако, несмотря на большое количество исследовательских работ, рентгеновское излучение RX J1713.7–3946 на энергиях выше 10 кэВ всё ещё слабо изучено. Данный раздел посвящён результатам наблюдений RX J1713.7–3946 обсерваторией ИНТЕГРАЛ на энергиях от 17 кэВ.

2.1 Введение

RX J1713.7–3946 был обнаружен в созвездии Скорпиона во время обзора всего неба обсерваторией ROSAT в мягком рентгеновском излучении (All Sky Survey in soft X-rays, [115]). В энергетическом диапазоне 0,5–2,4 кэВ остаток сверхновой RX J1713.7–3946 представляет собой источник со слегка эллиптической формой с максимальным угловым размером около 70'. Основываясь на наблюдениях обсерватории Чандра, Утияма и др. [116] обнаружили у RX J1713.7–3946 яркие нитевидные структуры. В западной части RX J1713.7–3946 была также обнаружена структура двойной оболочки с усиленным поглощением вдоль края [117], что вероятно, связано с соседними молекулярными облаками [117–120]. RX J1713.7–3946 расположен в центральной части Галактики и удалён от СМЧД Стрелец A* на $\sim 13^\circ$ в проекции. Расстояние до RX J1713.7–3946 оценивается примерно в 1 кпк на основании наблюдений распределения молекулярного газа [120; 121]. Такое расположение, скорее всего, совпадает с исторической сверхновой SN 393, возраст которой составляет около 1600 лет [122].

RX J1713.7–3946 — яркий источник в рентгеновском и гамма-диапазонах. Излучение из внутренней области обладает слабой тепловой компонентой с линиями излучения Ne Ly α и Mg Ne α , предположительно относящимися к обратной

ударной волне сверхновой [123]. В рентгеновском излучении RX J1713.7–3946 в областях оболочки преобладает синхротронное излучение электронов [114; 124], ускоренных на ударной волне остатка вспышки сверхновой до нескольких ТэВ [125].

Рентгеновский синхротронный спектр в мягком энергетическом диапазоне 0,7–7,0 кэВ хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом $1,8 < \Gamma < 3,0$ и поглощением $N_H = (0,4 - 1,3) \cdot 10^{22} \text{ см}^2$, варьирующимися в пределах выбранной области остатка вспышки сверхновой [126]. Аналогичные результаты были получены с помощью космической обсерватории *XMM-Ньютон* [127] и рентгеновского спектрометра *X-ray Imaging Spectrometer* (XIS) обсерватории *Suzaku* [128; 129]. RX J1713.7–3946 был зарегистрирован детектором жёсткого рентгеновского излучения (*Hard X-ray Detector, HXD*) космической обсерватории *Suzaku* на энергиях до 40 кэВ со степенным спектром с $\Gamma \sim 3$, который оказался более крутым, чем спектр, измеренный на энергиях ниже ~ 10 кэВ [129].

Гамма-излучение остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 впервые было обнаружено с помощью черенковских телескопов *CANGAROO* [130; 131]. Дальнейшие наблюдения RX J1713.7–3946 в гамма-диапазоне проводились с помощью телескопов *High Energy Stereoscopic System* (*высокоэнергетическая стереоскопическая система, H.E.S.S.*) [132–134]. На основе данных *H.E.S.S.* была получена оценка фотонного индекса $\Gamma \sim 2$ в диапазоне энергий 0,2–30,0 ТэВ [127; 135]. В некоторых областях остаток вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 имеет большие размеры в гамма-диапазоне, чем в рентгеновском, т. е. его гамма-излучение радиально простирается дальше рентгеновского излучения оболочки. Это можно интерпретировать как покидание частицами очень высоких энергий области ускорения на ударной волне, что является признаком диффузионного ускорения частиц [135].

Несмотря на большое количество рентгеновских обсерваторий до сих пор нет подробной информации о морфологии и спектре RX J1713.7–3946 на энергиях выше ~ 10 кэВ. В рамках обзора всего неба Кривонос и др. [61] сообщили о первой регистрации излучения RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ с помощью телескопа с кодирующей маской *IBIS*, установленного на борту гамма-обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Также было показано, что изображение RX J1713.7–3946 в диапазоне 17–60 кэВ демонстрирует явную протяжённую структуру, пространственно согласующуюся с морфологией мягкого рентгеновского излучения, полученной *ROSAT* в диапазоне энергий 0,5–2,4 кэВ. Позже

Такахаши и др. [128] представили рентгеновский спектр юго-западной части RX J1713.7–3946, измеренный с помощью телескопа *HXD* обсерватории *Suzaku*, который не имеет возможности построения изображений. Тем не менее, полное поле зрения *HXD* размером $25' \times 25'$ покрывает только часть RX J1713.7–3946, а спектральный анализ требует нетривиального моделирования астрофизического фона. Из-за большой протяжённости (около $\sim 70'$) RX J1713.7–3946 также является сложной целью для телескопа *NuSTAR* [103], который фокусирует рентгеновское излучение в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ и имеет поле зрения $13' \times 13'$. Цудзи и др. [136] представили первое прямое рентгеновское изображение северо-западного края RX J1713.7–3946 на энергиях выше 10 кэВ, полученное с помощью орбитального телескопа *NuSTAR*. Однако, полное исследование всего остатка сверхновой с помощью телескопа *NuSTAR* сильно ограничено ввиду загрязнения фотонами боковой засветки [104].

Учитывая описанные выше сложности наблюдения RX J1713.7–3946 в рентгеновском диапазоне от 10 кэВ, обсерватория *ИНТЕГРАЛ* обеспечивает разумный компромисс между размером источника ($\sim 70'$) и угловым разрешением телескопа *IBIS* ($12'$ FWHM). Небольшое проекционное расстояние между RX J1713.7–3946 и центром Галактики (13°), в направлении на который было проведено много наблюдений обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, позволило накопить большое количество экспозиции. В диссертации представлено первое детальное исследование морфологии и спектра RX J1713.7–3946 по данным телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* с увеличенным временем экспозиции со времён первого наблюдения этого источника обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* [61]. Результаты, полученные в данной главе, описаны в статье Кузнецовой и др. [137].

2.2 Наблюдения и обработка данных

Данное исследование основано на наблюдениях, которые были проведены с декабря 2002 г. по март 2017 г., с помощью телескопа с кодирующей апертурой *IBIS* [43] гамма-обсерватории *ИНТЕГРАЛ* [44]. Обработка данных проводилась в соответствии с процедурой, описанной в работах Чуразова и др. [52] и Кривоноса и др. [53], что позволило получить изображения неба области RX J1713.7–3946 в

следующих жёстких энергетических диапазонах: 17–27, 27–36, 36–50, 50–120 и 17–60 кэВ (также см. Раздел 1.1.2).

Чтобы расширить пространственный и спектральный анализ RX J1713.7–3946 до стандартного рентгеновского диапазона 1–10 кэВ, который далее будет упоминаться как мягкий рентгеновский диапазон, также были использованы все доступные данные обсерватории *XMM-Ньютон* (см. Раздел 1.2.2) с полным (эффективным) временем экспозиции 711 кс (549 кс), полученные с детекторов *EPIC/MOS* за период с 2001 по 2017 гг. Список наблюдений приведён в Таблице 9. В соответствии с процедурой обработки данных, описанной в работе Чуразова и др. [138], в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ были получены изображения всего остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 с вычтенным фоном и выполненной коррекцией на виньетирование и экспозицию. Стоит отметить, что статистические ошибки, определённые во время пространственного и спектрального анализа, указаны на уровнях доверительных интервалов 68 % (1σ) и 90 % ($2,7\sigma$) соответственно.

Таблица 9 — Список использованных наблюдений обсерватории *XMM-Ньютон*.

ObsID	Дата и время начала наблюдения	Полная экспозиция, кс	Эффективная экспозиция, кс
0093670101	2001-09-05 02:27:41	15,0	3,1
0093670201	2001-09-05 07:21:05	15,0	10,4
0093670301	2001-09-07 23:55:07	16,2	15,4
0093670401	2002-03-14 15:52:41	13,7	12,8
0093670501	2001-03-02 17:39:37	14,8	13,5
0203470401	2004-03-25 08:02:28	16,9	16,5
0203470501	2004-03-25 13:35:49	16,9	15,2
0207300201	2004-02-22 14:15:54	34,2	16,8
0502080101	2007-09-15 03:41:24	34,9	19,5
0502080201	2007-09-03 06:27:15	25,4	2,9
0502080301	2007-10-03 04:53:43	25,1	5,7
0551030101	2008-09-27 16:44:57	24,9	23,6
0722190101	2013-08-24 20:48:23	138,9	128,8
0740830201	2014-03-02 07:25:30	140,8	105,7
0743030101	2015-03-10 21:36:40	83,9	74,3
0804300801	2017-08-30 16:32:02	47,8	45,0
0804300901	2017-08-29 15:10:48	47,0	39,5

2.3 Рентгеновская морфология RX J1713.7–3946

Изображение RX J1713.7–3946, построенное по данным телескопа *IBIS/ISGRI* в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ, представлено на Рисунке 2.1. На изображении RX J1713.7–3946 выделяются две области яркого рентгеновского излучения, обозначенные буквами «А» и «В» и зарегистрированные на уровнях значимости $8,7\sigma$ и $9,3\sigma$ соответственно, что примерно в два раза выше значимости регистрации, которая была достигнута ранее [61]. Статистическая значимость всего протяжённого излучения больше 18σ . Улучшение в чувствительности согласуется с увеличением экспозиции наблюдений этой области телескопом *IBIS* с 5,3 Мс [61] до ~ 24 Мс [53] в течение 10 лет. Центроиды областей излучения А и В были определены на координатах $RA = 17^{\text{h}}11^{\text{m}}45^{\text{s}}.6$, $Dec. = -39^{\circ}32'35''$ и $RA = 17^{\text{h}}12^{\text{m}}11^{\text{s}}.2$, $Dec. = -39^{\circ}56'27''$ соответственно. Ошибка локализации точечных рентгеновских источников, зарегистрированных телескопом *IBIS/ISGRI*, зависит от уровня значимости регистрации [139]. Значимость регистрации излучения из областей А и В оценивается на уровне около 10σ для каждой, что соответствует доверительному интервалу (на уровне 68 %) положения центроида $1',5$ [61] при условии, что протяжённость этих областей не очень велика.

На Рисунке 2.2 представлено детальное изображение RX J1713.7–3946, полученное по данным обсерватории *ХММ-Ньютон* в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ. Как видно из изображения, положения областей излучения А и В, зарегистрированных обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*, совпадают с ярчайшими на энергиях 1–10 кэВ частями северо-западного и юго-западного краёв остатка вспышки сверхновой соответственно. Рисунок 2.3 демонстрирует изображения RX J1713.7–3946 по данным телескопа *IBIS/ISGRI* в энергетических диапазонах 17–27, 27–36, 36–50 и 50–120 кэВ. Структура оболочки остатка вспышки сверхновой хорошо видна на самых низких энергиях телескопа *IBIS/ISGRI* 17–27 кэВ. Эта структура также заметна на высоких энергиях почти до 50 кэВ. Излучение из области А выглядит слабее излучения области В в энергетическом диапазоне 27–36 кэВ. Такой эффект может быть результатом статистических флуктуаций или артефактом метода восстановления изображения слабого источника, расположенного в густонаселённой области [50], из-за чего в ней может быть повышенный уровень шума. На более высоких энергиях 50–120 кэВ изобра-

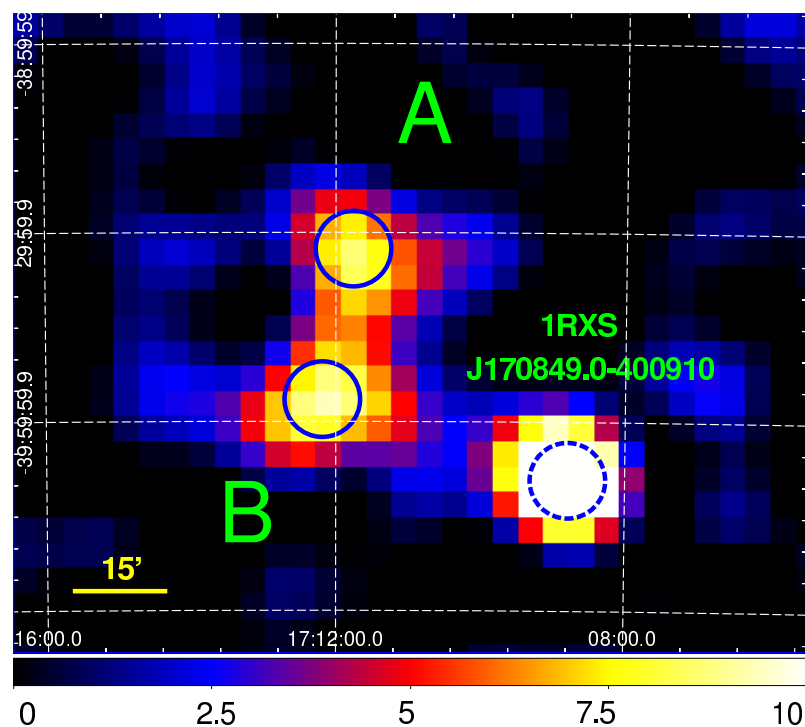


Рисунок 2.1 — Изображение RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ, построенное по данным телескопа *IBIS/ISGRI*. Данное изображение свёрнуто с двумерной функцией Гаусса с шириной $\sigma = 5'$, соответствующей инструментальной ФРТИ телескопа *IBIS/ISGRI*. Изображение построено в единицах отношения сигнал/шум, где цвет карты соответствует величине этого отношения от 0 до 10. На изображение нанесена координатная сетка, соответствующая экваториальной системе координат (J2000). Две яркие области жёсткого рентгеновского излучения RX J1713.7–3946, отмеченные буквами «А» и «В», расположены на северо-западном и юго-западном краях RX J1713.7–3946 соответственно. Центры синих сплошных окружностей с радиусом $R = 6'$ (радиус соответствует половине разрешающей способности телескопа *IBIS/ISGRI*) расположены на тех же координатах, что и центроиды, определенные для излучения из областей А и В (Раздел 2.3). Синяя пунктирная окружность с таким же радиусом показывает положение рентгеновского источника 1RXS J170849.0–400910.

жение RX J1713.7–3946 доминировано шумом, хотя в области оболочки остатка вспышки сверхновой присутствует положительный сигнал с низкой значимостью.

Рентгеновское изображение RX J1713.7–3946 по данным телескопа *IBIS/ISGRI* также содержит яркий рентгеновский источник с потоком в $1,10 \pm 0,05$ мКраб¹ (17–60 кэВ), удалённый от области В примерно на 41' в юго-

¹1 мКраб в диапазоне 17–60 кэВ соответствует потоку $1,43 \cdot 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ для источника со спектром, похожим на спектр Крабовидной туманности (Раздел 1.1.2)

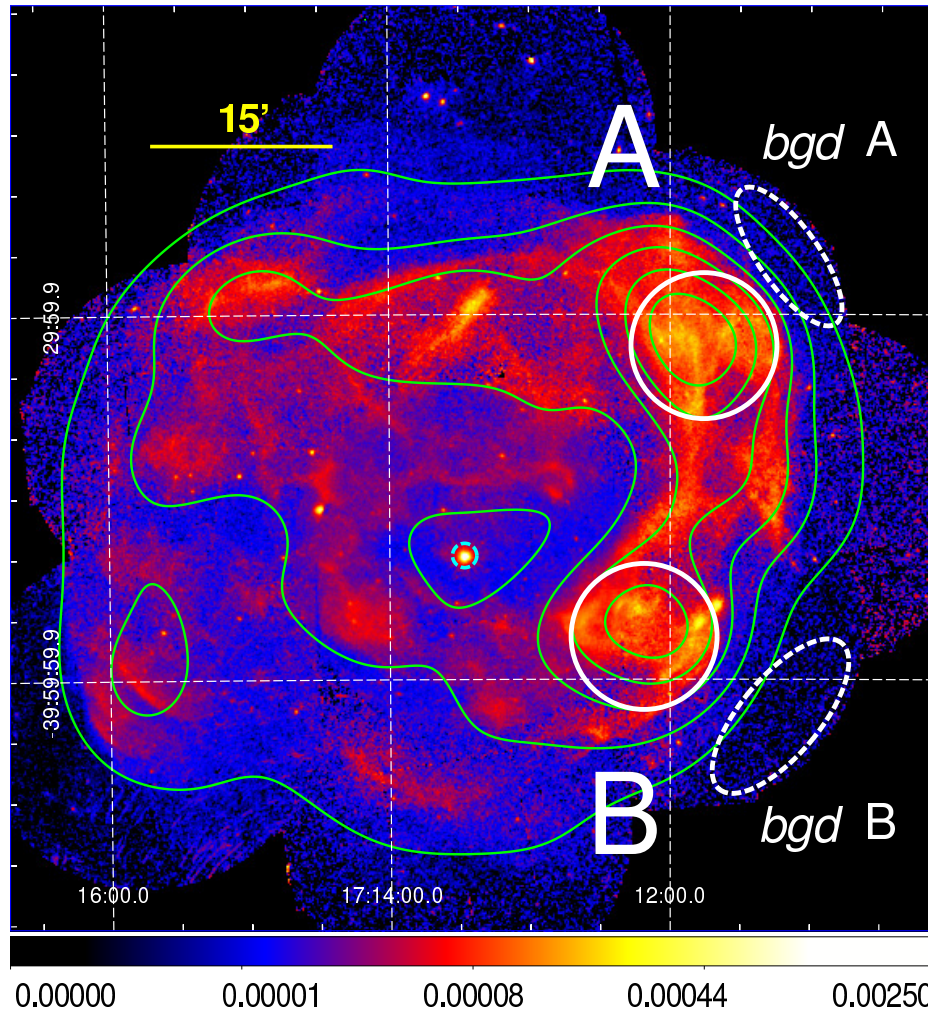


Рисунок 2.2 — Скорректированное на экспозицию и виньетирование изображение поверхностной яркости RX J1713.7–3946 с вычтенным фоном, полученное по данным детекторов *MOS1+2* обсерватории *XMM-Ньютон* в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ. Изображение построено в следующих единицах: отсчёты $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{угл. мин.}^{-2}$. Изображение было сглажено с двумерной функцией Гаусса с $\sigma = 2''$ для улучшения репрезентативности. Сетка небесных координат демонстрирует экваториальные координаты (J2000). Белые сплошные окружности показывают положения областей жёсткого рентгеновского излучения А и В, обнаруженных по данным телескопа *IBIS/ISGRI*. Регионы, использованные для оценки фонового излучения в спектральном анализе отмечены пунктирными эллипсами. Зелёные контуры демонстрируют изофоты оригинального изображения обсерватории *XMM-Ньютон*, свёрнутого с инструментальной ФРТИ телескопа *IBIS* (двумерная функция Гаусса с $\sigma = 5'$) после удаления яркого точечного источника 1WGA J1713.4–3949, который отмечен маленькой пунктирной окружностью.

восточном направлении. Положение его центроида ($RA = 17^{\text{h}}08^{\text{m}}47^{\text{s}}.5$, $Dec. = -40^{\circ}09'14''$) согласуется с положением источника 1RXS J170849.0–400910, открытого в обзоре всего неба обсерваторией *ROSAT* [140] и идентифицированного с помощью данных *ASCA* как аномальный рентгеновский пульсар [141].

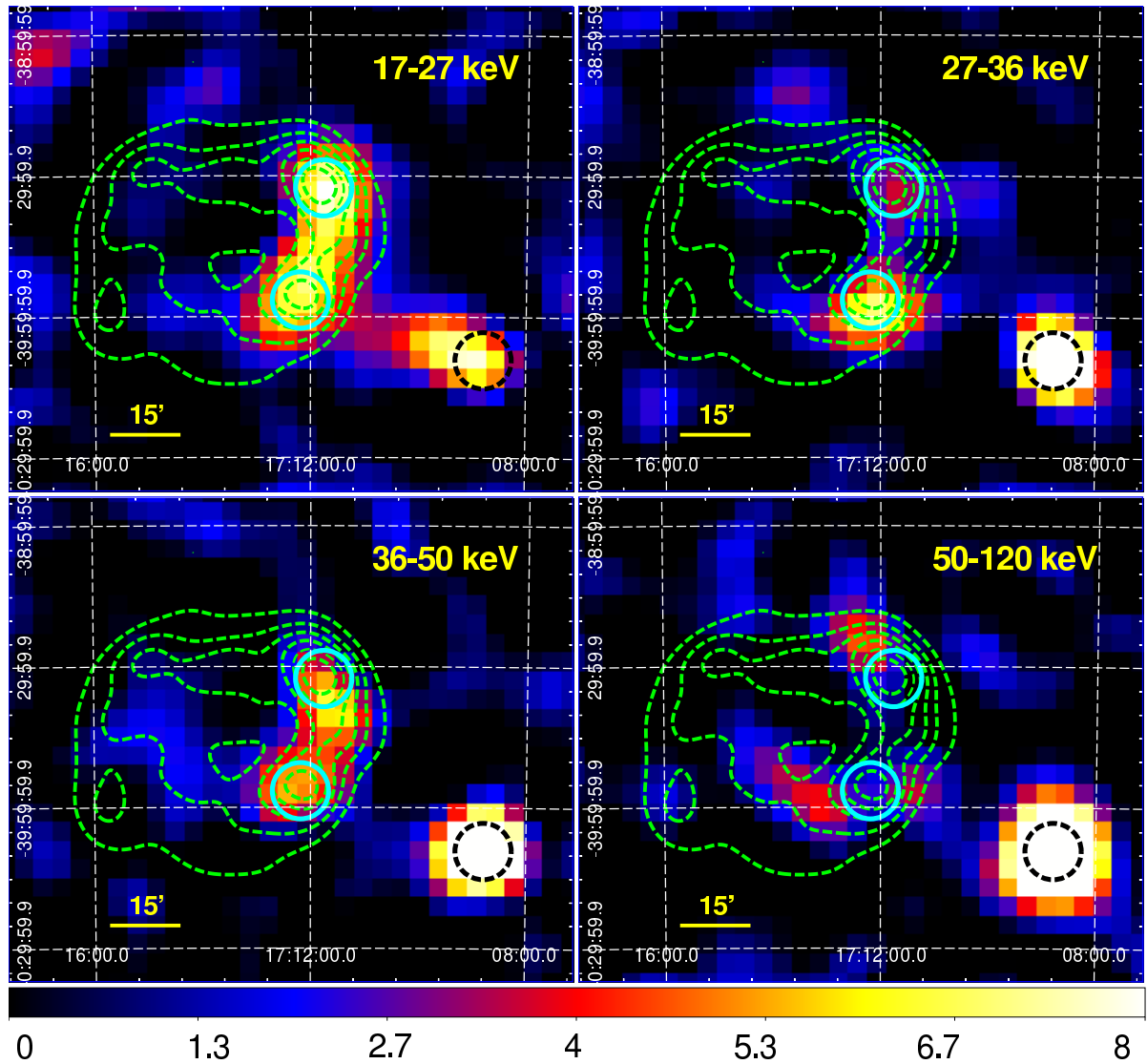


Рисунок 2.3 — Изображения RX J1713.7–3946 в разных энергетических диапазонах (численные значения представлены на каждой панели), построенные по данным телескопа *IBIS/ISGRI*. Изображения представлены в единицах отношения сигнал/шум. Координатная сетка соответствует экваториальным координатам (J2000). Пунктирные зелёные контуры демонстрируют распределение поверхностной яркости изображения RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *XMM-Ньютон* на энергиях 1–10 кэВ, свёрнутого с ФРТИ телескопа *IBIS*. Положение рентгеновского источника 1RXS J170849.0–400910 отмечено чёрной пунктирной окружностью.

2.3.1 Двумерный пространственный анализ

Наиболее яркие в стандартном рентгеновском диапазоне области А и В явно вытянуты с характерным размером около $12'$, т. е. сравнимым с FWHM ФРТИ телескопа *IBIS*. В предположении, что на более высоких энергиях действует тот же механизм излучения, ожидается, что их протяжённость проявится и в данных телескопа *IBIS*. Для проверки этого предположения радиальные профили областей А и В в диапазоне 17–60 кэВ сравнивались с профилем точечного источника 1RXS J170849.0–400910, который должен соответствовать ФРТИ телескопа *IBIS*. Радиальные профили были извлечены относительно соответствующих положений центроидов и для удобства перенормированы на единичное значение интеграла под каждой кривой. Полученные радиальные профили показаны на Рисунке 2.4. Радиальные профили были аппроксимированы функцией Гаусса с центром, зафиксированным на нулевом значении. В результате были получены следующие стандартные отклонения функции Гаусса для областей А и В и источника 1RXS J170849.0–400910 соответственно: $\sigma_A = 6,3^{+1,3}_{-1,1}$, $\sigma_B = 7,2^{+1,5}_{-1,2}$ и $\sigma_{1RXS} = 4,4 \pm 0,3$. Ширина функции Гаусса σ_{1RXS} , наиболее хорошо описывающей профиль точечного источника 1RXS J170849.0–400910, согласуется с $\sigma = 5'$ ФРТИ телескопа *IBIS*. Пространственная протяжённость излучения из областей А и В систематически (хотя и незначительно) больше, чем у ФРТИ телескопа *IBIS*, что позволяет предположить, что изображение телескопа *IBIS/ISGRI* RX J1713.7–3946 соответствует морфологии остатка вспышки сверхновой и не согласуется с двумя жёсткими рентгеновскими источниками, подобными точечным, которые могли бы оказаться расположенными в проекции на оболочке RX J1713.7–3946.

Поскольку RX J1713.7–3946 имеет типичную морфологию остатка вспышки сверхновой с оболочкой, радиальные профили по данным телескопа *IBIS/ISGRI* для областей А и В извлекались относительно центра оболочки, расположенной на $RA = 17^h 13^m 25^s.2$ и $Dec. = -39^\circ 46' 16''$. Координаты центра были взяты из оценки по данным комплекса черенковских телескопов *H.E.S.S.*, полученной с помощью трёхмерной модели сферической оболочки [135]. Радиальные профили из изображений телескопа *IBIS/ISGRI* и обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* были извлечены из двух соответствующих секторов с углом раскрытия 72° , как показано на Рисунке 2.5. Для сравнения радиальных профилей, полученных по данным обсерваторий *XMM-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ*, профили были перенормированы в

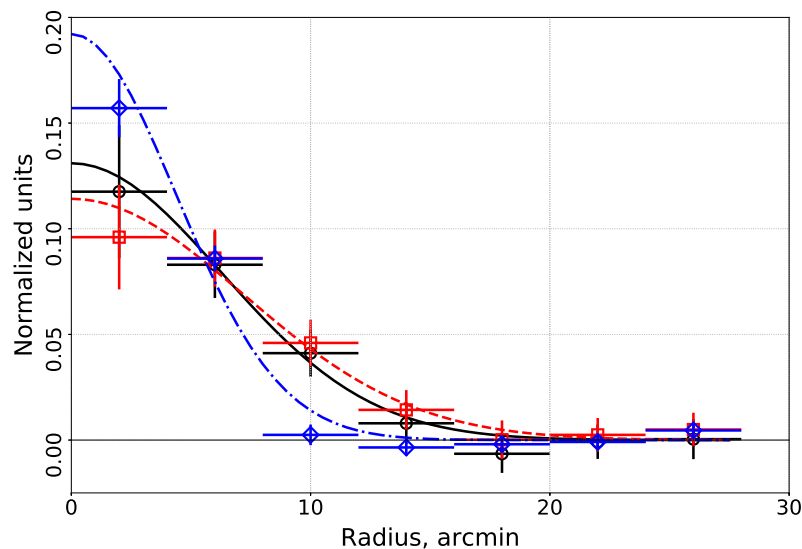


Рисунок 2.4 — Радиальные профили областей А (кружки) и В (квадратики) и источника 1RXS J170849.0–400910 (ромбики). Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют функциям Гаусса наилучшей аппроксимации со стандартными отклонениями $\sigma = 6,3^{+1,3}_{-1,1}$, $7,2^{+1,5}_{-1,2}$ и $4,4 \pm 0,3$, определёнными для областей А и В и источника 1RXS J170849.0–400910 соответственно.

диапазоне $14' < R < 40'$ (сектор А) и $10' < R < 40'$ (сектор В). Стоит отметить, что изображение обсерватории *ХММ-Ньютон* было свёрнуто с ФРТИ телескопа *IBIS*. Перед процедурой свёртки из изображения RX J1713.7–3946, построенного по данным обсерватории *ХММ-Ньютон*, была удалена круговая область с радиусом $R = 0,9$, содержащая яркий рентгеновский источник 1WGA J1713.4–3949, который, вероятно, является нейтронной звездой и центральным компактным объектом остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 [117; 142].

Извлечённые радиальные профили секторов А и В представлены на Рисунке 2.6. Радиальные профили, полученные по данным телескопа *IBIS*, были аппроксимированы простой функцией Гаусса для оценки положения оболочки относительно центра остатка вспышки сверхновой. Параметры наилучшей аппроксимации приведены в Таблице 10. Полученные наилучшие функции Гаусса для секторов А и В имеют сравнимые ширины, но значительно сдвинуты относительно друг друга, что, однако, согласуется с положением соответствующих пиков в профилях излучения по данным *ХММ-Ньютон*.

Стоит отметить, что структура двойной оболочки, наблюдаемая вдоль западной дуги остатка вспышки сверхновой, хорошо видна на рентгеновском изображении RX J1713.7–3946, полученном по данным обсерватории *ХММ-Ньютон*

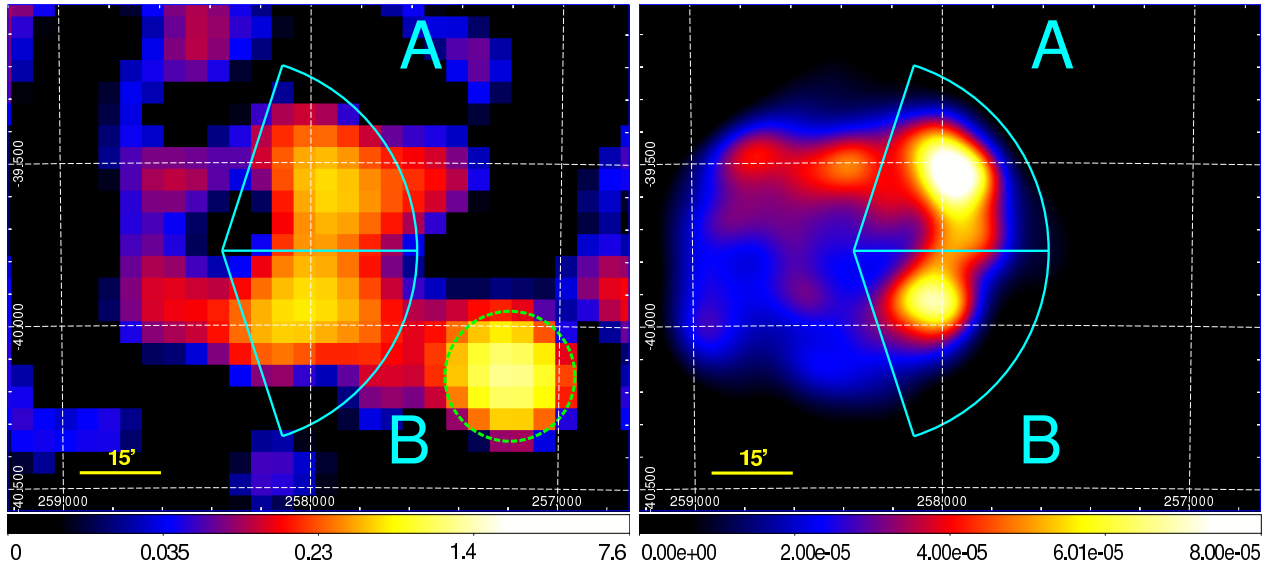


Рисунок 2.5 — Слева: изображение RX J1713.7–3946 по данным телескопа *IBIS*, построенное в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ в единицах потока мКраб и свёрнутое с ФРТИ телескопа *IBIS*. Зелёная пунктирная окружность с радиусом $R = 12'$ демонстрирует положение источника 1RXS J170849.0–400910, который не был включён в пространственный анализ. Справа: карта поверхностной яркости RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2*, построенная в энергетическом диапазоне 1–10 кэВ в единицах отсчёты $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{угл. мин.}^{-2}$ и свёрнутая с ФРТИ телескопа *IBIS*. Секторы, из которых извлекались радиальные профили, отмечены голубым цветом на обоих изображениях. Координатная сетка на обоих изображениях соответствует экваториальной системе координат (J2000).

Таблица 10 — Параметры наилучшей аппроксимации радиальных профилей, построенных по данным телескопа *IBIS/ISGRI* внутри секторов А и В (Рисунок 2.5), функцией Гаусса и соответствующие положения пиков излучения на изображении RX J1713.7–3946, полученных обсерваторией *XMM-Ньютон* и измеренные относительно центра остатка вспышки сверхновой.

Параметр	Сектор А	Сектор В
Амплитуда, мКраб	$0,43 \pm 0,06$	$0,60 \pm 0,08$
Положение центра функции Гаусса	$23',1 \pm 1',1$	$17',9 \pm 1',0$
σ	$5',5 \pm 1',0$	$5',8 \pm 0',9$
$\chi_{\text{red}}^2/\text{d.o.f.}$	0,95/12	0,71/12
Положение пика излучения <i>XMM-Ньютон</i>	$22',5$	$16',5$

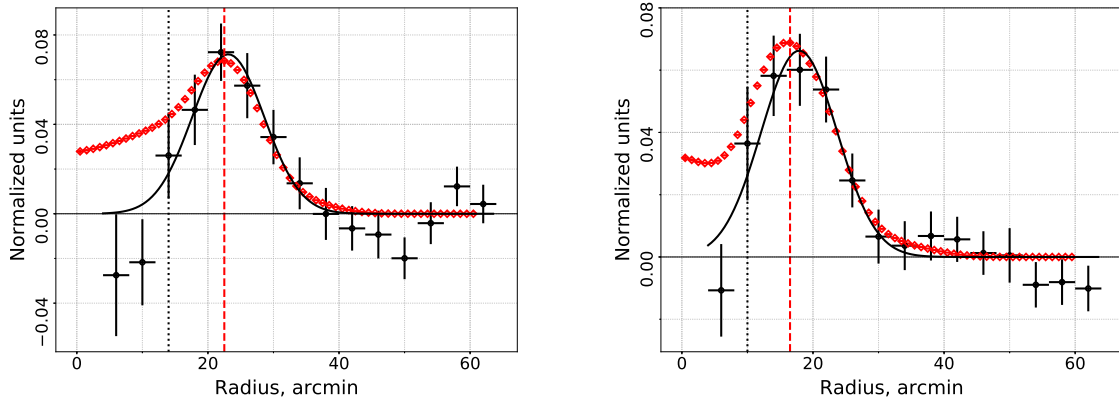


Рисунок 2.6 — Радиальные профили секторов А (левая панель) и В (правая панель), полученные по данным обсерватории *ХММ-Ньютон*/*MOS1+2* (квадратики) и телескопа *ИНТЕГРАЛ*/*IBIS* (кружки). На каждой панели сплошной линией показана Гауссова модель наилучшей аппроксимации, полученная по данным космической обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Положения пиков излучения по данным обсерватории *ХММ-Ньютон* отмечены вертикальными штриховыми линиями. Радиальные профили были перенормированы на единицу интеграла под кривой, начальный радиус которого отмечен вертикальными пунктирными линиями.

для энергий 1–10 кэВ (Рисунок 2.2). Предположительно, внешняя оболочка вызвана ударной волной, распространяющейся наружу, в то время как внутренняя — ударной волной, отражённой от ближайшего молекулярного облака [136]. Из-за недостаточного углового разрешения ($12'$ FWHM) телескопа *IBIS* невозможно напрямую зарегистрировать структуру двойной оболочки. Однако, после свёртки изображения обсерватории *ХММ-Ньютон* с ФРТИ телескопа *IBIS*, была получена схожая структура оболочки, в которой доминируют две ярких области излучения, чьи положения согласуются с областями яркого жёсткого рентгеновского излучения А и В, наблюдающимися на изображении по данным телескопа *IBIS* (Рисунок 2.5). Это согласие указывает на то, что структура двойной оболочки, вероятно, присутствует и в энергетическом диапазоне телескопа *IBIS*.

2.4 Спектральный анализ

Рентгеновские спектры остатков вспышек сверхновых несут уникальную информацию о механизмах ускорения КЛ на расширяющихся ударных волнах.

В частности, рентгеновский спектр RX J1713.7–3946, полученный в жёстком рентгеновском диапазоне, может пролить свет на режим диффузии электронов в области ударной волны остатка вспышки сверхновой [125]. Поскольку наблюдения в этом диапазоне сложны из-за множества различных факторов (например, скромное угловое разрешение, отсутствие возможности получения изображения, измерения с преобладанием фона, систематические неопределённости, паразитные засветки, низкое отношение сигнала к шуму и т. д.), информация о жёстком рентгеновском излучении RX J1713.7–3946 ограничена. Благодаря многолетним наблюдениям ГЦ с помощью обсерватории *ИНТЕГРАЛ* теперь есть возможность зарегистрировать излучение RX J1713.7–3946 до ~ 50 кэВ и улучшить спектральную информацию о нём в жёстком рентгеновском диапазоне.

Спектр RX J1713.7–3946, построенный в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ, был извлечён из изображений телескопа *IBIS/ISGRI* в единицах потока Крабовидной туманности (мКраб, см. сноску в Разделе 2.3 и Раздел 1.1.2), которые могут быть непосредственно преобразованы в физические единицы. В соответствии с методом согласованного фильтра (matched filter) [143] оптимальным способом сбора потока точечного источника (и, следовательно, получения максимального отношения сигнал/шум) является использование изображений, свёрнутых с инструментальной ФРТИ телескопа. Для протяжённого источника ядро свёртки должно отражать размер и морфологию самого объекта, как это сделали Лутовинов и др. [49] для изучения жёсткого рентгеновского излучения скопления галактик в созвездии Волосы Вероники с использованием данных телескопа *IBIS/ISGRI*. По этой причине размер ядра функции Гаусса был увеличен с $\sigma = 5'$ до $\sigma = 6',75$, что является средним значением между $\sigma_A \sim 6',3$ и $\sigma_B \sim 7',2$, определенными в Разделе 2.3.1. Для построения спектра из изображений были получены значения потоков излучения областей А и В в соответствующих энергетических диапазонах. Потоки были извлечены из положений центроидов А и В, оценённых в диапазоне 17–60 кэВ, поскольку изображение в этом диапазоне имеет наибольшую значимость. Стоит отметить, что хотя в высокоэнергетическом диапазоне 50–120 кэВ преобладает фон (Рисунок 2.3), в этом диапазоне заметно некоторое наличие положительного сигнала по всей области остатка вспышки сверхновой. Наконец, спектры областей А и В были просуммированы для получения общего спектра RX J1713.7–3946 (Рисунок 2.7) и уменьшения статистического шума. Полученный спектр был аппроксимирован моделью степенного закона в диапазоне энергий 17–120 кэВ со следующими наиболее подходящими

параметрами: фотонным индексом $\Gamma = 3,13_{-0,33}^{+0,36}$ и полным потоком $F_{17-120 \text{ кэВ}} = (12,0 \pm 1,4) \cdot 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ($\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 1,82/2$).

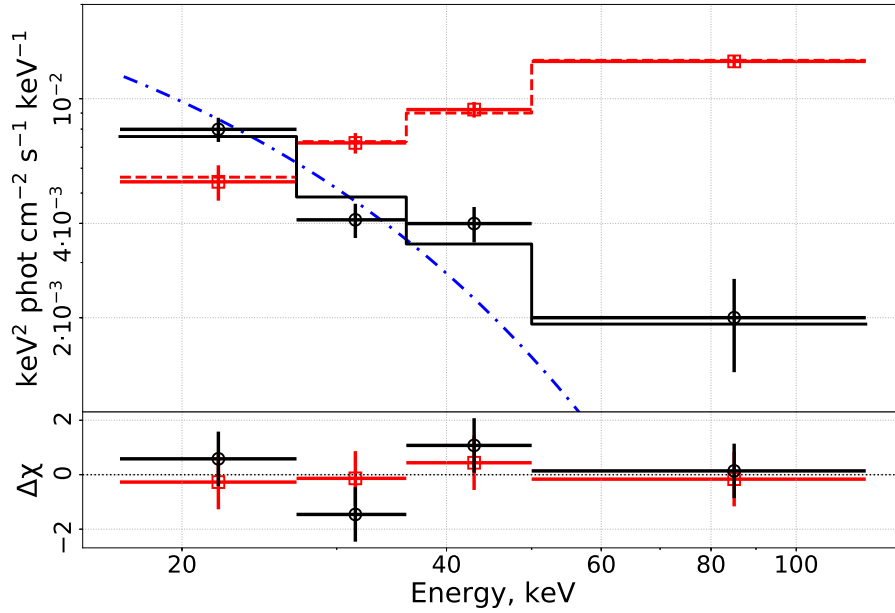


Рисунок 2.7 — Суммарный спектр областей А и В, полученный по данным телескопа *IBIS* в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ, показан чёрными окружностями. Сплошная чёрная линия демонстрирует модель степенного закона, в то время как штрих-пунктирная синяя линия соответствует модели поглощённого степенного закона с экспоненциальным завалом с параметрами $N_{\text{H}} = 1,26 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $\Gamma = 2,32$, полученными по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* и фиксированным значением $E_{\text{cut}} = 17 \text{ кэВ}$ (см. Раздел 2.4.2). Для сравнения приведены спектр 1RXS J170849.0–400910 по данным телескопа *IBIS* в диапазоне 17–120 кэВ и его модель степенного закона, отмеченные красными квадратиками и красной пунктирной линией соответственно.

Для проверки правильности измеренного телескопом *IBIS/ISGRI* спектра RX J1713.7–3946 был извлечён спектр близко расположенного точечного источника 1RXS J170849.0–400910 с использованием такого же метода, но со стандартной шириной функции Гаусса, соответствующей инструментальной ФР-ТИ телескопа *IBIS* $\sigma = 5'$. Спектр 1RXS J170849.0–400910 построен поверх спектра областей А и В на Рисунке 2.7 без перенормировки. Спектр хорошо описывается моделью простого степенного закона с фотонным индексом ($\Gamma = 1,3 \pm 0,1$, нормировкой на 1 кэВ $N_{\text{на кэВ}} = 7_{-3}^{+4} \cdot 10^{-4} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и статистикой $\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 0,16/2$). Результаты аппроксимации хорошо согласуются со

спектральными характеристиками, полученными ранее по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* [144]. Таким образом, можно заключить, что процедура определения потоков телескопа *IBIS/ISGRI* является корректной.

2.4.1 Систематические неопределённости в определении потока

В алгоритме реконструкции изображения неба телескопа *IBIS* использовалась процедура итерационного удаления источников (Iterative Removal Of Sources, IROS) [50; 145; 146]), которая позволяет удалить ложные проявления («призраки») известных источников рентгеновского излучения, являющиеся побочным продуктом повторяющегося рисунка маски телескопа *IBIS*. IROS сначала убирает вклад от самых ярких источников, постепенно переходя к более слабым, так как поток источника оценивается в предположении, что в поле зрения телескопа *IBIS* есть только один источник. Из-за больших неопределённостей в оценке потока слабых источников для отдельных наблюдений в итоговом изображении появляется систематическая ошибка. Комбинированный спектр RX J1713.7–3946 был извлечён без применения IROS, чтобы проверить возможное систематическое влияние на окончательный спектр. Стоит отметить, что процедура IROS применялась ко всем другим источникам, попавшим в поле зрения телескопа *IBIS*, включая ближайший 1RXS J170849.0–400910. Спектр RX J1713.7–3946 без IROS (показан на Рисунке 2.8) хорошо описывается степенной моделью со следующими параметрами: $\Gamma = 3,06_{-0,57}^{+0,68}$, $F_{17-60 \text{ кэВ}} = (6,1 \pm 1,4) \cdot 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ($\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 0,24/2$). В результате, фотонный индекс существенно не изменился, однако поток уменьшился в 2 раза. Таким образом, можно заключить, что процедура IROS может вносить некоторую систематическую погрешность в определение потока RX J1713.7–3946, однако её влияние на форму спектра является незначительным.

2.4.2 Широкополосный спектр

Для построения широкополосного рентгеновского спектра RX J1713.7–3946 были использованы данные обсерватории *ХММ-Ньютон*, полученные в мягком

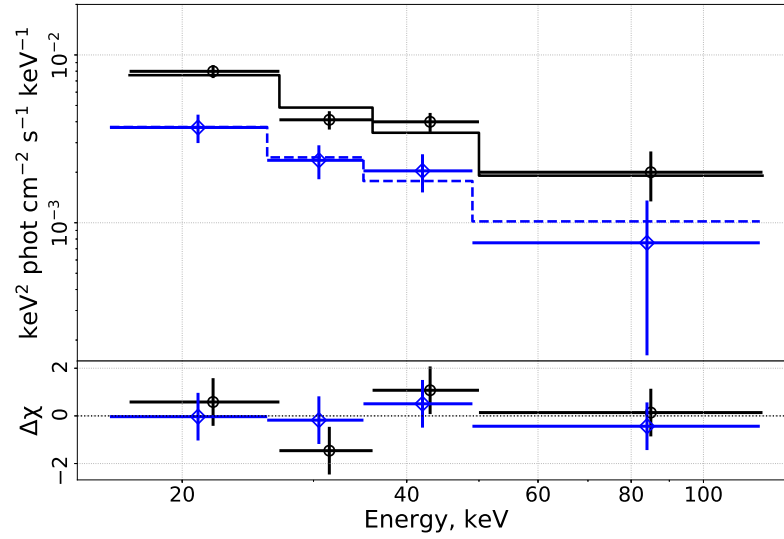


Рисунок 2.8 — Суммарный спектр областей А и В по данным телескопа *IBIS* в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ и наилучшая модель степенного закона показаны чёрными окружностями и сплошной чёрной линией соответственно. Синие ромбики и пунктирная синяя линия — точки данных и модель соответственно, рассчитанные для суммарного спектра, полученного без процедуры IROS. Для удобства этот спектр сдвинут на 1 кэВ влево.

рентгеновском диапазоне 0,8–10,0 кэВ. Для спектров, соответствующих ярким областям жёсткого излучения А и В, были выбраны круговые области (Рисунок 2.2) с радиусом $R = 6'$, что соответствует $12'$ FWHM ФРТИ телескопа *IBIS*. Фон оценивался в двух эллиптических областях, обозначенных как *bgd* А и *bgd* В на Рисунке 2.2. Спектры фонового излучения были аппроксимированы моделью поглощённого степенного закона, в результате чего были получены следующие наилучшие параметры модели: $N_{\text{H}}^{\text{bgd}} = (0,67 \pm 0,14) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $\Gamma^{\text{bgd}} = 2,0 \pm 0,2$, $N_{\text{на кэВ}}^{\text{bgd}} = (5,5 \pm 1,1) \cdot 10^{-4} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, постоянная кросс-нормировки между областями *bgd* А и *bgd* В $C^{\text{bgd}} = 1,4 \pm 0,1$ ($\chi_{\text{red}}^2/d.o.f. = 0,81/330$). Стоит отметить, что для фотоэлектронного поглощения использовалась модель *TBabs* с химическим обилием элементов и сечениями поглощения, описанными в работах Вилмса и др. [147] и Вернера и др. [148] соответственно. Следуя методу, описанному в Асеро и др. [127], фоновая модель наилучшей аппроксимации к спектрам областей А и В применялась полностью зафиксированной, при этом нормировка была пересчитана в соответствии с отношением площадей фоновой области *bgd* А и источника А $S_{\text{A}}/S_{\text{bgd А}} = 2,15$ и зафиксирована на значении $N_{\text{на кэВ}}^{\text{bgd}} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Финальные спектры областей А и В, по-

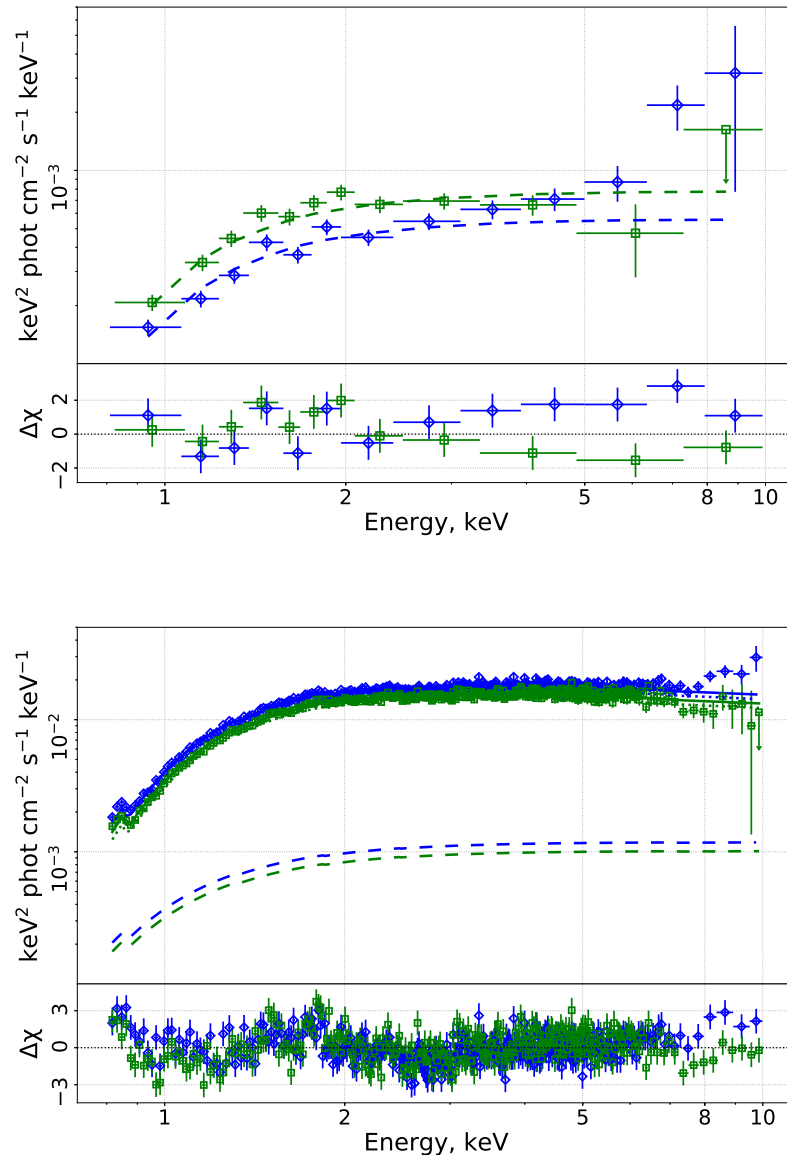


Рисунок 2.9 — Верхняя панель: Спектры фонового излучения по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* в энергетическом диапазоне 0,8–10,0 кэВ, извлечённые из областей, отмеченных на Рисунке 2.2 как *bgd* А (синие ромбики) и *bgd* В (зелёные квадратики). Пунктирные кривые демонстрируют модель $TBabs_{bgd} * power - law_{bgd}$ для каждого спектра. Нижняя панель: Спектры областей А (синие ромбики) и В (зелёные квадратики) по данным детекторов *MOS1* и *MOS2* обсерватории *XMM-Ньютон* в диапазоне 0,8–10,0 кэВ. Компоненты излучения источника и фона для А и В показаны пунктирной и штриховой кривыми соответственно. Полная модель построена сплошной линией.

лученные в диапазоне 0,8–10,0 кэВ (Рисунок 2.9), хорошо описываются моделью степенного закона с поглощением. Параметры наилучшей аппроксимации приведены в Таблице 11.

Таблица 11 — Параметры наилучшей аппроксимации модели для излучения, извлечённого из областей А и В по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* в энергетическом диапазоне 0,8–10,0 кэВ. Модель: $T Babs * power - law + T Babs_{bgd} * power - law_{bgd}$. Индексом *bgd* обозначена компонента астрофизического фонового излучения. C_{XMM} — постоянная кросс-нормировки между данными областей А и В.

Параметр	Единицы измерения	Значение
N_H^{bgd}	10^{22} см^{-2}	0,67 (фикс.)
Γ^{bgd}		2,0 (фикс.)
$N_{\text{на кэВ}}^{bgd}$	$10^{-3} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1,18 (фикс.)
N_H	10^{22} см^{-2}	$1,10 \pm 0,01$
Γ		$2,23 \pm 0,01$
$N_{\text{на кэВ}}$	$10^{-3} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$24,4 \pm 0,4$
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$		1,09/1141
C_{XMM}		$0,858 \pm 0,004$

Поскольку приходится иметь дело с протяжёнными источниками, трудно гарантировать, что спектры действительно извлекаются из одной и той же области, особенно для телескопов с кодирующей маской, таких как телескоп *IBIS*. Есть две возможности уменьшить неопределённости, связанные с этой проблемой. Например, можно использовать нормировки спектров, полученных на разных телескопах, как независимые друг от друга параметры. Другой вариант — отдельно аппроксимировать каждый спектр, а затем построить наклон степенного закона как функцию энергии. Данная часть работы посвящена первому варианту.

Спектр RX J1713.7–3946 в мягком рентгеновском диапазоне хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом $\Gamma \sim 2$, который значительно отличается от того, что наблюдается в жёстких рентгеновских лучах, где $\Gamma \sim 3$. Это указывает на изменение наклона степенного закона в районе энергий 10–20 кэВ. Чтобы проверить, согласуется ли изменение наклона с моделью степенного закона с экспоненциальным завалом на высоких энергиях (*cutoff*) и моделью степенного закона с изломом (*bknpower*), широкополосный спектр RX J1713.7–3946 был аппроксимирован этими моделями. Вторая модель имеет

следующий вид:

$$\frac{dN}{dE} = \begin{cases} N_{\text{на кэВ}} * E^{-\Gamma_1} \text{ при } E \leq E_{\text{break}} \\ N_{\text{на кэВ}} * E_{\text{break}}^{\Gamma_2 - \Gamma_1} * (E/1 \text{ кэВ})^{-\Gamma_2} \text{ при } E > E_{\text{break}} \end{cases}, \quad (2.1)$$

где $\frac{dN}{dE}$ — наблюдаемый спектр в единицах фот. $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$, E_{break} — энергия излома, выраженная в кэВ, Γ_1 — фотонный индекс для энергий ниже или равных E_{break} , Γ_2 — фотонный индекс для энергий выше E_{break} , $N_{\text{на кэВ}}$ — нормировка на 1 кэВ, выраженная в фот. $\text{кэВ}^{-1} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Качество данных телескопа *IBIS* не позволяет ограничить энергию завала или излома при совместной аппроксимации данных обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* и телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* этими моделями. Тем не менее, значение энергии завала/излома было зафиксировано на 17 кэВ, т. е. на самом низком значении энергетического диапазона телескопа *IBIS*. Параметры наилучшей аппроксимации приведены в Таблице 12. Широкополосный спектр RX J1713.7–3946, аппроксимированный моделью *bknpower*, представлен на Рисунке 2.10. Спектральная форма модели *cutoff* показана на Рисунке 2.7. Вероятность принятия нулевой гипотезы моделей *cutoff* и *bknpower* для данных телескопа *IBIS* составила 0,04 % и 16 % соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что спектр RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ лучше согласуется с моделью степенного закона с изломом, чем с моделью степенного закона с экспоненциальным завалом (по крайней мере, при энергии излома или завала, зафиксированной на 17 кэВ).

2.5 Интерпретация результатов

Результаты, представленные выше, численно согласуются с полученными в работе Цудзи и др. [136], где для модели *cutoff* энергия завала была оценена на значении $18,8_{-3,0}^{+4,2} \text{ }_{-2,1}^{+2,6}$ кэВ (первыми указаны статистические ошибки, а вторыми — систематические), что близко к значению 17 кэВ, рассматриваемому в данной диссертации. В дополнение, Цудзи и др. [136] обнаружили, что спектр RX J1713.7–3946 по данным телескопа *NuSTAR* в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом

Таблица 12 — Параметры наилучшей аппроксимации спектров областей А и В, полученные по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* и телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* в энергетических диапазонах 0,8–10,0 и 17–120 кэВ соответственно. Модели: $TBabs * bknpower$ и $TBabs * cutoffpl$. C — постоянная кросс-калибровки между данными обсерваторий *XMM-Ньютон/MOS1+2* и телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS*. C_{XMM} — постоянная кросс-нормировки между данными областей А и В.

Параметр	Единицы измерения	Vknpower	Cutoffpl
N_H	10^{22} см^{-2}	$1,10 \pm 0,01$	$1,04 \pm 0,01$
Γ_1		$2,23 \pm 0,01$	$2,04 \pm 0,01$
E_{bkn}/E_{cut}	кэВ	17 (фикс.)	17 (фикс.)
Γ_2		$3,13^{+0,36}_{-0,33}$	—
$N_{\text{на кэВ}}$	$10^{-3} \text{ фот. кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$24,4 \pm 0,4$	$23,6 \pm 0,3$
C_{XMM}		0,858 (фикс.)	0,858 (фикс.)
C		$0,75^{+0,16}_{-0,14}$	$1,36 \pm 0,15$
$\chi^2_{red}/d.o.f.$		1,09/1144	1,19/1145

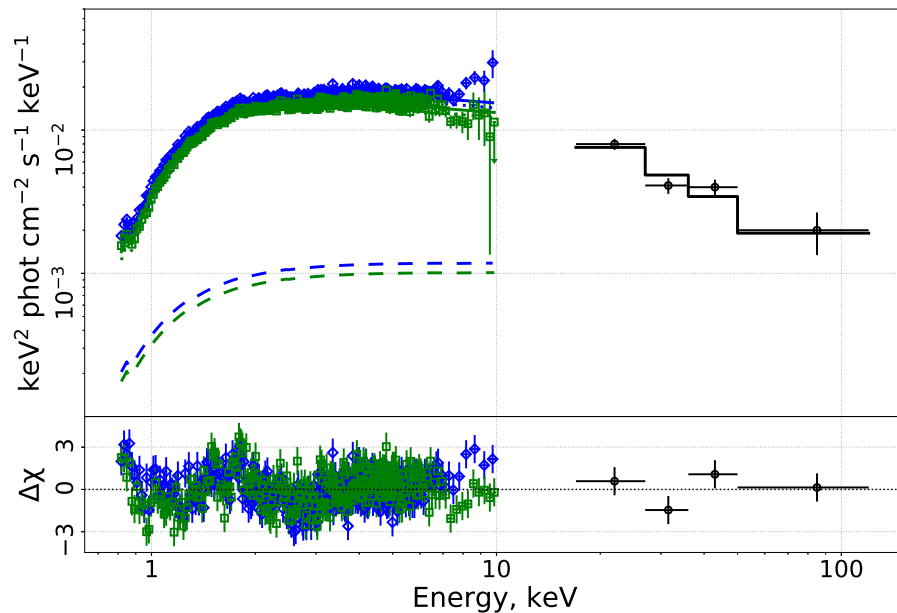


Рисунок 2.10 — Широкополосный спектр областей А и В, полученный по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* и телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* в энергетических диапазонах 0,8–10,0 и 17–120 кэВ соответственно. Сплошная кривая демонстрирует модель поглощённого степенного закона с изломом. Обозначения точек данных и линий моделей такое же, как и на Рисунках 2.7 и 2.9.

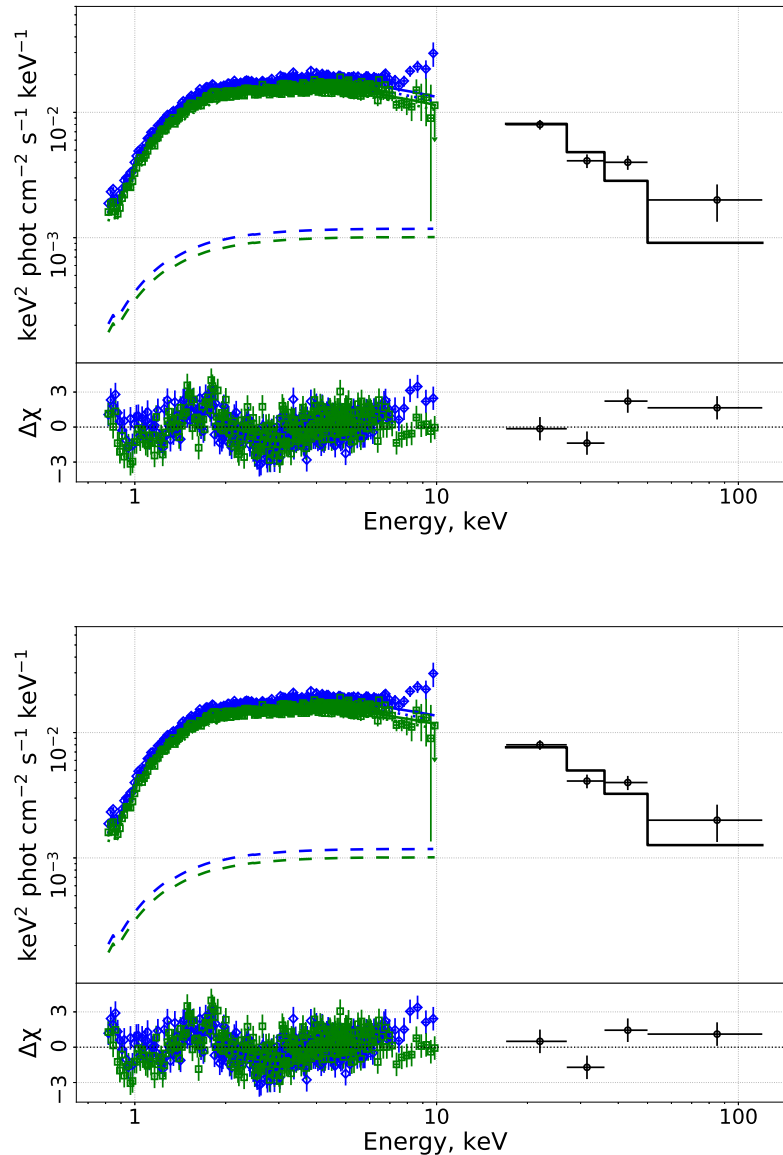


Рисунок 2.11 — Широкополосный спектр областей А и В, полученный по данным обсерватории *XMM-Ньютон/MOS1+2* и телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS* для энергий 0,8–10,0 и 17–120 кэВ соответственно. Компонента излучения RX J1713.7–3946 представлена поглощённой моделью *ZA07* для уравнений (2.2) (верхняя панель) и (2.3) (нижняя). Назначения маркёров точек и типов линий такое же, как и на Рисунках 2.7 и 2.9.

$\Gamma = 2,55 \pm 0,04 \pm 0,02$, что согласуется с нашим выводом об укрупнении наклона степенного закона в жёстком рентгеновском диапазоне.

В качестве физически мотивированной спектральной модели использовалась модель Зиракашвили В. Н. и Агароняна Ф. А. [125] (далее *ZA07*), которые получили аналитическую аппроксимацию синхротронного излучения электронов, ускоренных на нерелятивистской ударной волне остатка вспышки сверхновой с

оболочкой, в предположении преобладания синхротронных потерь. Авторы предложили два варианта этой модели:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-2} \left[1 + 0,46 \left(\frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{0,6} \right]^{11/4,8} \exp^{-\sqrt{E/\varepsilon_0}}, \quad (2.2)$$

и

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-2} \left[1 + 0,38 \left(\frac{E}{\varepsilon_0} \right)^{0,5} \right]^{11/4} \exp^{-\sqrt{E/\varepsilon_0}}, \quad (2.3)$$

где $\frac{dN}{dE}$ — наблюдаемый спектр в единицах фот. $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$, а E — энергия фотонов. Первое выражение соответствует случаю, когда отношение напряжённости магнитного поля вверх по потоку и вниз по потоку $k = B_1/B_2 = 1$ (для магнитного поля, перпендикулярного фронту ударной волны), второе — случаю с $k = \sqrt{1/11}$ (для изотропного магнитного поля). В обоих случаях коэффициент сжатия принимается $\sigma = 4$ (подробности см. в [125]). Параметр ε_0 задаётся соотношением синхротронных потерь и выигрыша в энергии частиц за счёт ускорения на фронте ударной волны и зависит, в частности, от скорости ударной волны и отклонения коэффициента диффузии частиц от значения Бома. Это не соответствует кажущейся энергии завала или излома в наблюдаемом спектре, потому что член степенного закона с положительным индексом эффективно компенсирует медленный экспоненциальный член модели для энергий $E \sim \varepsilon_0$. Соответственно, излом/завал проявляется при более высоких энергиях, чем ε_0 .

Широкополосный спектр RX J1713.7–3946 был аппроксимирован моделью ZA07, добавив её в качестве табличной модели XSPEC (Рисунок 2.11). Модель хорошо согласуется с данными телескопов *XMM-Ньютон/MOS1+2* и *ИНТЕГРАЛ/IBIS* для обоих случаев значения k (Таблица 13). Оценки ε_0 на значениях $1,13 \pm 0,06$ и $1,73 \pm 0,11$ кэВ для уравнений (2.2) и (2.3) соответственно согласуются с результатом Цудзи и др. [136].

Чтобы избежать неточностей нормировки спектров RX J1713.7–3946, полученных с помощью разных телескопов, была построена диаграмма индивидуальных измерений наклона степенного закона в зависимости от энергии. Для этого были использованы значения фотонных индексов RX J1713.7–3946, измеренных по данным орбитального телескопа *NuSTAR* [136] и обсерватории *Suzaku/XIS/HXD* [129], а также значения обсерваторий *XMM-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ*, измеренные в этой работе. Эти значения сравнивались с бегущим фотонным индексом,

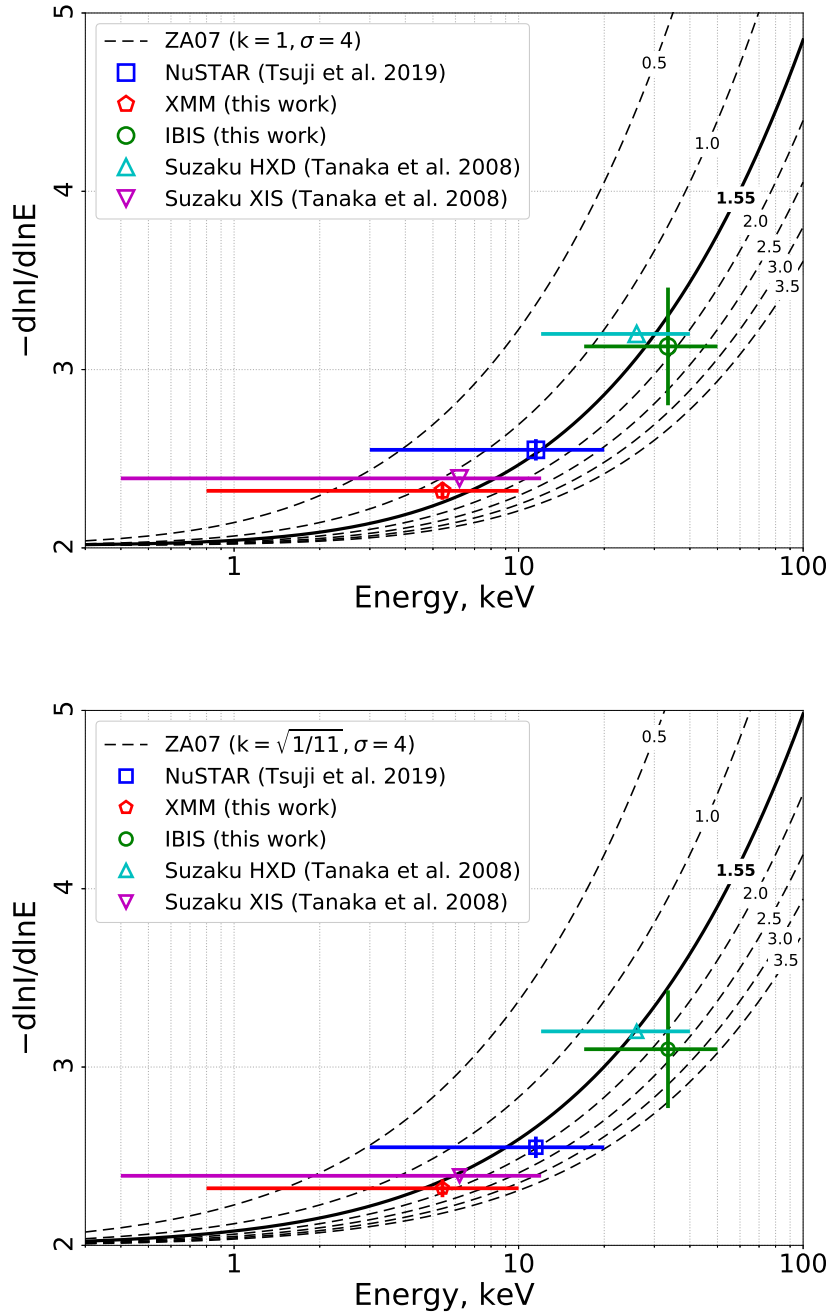


Рисунок 2.12 — Значения индексов степенного закона RX J1713.7–3946, измеренные в разных экспериментах. Штриховые линии демонстрируют логарифмическую производную модели ZA07 при $k = 1$ (верхняя панель) и $k = \sqrt{1/11}$ (нижняя панель) как функцию от энергии E . Сплошные линии соответствуют модели ZA07 при $\epsilon_0 = 1,55$ кэВ, оцененной для бомовской диффузии со скоростью ударной волны $u = 3900$ км с⁻¹ [136]. Разные кривые построены для случаев с разными значениями параметра ϵ_0 , выраженными в кэВ.

Таблица 13 — Наилучшие параметры модели ZA07, полученные при аппроксимации широкополосного спектра областей А и В по данным обсерваторий *ХММ-Ньютон/MOS1+2* и *ИНТЕГРАЛ/IBIS* в энергетических диапазонах 0,8–10,0 и 17–120 кэВ соответственно. Модель: $TBabs * ZA07$. C — постоянная кросс-калибровки между данными обсерваторий *ХММ-Ньютон/MOS1+2* и *ИНТЕГРАЛ/IBIS*. $C_{\text{ХММ}}$ — постоянная кросс-нормировки между данными для областей А и В.

Параметр	Единицы измерения	Уравнение (2.2)	Уравнение (2.3)
N_{H}	10^{22} см^2	$1,022 \pm 0,008$	$1,031 \pm 0,008$
ε_0	кэВ	$1,13 \pm 0,06$	$1,73 \pm 0,11$
$N_{\text{на кэВ}}$	$10^{-3} \text{ фот. с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$21,6 \pm 0,2$	$21,9 \pm 0,2$
$C_{\text{ХММ}}$		0,858 (фикс.)	0,858 (фикс.)
C		$1,26 \pm 0,16$	$1,05 \pm 0,13$
$\chi_{\text{red}}^2/d.o.f.$		1,19/1145	1,17/1145

вычисленным для двух моделей ZA07, заданных уравнениями (2.2) и (2.3) (см. Рисунок 2.12). Бегущий фотонный индекс был оценён следующим образом: $\Gamma(E) = -\frac{d \ln N}{d \ln E}$, и показан штриховыми линиями на Рисунке 2.12, соответствующими различным значениям ε_0 . Качественно прогрессирующее укрупнение спектра согласуется с моделями ZA07, хотя неопределённости в наблюдательных данных значительны. В контексте параметра ε_0 обе модели дают сравнимые значения $\varepsilon_0 \sim 1,0 - 2,0$ кэВ и $\varepsilon_0 \sim 1,5 - 2,5$ кэВ для уравнений (2.2) и (2.3) соответственно, которые согласуются со значениями, полученными при аппроксимации (Таблица 13). Ожидается, что для модели, соответствующей $k = \sqrt{1/11}$ (см. уравнение (2.3)), предпочтительны слегка более высокие значения ε_0 , чем для модели с $k = 1$. Для скорости ударной волны в RX J1713.7–3946 $u = 3900 \text{ км с}^{-1}$ и коэффициента диффузии, близкого к пределу Бома, значение ε_0 , предсказанное моделью ZA07, равно 1,55 кэВ [136]. Таким образом, данные телескопа *IBIS* на энергиях до 50 кэВ в комбинации с данными других экспериментов хорошо согласуются с предположением о том, что в ударной волне остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 реализуется режим диффузии, близкий к бомовскому.

2.6 Заключение

В данной главе представлено первое детальное исследование RX J1713.7–3946 с помощью телескопа *ИНТЕГРАЛ/IBIS/ISGRI* в жёстком рентгеновском диапазоне энергий. Изображения RX J1713.7–3946, полученные в диапазонах 17–27, 27–36, 36–50 и 17–60 кэВ, хорошо согласуются с картой RX J1713.7–3946 по данным обсерватории *ХММ-Ньютон* в диапазоне 1–10 кэВ. Это указывает на единый механизм излучения, работающий в мягком и жёстком рентгеновском диапазонах. На жёстком рентгеновском изображении RX J1713.7–3946 преобладают две яркие протяжённые области излучения, пространственно совпадающие с самыми яркими частями остатка вспышки сверхновой. Учитывая структуру оболочки RX J1713.7–3946, было обнаружено хорошее соответствие положения ударных волн в жёстком и мягком рентгеновском диапазонах.

Спектральный анализ данных телескопа *IBIS* показал, что в диапазоне энергий 17–120 кэВ спектр RX J1713.7–3946 хорошо описывается моделью степенного закона с $\Gamma = 3,13_{-0,33}^{+0,36}$, который значительно круче, чем $\Gamma = 2,32 \pm 0,05$, определённый по данным обсерватории *ХММ-Ньютон/MOS1+2* в диапазоне 1–10 кэВ. Разница показателей указывает на изменение наклона степенного спектра с ростом энергии.

Одновременная аппроксимация данных обсерваторий *ХММ-Ньютон/MOS1+2* и *ИНТЕГРАЛ/IBIS* показала, что данные телескопа *IBIS* лучше описываются моделью степенного закона с изломом, чем моделью степенного закона с экспоненциальным завалом, если энергии излома и завала зафиксированы на значении 17 кэВ для обеих моделей. Получить более хорошие ограничения сложно, поскольку RX J1713.7–3946 является протяжённым диффузным источником, а абсолютную нормировку спектров обсерваторий *ХММ-Ньютон/MOS1+2* и *ИНТЕГРАЛ/IBIS* для протяжённых областей получить трудно, особенно для телескопов с кодирующей маской.

Тем не менее, свободная от нормировки диаграмма $d \ln I / d \ln E$ продемонстрировала, что оценка фотонного индекса по данным телескопа *IBIS* не отличается от предсказаний аналитической модели ZA07, которая описывает синхротронно-фотонный спектр электронов, ускоренных на нерелятивистской ударной волне в молодом остатке вспышки сверхновой с оболочкой. Был сделан вывод, что эта модель хорошо описывает наблюдательные данные с энергией

$\varepsilon_0 \sim 1 - 2$ кэВ, что согласуется с ожиданиями режима ускорения, близкого к пределу Бома.

Глава 3. Фазируемая спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 по данным телескопа *NuSTAR*

На настоящий момент неизвестна картина ближайшего окружения СМЧД Стрелец A^* , т. к. наблюдения в этой области затруднены из-за сильного межзвёздного поглощения и большого количества различных объектов. В пределах нескольких парсеков вокруг СМЧД Стрелец A^* было обнаружено протяжённое рентгеновское излучение эллипсоидальной формы по данным орбитального телескопа *NuSTAR* [149]. Одной из основных гипотез, объясняющей природу этого излучения, является предположение о большом количестве катаклизмических переменных с массами белых карликов около $0,9M_{\odot}$ [149], которые телескоп *NuSTAR* не может разрешить как отдельные источники, в то время как по Галактике средняя масса аккрецирующего белого карлика составляет около $0,5M_{\odot}$ [150].

На более мелком масштабе в ГЦ на расстоянии от $\sim 0,04$ до $\sim 0,5$ пк расположен звёздный диск, который содержит большое количество массивных звёзд типа ОВ и Вольфа-Райе [28; 29; 151, для ознакомления], в результате эволюции которых могут образовываться нейтронные звёзды, способные проявлять себя как пульсары. До недавнего времени не было найдено ни одного пульсара в ближайшей окрестности СМЧД, что объяснялось экранированием из-за сильного межзвёздного рассеяния в направлении на ГЦ [152, например]. Однако обнаружение пульсаций магнитара SGR J1745–2900, расположенного на проекционном расстоянии 0,1 пк от СМЧД Стрелец A^* [22], указывает на то, что отсутствие большого количества зарегистрированных в ГЦ пульсаров связано не с экранированием, а с физическим недостатком пульсаров в звёздном населении ГЦ [153; 154]. Кроме того, исследования запаздывания сигнала от пульсаров, обращающихся по орбите вокруг СМЧД, важны для определения параметров Стрелец A^* и исследований общей теории относительности [155; 156, например]. Обнаружение пульсаций магнитара SGR J1745–2900 даёт уникальную возможность исследования ближайшего окружения СМЧД.

3.1 Введение

Магнитары — нейтронные звезды с сильными магнитными полями до $B \sim 10^{14}–10^{15}$ Гс, которые являются источником энергии этих звезд. Они проявляют себя как рентгеновские пульсары с периодами $P \simeq (0.3 – 12)$ с и со скоростями замедления $\dot{P} \simeq (10^{-15}–10^{-11})$ с/с. На текущий момент насчитывается 30 магнитаров¹.

Магнитары являются источниками постоянного рентгеновского излучения, состоящего из двух компонент: тепловой, которая может быть представлена как излучение абсолютно чёрного тела с температурой $kT \sim 0.3 – 0.5$ кэВ, и нетепловой, описывающейся степенным законом с фотонным индексом $\Gamma \sim 2 – 4$ [31]. Помимо постоянного излучения, от магнитаров могут регистрироваться мощные рентгеновские вспышки со светимостями, достигающими значения $L_X \sim 10^{47}$ эрг с⁻¹, и длительностью от долей до нескольких сотен секунд [157]. Помимо ярких и коротких вспышек, от магнитаров наблюдаются и значительные повышения постоянного потока, сопровождающиеся последующим медленным падением до начального уровня, которое может длиться от месяцев до нескольких лет (см. обзоры [31; 157]). Проявления вспышечной активности магнитарами предположительно могут быть вызваны деформациями коры нейтронной звезды, так называемыми звёздотрясениями.

Одним из представителей магнитаров является источник SGR J1745–2900. 24 апреля 2013 г. в ходе программы мониторинга области ГЦ телескопом *Burst Alert Telescope (BAT)*, установленным на борту космической обсерватории *Swift* им. Н. Джерельса, была зарегистрирована рентгеновская вспышка от неизвестного источника [158], от которого днём позже был зарегистрирован короткий (~ 32 мс) рентгеновский всплеск [159]. Это событие послужило триггером для серии наблюдений телескопом *Swift/XRT*, с помощью которых было определено, что источник пространственно неразрешим с СМЧД Стрелец A^* , находящейся в центре нашей Галактики [160]. Позже по данным обсерватории *Чандра* были разрешены источники SGR J1745–2900 и Стрелец A^* и определено расстояние между ними в $2''_4$ [22]. Наблюдения SGR J1745–2900 орбитальным телескопом *NuSTAR* выявили пульсации с периодом $P \sim 3.76$ с и скоростью торможения

¹Онлайн каталог магнитаров доступен по адресу: <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>, 24 подтвержденных источника и 6 кандидатов [30]

$\dot{P} \sim 6,5 \cdot 10^{-12}$ с/с [161; 162]. Предполагая, что SGR J1745–2900 — магнитный диполь в вакууме, были сделаны оценки магнитного поля $B \sim 1,6 \cdot 10^{14}$ Гс, энергии скорости торможения $\dot{E} \simeq 5 \cdot 10^{33}$ эрг с⁻¹ и характерного времени торможения $P/2\dot{P} \simeq 9$ тыс. лет [162]. Схожие оценки временных параметров были получены с помощью наблюдений других телескопов как в рентгеновском, так и в радио диапазонах [22; 163–167]. Было показано, что спектр постоянного излучения магнитара можно представить как комбинацию излучения абсолютно чёрного тела с температурой $kT \sim 1$ кэВ и степенного закона с фотонным индексом $\Gamma \sim 1,5$ [162, например]. Длительный мониторинг SGR J1745–2900 телескопом *NuSTAR* и обсерваторией *Чандра* выявил монотонное падение потока магнитара и температуры излучающей области kT [161; 166–168].

SGR J1745–2900 является одним из немногих магнитаров, от которых было зарегистрировано излучение в радио-диапазоне [22; 163; 165; 169]. Исследования радио- и рентгеновского излучения магнитара указывают на то, что SGR J1745–2900 находится на замкнутой орбите вокруг СМЧД Стрелец A^* [22; 170]. Измеренные мера дисперсии, мера вращения, угловое и временное уширения из-за рассеяния содержат информацию об окружении Стрелец A^* и среды, встречающейся на луче зрения [22; 165; 171–173]. Предположительно, магнитар сформировался в результате эволюции массивной звезды, рождённой во время активности звездообразования в плотном газовом диске вокруг Стрельца A^* [22; 170; 174].

В данной главе представлены результаты временного анализа (профили импульса и доля пульсирующего излучения) и фазированной спектроскопии магнитара SGR J1745–2900 по данным наблюдений рентгеновским космическим телескопом *NuSTAR* в течение нескольких месяцев после рентгеновской вспышки, произошедшей в апреле 2013 г. Результаты главы опубликованы в статье [175].

3.2 Наблюдения и обработка данных

После вспышки 24 апреля 2013 г. была проведена программа наблюдений магнитара SGR J1745–2900 космическим телескопом *NuSTAR* (см. Раздел 1.2.2 и [103]) с 26 апреля по 13 августа 2013 г.

Список наблюдений, использованных в данной работе, приведён в Таблице 14. Телескоп *NuSTAR* имеет известную проблему загрязнения данных паразитными лучами, когда детекторы засвечиваются излучением от источников, находящихся вне поля зрения телескопа [104]. Данные модуля *FPMB* были загрязнены в двух последних наблюдениях паразитными лучами от неизвестного источника, поэтому для этих наблюдений мы использовали только данные модуля *FРМА*.

Таблица 14 — Наблюдения телескопа *NuSTAR*, использованные в работе. Значения модифицированной юлианской даты (Modified Julian day, MJD) указаны на начало наблюдения

Порядковый номер	ObsID	Дата	MJD	Экспозиция
1	30001002006	26.04.2013	56408,1	37,1 кс
2	80002013002	27.04.2013	56409,3	49,7 кс
3	80002013004	04.05.2013	56416,7	38,5 кс
4	80002013006	11.05.2013	56423,6	32,6 кс
5	80002013012	14.06.2013	56457,4	26,8 кс
6*	80002013014	07.07.2013	56480,2	8,6 кс
7*	80002013016	07.07.2013	56480,5	21,0 кс

* Наблюдения, для которых были использованы данные только модуля *FРМА*, так как данные модуля *FPMB* были загрязнены боковой засветкой от неизвестного источника.

Времена прихода фотонов были скорректированы на барицентр Солнечной системы с использованием положения источника SGR J1745–2900 с координатами $RA = 17^{\text{h}}45^{\text{m}}40^{\text{s}}.169$, $Dec. = -29^{\circ}00'29''.84$, определёнными с помощью обсерватории *Чандра* [22]. Кривые блеска с временным разрешением 0,05 с и спектры были извлечены из круговой области с радиусом $R = 30''$ и центром в положении SGR J1745–2900 с помощью инструмента *nuproducts*, являющегося частью программного обеспечения *NuSTAR Data Analysis Software package* (NUSTARDAS V.1.8.0), которое встроено в программное обеспечение HEASOFT версии 6.27.2. Фоновое излучение было оценено из более раннего наблюдения области ГЦ телескопом *NuSTAR*, когда магнитар ещё не был активен. При анализе данных использовались калибровочные файлы CALDB версии 1.0.2. Непосредственный кривых блеска и спектров проводился с помощью инструментов XRONOS версии 5.22 и XSPEC версии 12.10.1 [63], входящих в состав пакета HEASOFT версии 6.27.2.

Необходимо отметить, что источник SGR J1745–2900 расположен в непосредственной близости к СМЧД Стрелец A^* , и телескоп *NuSTAR* не может разрешить эти два объекта, что значительно усложняет получение правильной оценки фона. Кроме того, в области ГЦ фоновое излучение пространственно неоднородно. В пределах нескольких угловых минут ГЦ телескоп *NuSTAR* регистрирует рентгеновское излучение от остатка вспышки сверхновой Sgr A East, нетеплового филамента G359.97–0.038, плериона G359.95–0.04, пульсара Cannonball и самой СМЧД Стрелец A^* (см. Рисунок 3.1 и [149, например]), что не позволяет для оценки фона использовать область, свободную от точечных источников и находящуюся в отдалении от магнитара SGR J1745–2900. Поэтому для оценки фона использовалось предыдущее наблюдение области ГЦ, проведённое 4 августа 2012 г. (ObsID = 30001002003, экспозиция 78 кс) телескопом *NuSTAR*, во время которого магнитар SGR J1745–2900 ещё не был в активном состоянии. Целесообразность использования такого способа оценки фона рассмотрена в Разделе 3.4 и в работе Каспи и др. [161]. Кривая блеска фона для разных энергетических диапазонов и спектр были извлечены из той же области неба, которая использовалась для извлечения информации об излучении источника SGR J1745–2900. Статистические неопределённости на все полученные параметры приведены на уровне 1σ , если не указано иное.

3.3 Временной анализ

На первом этапе были получены кривые блеска источника SGR J1745–2900 в трёх энергетических диапазонах 3–5, 5–10 и 10–20 кэВ для всех наблюдений из Таблицы 14. Для построения профилей импульса в этих энергетических диапазонах использовался набор эфемерид, полученных Каспи и др. [161]. Для каждого набора эфемерид значения нулевой эпохи выбирались таким образом, чтобы минимумы профилей импульса совпадали. Кривая блеска каждого наблюдения сворачивалась с соответствующим периодом вращения с помощью программы *efold*.

Полученные профили импульса, представленные на Рисунке 3.2, имеют три ярких пика, которые хорошо прослеживаются до 10 кэВ. Можно заметить, что с течением времени падает интенсивность излучения и сглаживается первый пик.

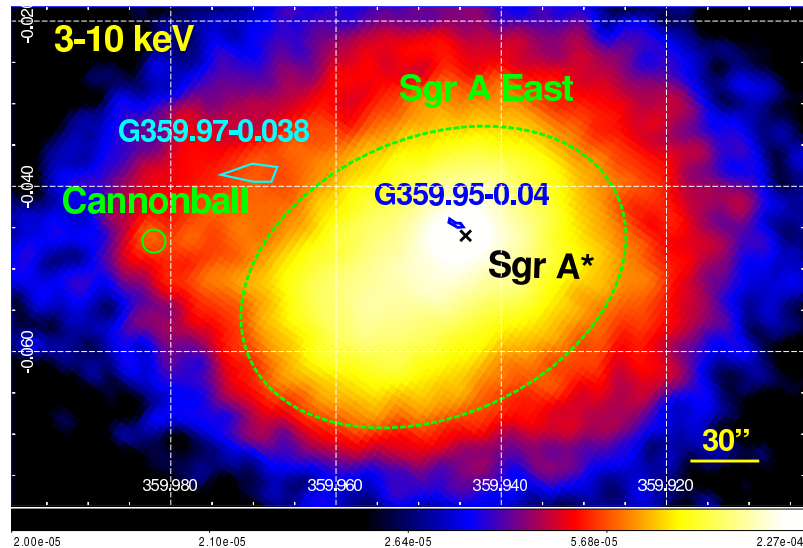


Рисунок 3.1 — Изображение области ГЦ в энергетическом диапазоне 3–10 кэВ по данным телескопа *NuSTAR* 2012 г., представленным в работе Перез и др. [149]. Изображение представлено в единицах потока отсчёты пиксель⁻¹ с⁻¹. Пунктирный овал демонстрирует положение остатка вспышки сверхновой Sgr A East. Крестиком отмечено положение радиоисточника СМЧД Стрелец A*. Пульсар Cannonball показан сплошной окружностью. Синий и голубой полигональные регионы соответствуют положению плериона G359.95–0.04 и нетеплового филамента G359.97–0.038. Координатная сетка соответствует галактическим координатам.

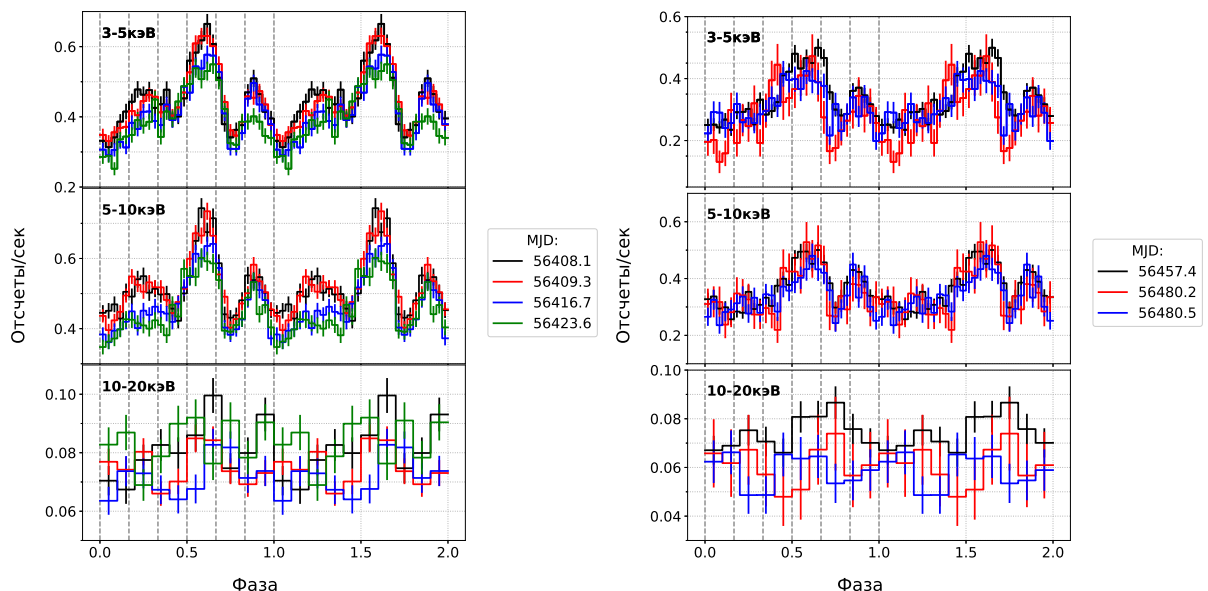


Рисунок 3.2 — Профили импульса SGR J1745–2900 в разных энергетических диапазонах 3–5 (верхние панели), 5–10 (средние) и 10–20 кэВ (нижние) в единицах скорости счёта без вычитания фона. Два цикла приведены для наглядности. Вертикальным пунктиром обозначено разделение на фазовые бины (см. Раздел 3.4.2).

Кроме того, интенсивность первого пика уменьшается в энергетическом диапазоне 5–10 кэВ по сравнению с пиком на энергиях 3–5 кэВ. Из Рисунка 3.2 можно предположить, что на энергиях выше 10 кэВ возможно наличие пульсаций. Однако поиск пульсаций в кривых блеска SGR J1745–2900, полученных для диапазона энергий 10–20 кэВ, с помощью двух методов – Lomb Scargle [176] и статистики Z_n^2 [177], не дал положительного результата и пульсации не были обнаружены с предельными значениями доли пульсирующего излучения 86–100 % в зависимости от наблюдения (см. Рисунок 3.3 и пояснения ниже). Из-за слабой статистики на высоких энергиях нельзя однозначно утверждать, что пульсаций в этом диапазоне нет.

Чтобы оценить долю пульсирующего излучения², предварительно был вычтен фон из кривых блеска источника SGR J1745–2900. Средние скорости счёта фона для диапазонов энергий 3–5, 5–10 и 10–20 кэВ были определены на уровнях $0,097 \pm 0,002$, $0,186 \pm 0,002$, $0,060 \pm 0,001$ отсчётов/с соответственно. Эти значения были вычтены из кривых блеска источника, полученных для каждого наблюдения. Полученные значения доли пульсирующего излучения для энергетических диапазонов 3–5 и 5–10 кэВ (Рисунок 3.3) находятся на уровне около 40 – 50 %, что согласуется с результатами, полученными для энергий до 10 кэВ по данным обсерваторий Чандра и XMM-Ньютон [166; 167]. Также можно заметить, что значения доли пульсирующего излучения для энергий 3–5 и 5–10 кэВ согласуются между собой в пределах одного наблюдения.

Такие высокие значения доли пульсирующего излучения могут указывать на асимметричный случай расположения двух противоположных областей теплового излучения [178]. Однако Ху и др. [179], используя данные 2016 г., когда профиль импульса магнитара претерпел значительные изменения, предположили, что для SGR J1745–2900 наблюдаются две примерно симметричные противоположные области излучения, интенсивность которых отличается больше, чем в ~ 3 раза. Стоит отметить, что Ху и др. [179] использовали несколько другое определение доли пульсирующего излучения, которое систематически даёт более низкие значения по сравнению с определёнными в диссертации.

Для оценки верхнего предела на долю пульсирующего излучения в энергетическом диапазоне 10–20 кэВ было проведено моделирование Монте-Карло марковской цепи [180]. Значения темпа счёта в каждом из фазовых бинов при-

²Доля пульсирующего излучения определялась по формуле $PF = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} — интенсивности излучения в максимуме и минимуме импульса

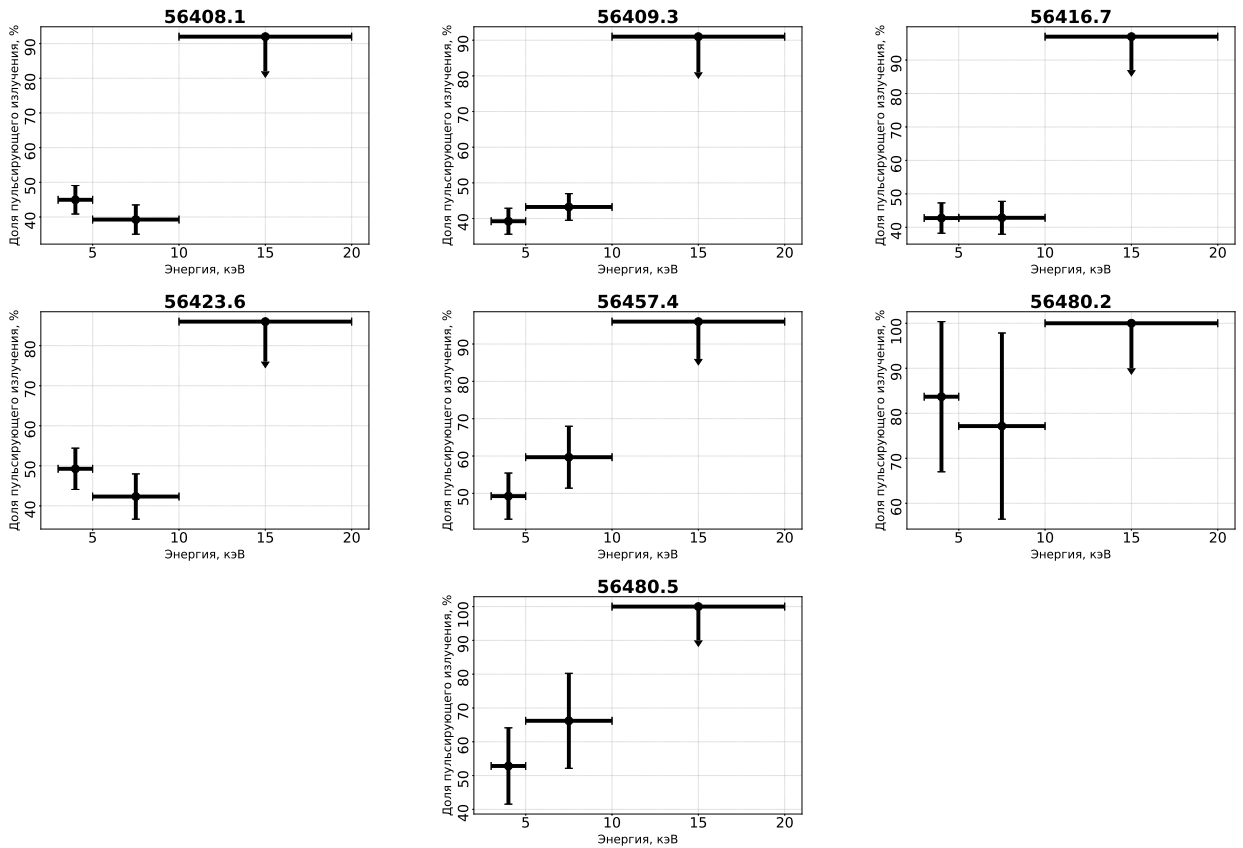


Рисунок 3.3 — Доля пульсирующего излучения, полученная для пяти наблюдений в энергетических диапазонах: 3–5, 5–10 и 10–20 кэВ. MJD каждого наблюдения указана в заголовке рисунков. Стрелки обозначают верхний предел доли пульсирующего излучения на уровне доверительного интервала 90 %.

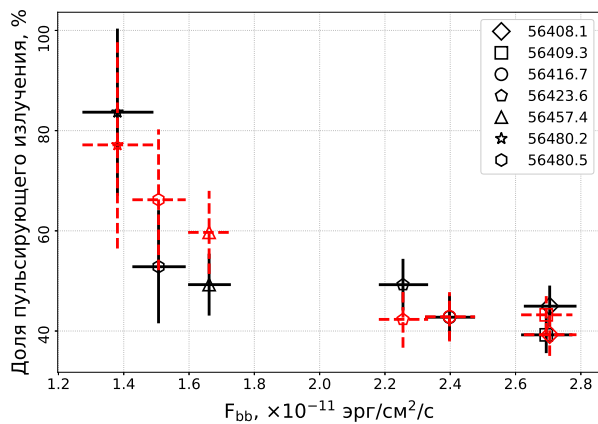


Рисунок 3.4 — Доля пульсирующего излучения, полученная для энергий 3–5 (сплошные линии) и 5–10 кэВ (пунктирные), в зависимости от потока излучения тепловой компоненты VVrad (см. Раздел 3.4).

нимались нормально распределенными со значениями, получаемыми с помощью программы *efold*. Фоновая скорость счёта, определённая выше, предварительно вычиталась из темпа счёта каждого бина. Априорное распределение значений скорости счёта от пульсара в каждой фазе принималось равномерно распределённым в диапазоне 0,0–0,2 отсчёта/с, что заведомо выше регистрируемой скорости счёта в фазовых бинах. Верхний предел на долю пульсирующего излучения принимался равным значению 90 % квантиля для доли пульсирующего излучения апостериорного распределения темпов счёта в фазовых бинах. Полученные величины указаны на Рисунке 3.3 в виде верхних пределов.

Также был построен график зависимости доли пульсирующего излучения от потока излучения тепловой компоненты *BBrad* (Рисунок 3.4 и Раздел 3.4.1), собранного из той же круговой области с радиусом 30'', которая использовалась для кривых блеска. Из Рисунка 3.4 можно заметить, что с уменьшением потока доля пульсирующего излучения, полученная для обоих энергетических диапазонов 3–5 и 5–10 кэВ, увеличивается.

Для описания зависимости доли пульсирующего излучения от энергии и потока были использованы следующие модели:

- доля пульсирующего излучения постоянна $PF = C$,
- доля пульсирующего излучения линейно зависит от светимости $PF = C + F_c * F$,
- доля пульсирующего излучения линейно зависит от светимости и от энергии $PF = C + F_c * F + E_c * E$,

где C — постоянная компонента доли пульсирующего излучения, F_c — коэффициент линейной корреляции доли пульсирующего излучения и потока F в энергетическом диапазоне 3–20 кэВ, E_c — коэффициент линейной корреляции доли пульсирующего излучения и энергии E .

Значения доли пульсирующего излучения были аппроксимированы этими моделями, в результате чего были получены значения правдоподобия данных $\chi^2/d.o.f.$: 36,0/20, 20,1/19, 19,9/18 для каждой из моделей соответственно. Относительные значимости моделей были проверены при помощи критерия перекрестной проверки выборок параметров, полученных методом Монте-Карло с марковскими цепями, на основе алгоритмов «отбрасывания одного события» (leave-one-out, [62]). Критерий показал, что модель линейной зависимости доли пульсирующего излучения от светимости значительно более вероятна, чем модель с постоянной долей пульсирующего излучения $P_{fc}/P_{nc} = 0,978/0,022$,

где P_{fc} — относительная вероятность модели с линейной корреляцией доли пульсирующего излучения от потока, а P_{nc} — относительная вероятность модели с постоянной долей пульсирующего излучения. Модель, дополнительно включающая линейную зависимость доли пульсирующего излучения от энергии и светимости с относительной вероятностью $P_{ec\&fc}$, оказалась статистически сопоставима с моделью в которой зависимости от энергии нет: $P_{ec\&fc}/P_{fc} = 0,41/0,59$.

3.4 Спектральный анализ

Фазированная спектроскопия излучения пульсирующих источников является важным методом исследования механизмов формирования излучения. Область неба, содержащая магнитар SGR J1745–2900, является очень густонаселенной, что значительно усложняет анализ данных. Перед тем как перейти к фазированной спектроскопии магнитара, необходимо убедиться в правильности используемой процедуры спектрального анализа. Для этого были исследованы средние спектры каждого наблюдения, а полученные результаты были проверены на соответствие результатам, полученным ранее другими авторами.

3.4.1 Усреднённые спектры

Спектры источника извлекались из той же области неба, что и кривые блеска. В качестве фона использовалось предыдущее наблюдение области ГЦ и та же область, которые ранее были выбраны для определения фона для кривых блеска (см. Раздел 3.3). Стоит отметить, что в работе Каспи и др. [161] был рассмотрен и другой, более сложный способ, позволяющий оценить фоновое излучение для каждого наблюдения, и было показано, что результаты в обоих случаях согласуются между собой. Поэтому в диссертации был использован наиболее оптимальный подход, описанный выше.

Каждый спектр был сгруппирован с помощью инструмента *grppha*, который является частью программного обеспечения HEASOFT, с минимальным значением отсчётов в бине, равным 25. В работах ряда авторов [161; 162; 167, например]

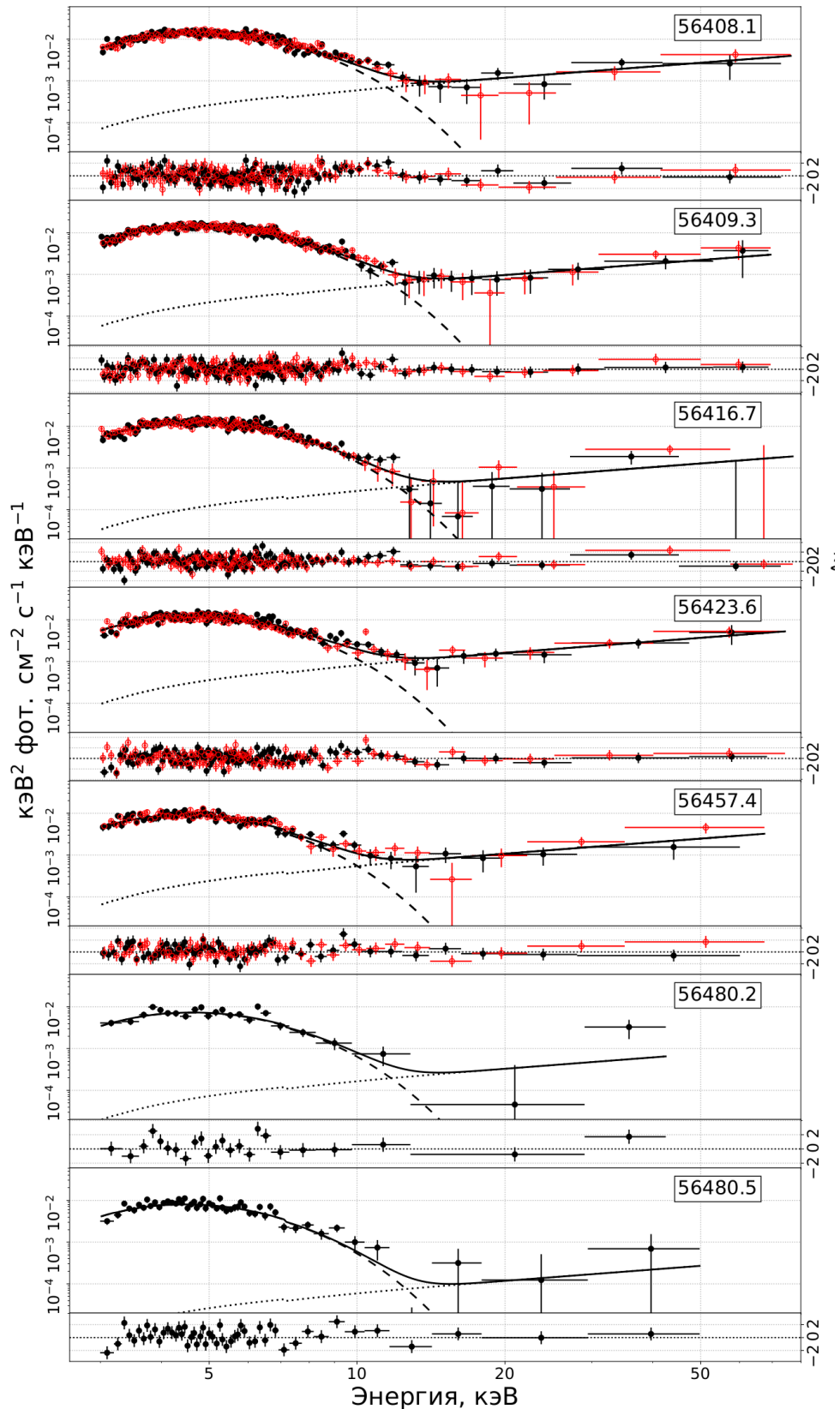


Рисунок 3.5 — Спектр источника SGR J1745–2900, измеренный в разных наблюдениях, MJD начала которых приведены на графиках. Чёрным и красным цветами отмечены данные модулей *FPMA* и *FPMB* телескопа *NuSTAR* соответственно. Сплошной, пунктирной и точечной линиями обозначены модели: суммарная, излучения абсолютно чёрного тела и степенного закона.

было показано, что спектры источника наилучшим образом могут быть описаны комбинацией компонент излучения абсолютно чёрного тела (*BBrad*) и степенного закона (*power – law*) с учетом поглощения N_H . Для учёта межзвёздного поглощения использовалась модель *TBabs* с обилием из работы Вилмса и др. [147] и сечениями из работы Вернер и др. [148].

Таблица 15 — Наилучшие значения свободных параметров при совместной аппроксимации моделью $TBabs * (BBrad + power - law)$ спектров источника SGR J1745–2900, извлеченных из круговой области с радиусом $30''$.

MJD	kT , кэВ	R_{BB} , км	N_{pow} , 10^{-13} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{кэВ}^{-1}$	C_{AB}
56408,0	$1,00 \pm 0,02$	$1,72^{+0,10}_{-0,09}$	$1,03^{+0,32}_{-0,26}$	$0,98 \pm 0,03$
56409,3	$0,99 \pm 0,02$	$1,74^{+0,10}_{-0,08}$	$0,84^{+0,25}_{-0,21}$	$1,00 \pm 0,04$
56416,7	$0,97 \pm 0,02$	$1,73^{+0,10}_{-0,09}$	$0,49^{+0,21}_{-0,19}$	$0,98 \pm 0,03$
56423,6	$0,95 \pm 0,02$	$1,78^{+0,13}_{-0,11}$	$1,40^{+0,35}_{-0,30}$	$0,96 \pm 0,04$
56457,4	$0,88 \pm 0,02$	$1,85^{+0,17}_{-0,14}$	$0,94^{+0,28}_{-0,24}$	$1,01 \pm 0,05$
56480,2	$0,93 \pm 0,06$	$1,46^{+0,28}_{-0,20}$	$0,29^{+0,46}_{-0,29}$	—
56480,5	$0,89 \pm 0,03$	$1,72^{+0,22}_{-0,17}$	$0,10^{+0,29}_{-0,10}$	—

C_{AB} — константа кросс-калибровки между данными модулей *FPMA* и *FPMB* телескопа *NuSTAR*, определенная для каждого наблюдения индивидуально.

Нормировка степенного закона N_{pow} приведена для энергии 10 кэВ.

Спектры всех наблюдений аппроксимировались совместно в предположении, что значение поглощения N_H и фотонный индекс Γ не меняются от наблюдения к наблюдению. Необходимо отметить, что на начальном этапе для каждой пары спектров модулей *FPMA* и *FPMB* телескопа *NuSTAR*, относящихся к одному наблюдению, были определены параметры кросс-калибровки C_{AB} спектров модуля *FPMB* по отношению к спектрам модуля *FPMA*, которые были зафиксированы в процессе аппроксимации всех спектров (см. точные значения в Таблице 15). Значения температуры kT и радиуса излучающей области R_{BB} , относящиеся к модели *BBrad*, и нормировки степенного закона N_{pow} были связаны внутри одного наблюдения для обоих модулей, но свободны относительно разных наблюдений. В результате аппроксимации моделью $TBabs * (BBrad + power - law)$ были получены наилучшие значения $N_H = (11,5 \pm 0,8) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и $\Gamma = 1,11^{+0,26}_{-0,24}$ с приведённым значением $\chi^2_{red}/d.o.f. = 1,05/2229$ (Рисунок 3.5). Наилучшие значения изменяющихся параметров приведены в Таблице 15.

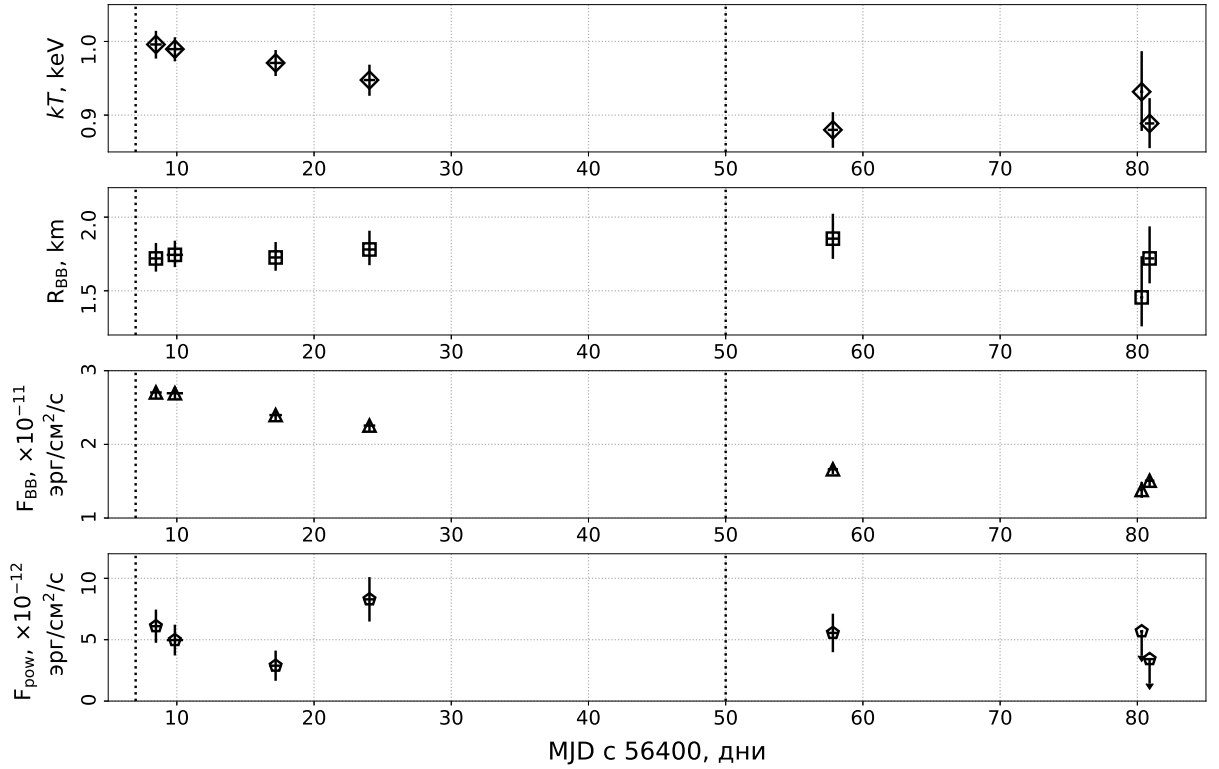


Рисунок 3.6 — Зависимости параметров средних спектров kT , R_{BB} , F_{BB} и F_{pow} от эпохи MJD, взятой на середину наблюдения, изображенные на графиках сверху вниз соответственно. Чёрным пунктиром обозначены времена вспышек, зарегистрированные *Swift*/BAT 25 апреля [159] и 7 июня [160].

На Рисунке 3.6 показана временная эволюция параметров kT , R_{BB} и поглощённых потоков, вычисленных с помощью команды `sflux` для тепловой и нетепловой компонент модели, которые были обозначены как F_{BB} и F_{pow} соответственно. На масштабе ~ 80 дней хорошо видно падение температуры kT на $\sim 10\%$ и потока F_{BB} на $\sim 40\%$. При этом параметр R_{BB} в пределах ошибок измерений остается практически неизменным на этом временном интервале, хотя на более длительном масштабе наблюдений уменьшение R_{BB} становится заметным [166–168]. Возможно, такая тенденция начинает сказываться уже в конце исследуемого временного интервала (Рисунок 3.6), однако большие ошибки на R_{BB} в двух последних наблюдениях не позволяют сделать однозначный вывод. Последнее означает, что на масштабе ~ 80 дней не наблюдается изменение площади излучающей области A от светимости L_{BB} , предсказанной моделью раскручивающейся магнитосферы нейтронной звезды [181] в виде: $A \sim L_{BB}^{1/2}$, которая является наиболее рабочей моделью для объяснения такого медленного затухания излуче-

ния магнитара [161; 162; 166; 167]. Стоит отметить, что возможное уменьшение радиуса излучающей области может объяснить увеличение доли пульсирующего излучения с уменьшением потока [182, например].

Полученные результаты в целом согласуются с результатами работы Каспи и др. [161]. Оценка поглощения $N_{\text{H}} = (11,5 \pm 0,8) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, полученная в диссертации, оказалась несколько меньше значения, полученного Каспи и др. $N_{\text{H}} = (13,5 \pm 0,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ [161], хотя согласуется на лучшем уровне, чем 2σ . Возможно, это связано с тем, что Каспи и др. [161] использовали большее количество наблюдений. Кроме того, полученные оценки температуры излучающей области kT оказались несколько выше, а оценки радиуса $R_{\text{ВВ}}$ ниже оценок этих параметров по данным обсерватории Чандра [166; 167]. Возможно, это связано с тем, что рабочий диапазон обсерватории Чандра более мягкий (0,3–8,0 кэВ), и указанными авторами не учитывалась степенная компонента в спектральной модели излучения магнитара.

Таким образом, можно заключить, что процедура обработки данных корректна, и перейти к фазированной спектроскопии.

3.4.2 Фазово-разрешённые спектры

Наблюдаемый профиль импульса был разделён на шесть равных фаз так, чтобы на каждые максимум и минимум приходилось по одному фазовому бину (Рисунок 3.2). Спектр источника, полученный в каждом фазовом бине, был аппроксимирован применявшейся к средним спектрам моделью $TBabs * (BBrad + power - law)$, при этом поглощение и фотонный индекс были зафиксированы на значениях $N_{\text{H}} = 11,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и $\Gamma = 1,11$, определенных ранее.

Наблюдения, для которых были доступны только данные модуля *FPMA* (наблюдения 6 и 7 в Таблице 14), не обладают достаточной статистикой для качественной аппроксимации фазовых спектров ($d.o.f. \sim 10 - 40$ значительно ниже, чем в остальных наблюдениях $d.o.f. \gtrsim 100$), поэтому они были исключены из фазово-разрешённого анализа. Полученные результаты представлены на Рисунке 3.7.

Чтобы понять, насколько сильно изменяется конкретный параметр с фазой, каждый набор значений для всех наблюдений был аппроксимирован постоянной

функцией. Таким образом, был сделан вывод, что температура излучающей области kT почти не меняется с фазой ($\chi_{\text{red}}^2 \leq 1$ для наблюдений 1–3 и $\chi_{\text{red}}^2 \approx 2$ для наблюдений 4 и 5, номера наблюдений соответствуют указанным в Таблице 14), а вот её радиус $R_{\text{ВВ}}$ меняется с фазой импульса более значительно ($\chi_{\text{red}}^2 > 2$ для всех наблюдений, кроме наблюдения 5, где $\chi_{\text{red}}^2 = 1,55$). Визуально заметно, что вариации $R_{\text{ВВ}}$ повторяют форму профиля импульса, что можно обосновать простой геометрией (т. е. наибольшая площадь, ответственная за формирование теплового излучения, видна в максимумах профиля импульса, наименьшая — в минимумах). Принимая во внимание отмеченную выше зависимость доли пульсирующего излучения от потока, можно было бы ожидать сходных зависимостей и для параметров тепловой компоненты. Однако проведённый анализ не обнаружил значимых изменений амплитуды переменности параметров kT и $R_{\text{ВВ}}$ в зависимости от потока тепловой компоненты $F_{\text{ВВ}}$, что может быть связано со значительными ошибками на их значения.

Стоит отметить значительное увеличение $R_{\text{ВВ}}$ во втором фазовом бине последнего наблюдения. Интересно, что в этом же фазовом бине в последнем наблюдении первый пик профиля импульса практически исчезает. Кроме того, в этой же области можно заметить пониженное значение kT . Последнее может быть связано как с физическими причинами, так и с возможной антикорреляцией параметров модели, однако из-за не очень высокой статистики сделать каких-то однозначных выводов не представляется возможным.

Поток, излучённый нетепловым образом F_{pow} , практически не меняется с фазой, что может свидетельствовать о формировании нетеплового излучения в других областях по отношению к горячим пятнам, либо о недостаточной статистике для регистрации его переменности.

3.5 Заключение

Магнитар SGR J1745–2900 являлся объектом большого количества наблюдений с начала его активности в апреле 2013 г. В частности, программа наблюдений космического телескопа *NuSTAR* предоставила хорошую возможность изучить рентгеновское излучение этого объекта на энергиях от 10 кэВ. Эти наблюдения позволили провести временной и спектральный анализы по данным

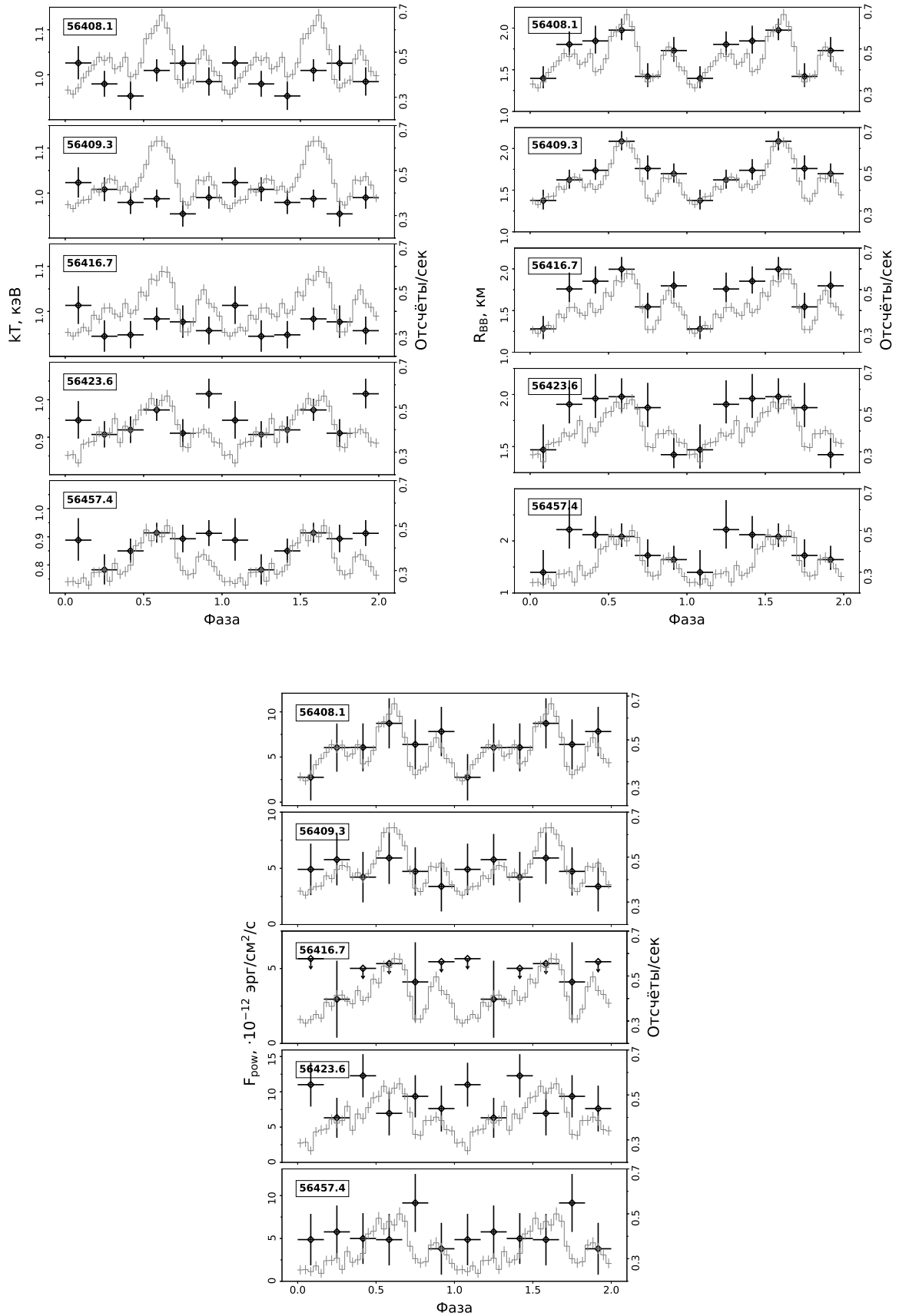


Рисунок 3.7 — Изменения спектральных параметров в зависимости от фазы импульса и наблюдения (сверху вниз). Серым цветом и правой шкалой обозначены соответствующие профили импульса в энергетическом диапазоне 3–5 кэВ. Два цикла приведены для наглядности.

телескопа *NuSTAR* (см. ссылки выше в тексте), однако результаты фазированной спектроскопии были кратко приведены только по первому наблюдению [162].

В настоящей работе по данным орбитального телескопа *NuSTAR* впервые проведена подробная фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 в широком диапазоне энергий для состояний с разным уровнем интенсивности излучения источника. В результате были найдены значимые изменения видимых размеров области, отвечающей за тепловое излучение, коррелирующие с профилем импульса в диапазоне энергий 3–5 кэВ. Температура излучающей области значимо не изменялась с рентгеновским импульсом, при этом в среднем уменьшалась с уменьшением интенсивности источника. К сожалению, магнитар SGR J1745–2900 — слишком слабый источник, чтобы можно было провести подробную фазированную спектроскопию для нетеплового излучения. Не было обнаружено значимых изменений в полном потоке степенной компоненты с зафиксированным значением фотонного индекса $\Gamma = 1,11$, однако имеющаяся статистика не позволяет однозначно утверждать, что нетепловая компонента точно не пульсирует.

Помимо фазированной спектроскопии была определена доля пульсирующего излучения для двух энергетических диапазонов 3–5 и 5–10 кэВ на уровне $\sim 40 - 50\%$. Найдены указания на значимое увеличение доли пульсирующего излучения с уменьшением потока магнитара, в то время как зависимость от энергии значимо не определяется, что предположительно связано с возможным уменьшением радиуса области генерации теплового излучения.

Заключение

Диссертация посвящена исследованию рентгеновского излучения диффузной среды и звёздных остатков центральной части Галактики. Данное исследование дополняет картину формирования рентгеновского излучения этих объектов и возможной активности СМЧД Стрелец A^* в прошлом.

В рамках диссертации была впервые получена 17-летняя эволюция рентгеновского потока молекулярного облака Стрелец Б2 на энергиях выше 17 кэВ по данным обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Было показано, что кривая блеска потока излучения Стрельца Б2 в энергетическом диапазоне 30–80 кэВ согласуется как с простым линейным законом, так и с кусочно-линейным. Последний предполагает наличие двух различимых фаз: линейного спада до 2011 г. и постоянного излучения с 2011 по 2019 гг. Обнаружено согласие спектральных форм каждой фазы. Для объяснения природы излучения Стрельца Б2 была проведена работа по анализу различных физических гипотез. Предположительно, излучение фазы линейного спада вызвано рентгеновским отражением возможной вспышки на СМЧД Стрелец A^* , что было подтверждено временным и спектральным анализом. Полученная по спектру фазы постоянного излучения оценка степени ионизации КЛ (протонов), которая оказалась значительно выше предыдущих оценок, позволила определить этот сценарий как маловероятный. Также был сделан вывод о том, что источники жёсткого рентгеновского излучения, зарегистрированные в исследуемой области Стрельца Б2 обсерваторией *NuSTAR*, могут объяснить лишь половину излучения, наблюдаемого *ИНТЕГРАЛ* во время постоянной фазы. Кроме того, отражение ещё одной вспышки или сценарий многократных рассеяний также выдвигаются как возможные причины остаточного излучения облака Стрелец Б2. Также не может быть отвергнуто предположение о том, что на протяжении всего периода наблюдений обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* наблюдается линейное понижение излучения, согласующееся со сценарием прошлой активности СМЧД Стрелец A^* .

По данным телескопа *NuSTAR* было показано наличие протяжённого нетеплового излучения молекулярного облака в окрестности скопления Арки в 2016 г. Обнаружено возможное указание на выход этого излучения на постоянный уровень потока после 2015 г. Однако, уровень потока, измеренный в 2016 г., согласуется и с продолжающимся линейным затуханием излучения облака. Получены

наиболее глубокая карта и широкополосный спектр области скопления Арки, которые позволили уточнить некоторые параметры нетеплового излучения облака Арки. Впервые проведённый спектральный анализ отдельных областей облака показал, что их излучение имеет отличающиеся спектральные параметры, которые могут быть объяснены различным расположением этих областей на луче зрения и/или двумя разными вспышками Стрельца A^* .

Таким образом было показано, что излучение молекулярных облаков предположительно достигло своего постоянного уровня потока, что может быть связано с изменением режима формирования излучения. Регулярные наблюдения молекулярных облаков в рентгеновском континууме и флуоресцентной линии 6,4 кэВ помогут определить природу и физические свойства наблюдаемого излучения. Также измерения поляризации отражённого излучения молекулярных облаков способны помочь в определении точной геометрии расположения источника рентгеновской вспышки и облаков и проверить гипотезу о прошлой активности СМЧД Стрелец A^* , что в будущем, возможно, предоставит недавно запущенная поляриметрическая обсерватория *IXPE* [183].

Впервые была исследована крупномасштабная морфология остатка вспышки сверхновой RX J1713.7–3946 на энергиях выше 17 кэВ с помощью наблюдений гамма-обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Также была построена карта распределения поверхностной яркости RX J1713.7–3946 по данным рентгеновской обсерватории *ХММ-Ньютон* на энергиях до 10 кэВ. Было обнаружено хорошее согласие карт по данным обсерваторий *ХММ-Ньютон* и *ИНТЕГРАЛ*. Пространственный анализ этих изображений показал, что положения ударных волн на низких и высоких энергиях совпадают, что указывает на единый механизм излучения. Впервые был измерен наклон степенного закона спектра излучения RX J1713.7–3946 в энергетическом диапазоне 17–120 кэВ $\Gamma = 3,13_{-0,33}^{+0,36}$. Показано, что RX J1713.7–3946 демонстрирует укрупнение спектра с ростом энергии, что согласуется с аналитической моделью излучения электронов, ускоренных на ударной волне в режиме диффузии, близком боровскому.

На данный момент для этого остатка вспышки сверхновой остаётся неизвестным спектр в переходном диапазоне от сотен кэВ до нескольких ТэВ, измерения которого помогли бы ограничить модель ускорения КЛ на расширяющихся оболочках. Кроме того, остаётся неизвестной детальная морфология RX J1713.7–3946 на энергиях от 10 кэВ. Таким образом, наблюдения RX J1713.7–3946 с хорошим угловым разрешением на высоких энергиях необходимы для даль-

нейшего исследования механизмов формирования излучения остатков вспышек сверхновых.

Наблюдения магнитара SGR J1745–2900, находящегося в непосредственной близости к СМЧД Стрелец A^* , телескопом *NuSTAR* позволили провести фазированную спектроскопию рентгеновского излучения этого объекта. Было 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. Обнаружение новых магнитаров и исследование их рентгеновских вспышек помогут в исследовании процессов формирования магнитаров и их излучения. Кроме того, исследование объектов, находящихся в непосредственной близости к СМЧД как этот магнитар, является важным для определения популяции звёздного населения ГЦ.

Благодарности

Автор выражает большую благодарность и большую признательность научным руководителям Лутовинову А. А. и Кривоносу Р. А. за научное руководство, обучение методам работы с данными, постановке интересных научных задач, помощь в интерпретации результатов и доведении исследований до завершённого состояния. Также автор благодарит Чуразова Е. М. и Хабибуллина И. И. за обсуждение результатов и полезные предложения, которые помогли улучшить научную часть исследовательской работы. Автор выражает благодарность Татищеву В. за помощь в оценке скорости ионизации КЛ и Клавель М. за вклад в статьи по молекулярным облакам. Также автор благодарит всех соавторов и анонимных рецензентов публикаций, посвящённых теме диссертации, за их полезные комментарии и предложения по улучшению качества публикаций. Также автор выражает благодарность Семене А. Н., Лысковой Н. С., Мереминскому И. А. и Штыковскому А. Е. за помощь в течение всех лет обучения в аспирантуре, интересные обсуждения научных проблем и приятную компанию. Автор выражает особую признательность своим родителям за пробуждение интереса к науке и за поддержку во всех жизненных ситуациях.

Список литературы

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. *Gravity Collaboration, Abuter R. [et al.]*. Mass distribution in the Galactic Center based on interferometric astrometry of multiple stellar orbits // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Jan. — Vol. 657. — P. L12.
3. *Akiyama K. [et al.]*. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. VI. Testing the Black Hole Metric // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2022. — May. — Vol. 930, no. 2. — P. L17.
4. *Baganoff F. K. [et al.]*. Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic Centre // *Nature*. — 2001. — Sep. — Vol. 413, no. 6851. — Pp. 45–48.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *Ponti G. [et al.]*. Traces of Past Activity in the Galactic Centre // *Cosmic Rays in Star-Forming Environments* / Ed. by Diego F. Torres, Olaf Reimer. — Vol. 34. — 2013. — Jan. — P. 331.
9. *Terrier R. [et al.]*. An X-ray survey of the central molecular zone: Variability of the Fe K α emission line // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — May. — Vol. 612. — P. A102.

10. *Morris M., Serabyn E.* The Galactic Center Environment // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1996. — Jan. — Vol. 34. — Pp. 645–702.
11. *Dogiel V. A. [et al.]*. Particle Propagation in the Galactic Center and Spatial Distribution of Non-Thermal X-Rays // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2009. — Oct. — Vol. 61. — P. 1093.
12. *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.
13. *Dogiel V. A. [et al.]*. The Origin of the 6.4 keV Line Emission and H₂ Ionization in the Diffuse Molecular Gas of the Galactic Center Region // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2013. — Jul. — Vol. 771, no. 2. — P. L43.
14. *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.
15. *Tatischeff V.* X- and Gamma-Ray Line Emission Processes // *EAS Publications Series / Ed. by Christian Motch, Jean-Marie Hameury*. — Vol. 7 of *EAS Publications Series*. — 2003. — Jan. — P. 79.
16. *Dogiel V. [et al.]*. Origin of 6.4keV Line Emission from Molecular Clouds in the Galactic Center // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2009. — Aug. — Vol. 61. — P. 901.
17. *Yusef-Zadeh F. [et al.]*. Interacting cosmic rays with molecular clouds: a bremsstrahlung origin of diffuse high-energy emission from the inner 2°×1° of the Galactic center // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Dec. — Vol. 762, no. 1. — P. 33.
18. *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.
19. *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.

20. *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.
21. *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.
22. *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.
23. *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.
24. *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.
25. *Thompson C., Duncan R. C.* Neutron Star Dynamos and the Origins of Pulsar Magnetism // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — May. — Vol. 408. — P. 194.
26. *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.
27. *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.
28. *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.

29. *Paumard T. [et al.]*. The Two Young Star Disks in the Central Parsec of the Galaxy: Properties, Dynamics, and Formation // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — Jun. — Vol. 643, no. 2. — Pp. 1011–1035.
30. *Olausen S. A., Kaspi V. M.* The McGill Magnetar Catalog // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2014. — May. — Vol. 212, no. 1. — P. 6.
31. *Kaspi V. M., Beloborodov A. M.* Magnetars // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — Aug. — Vol. 55, no. 1. — Pp. 261–301.
32. *Markevitch M., Sunyaev R. A., Pavlinsky M.* Two sources of diffuse X-ray emission from the Galactic Centre // *Nature*. — 1993. — Jul. — Vol. 364, no. 6432. — Pp. 40–42.
33. *Sunyaev R., Churazov E.* Equivalent width, shape and proper motion of the iron fluorescent line emission from molecular clouds as an indicator of the illuminating source X-ray flux history // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1998. — Jul. — Vol. 297. — Pp. 1279–1291.
34. *Koyama K. [et al.]*. ASCA View of Our Galactic Center: Remains of Past Activities in X-Rays? // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 1996. — Apr. — Vol. 48. — Pp. 249–255.
35. *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.
36. *Reid M. J. [et al.]*. A Trigonometric Parallax of Sgr B2 // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Nov. — Vol. 705, no. 2. — Pp. 1548–1553.
37. *Walls M. [et al.]*. Examining molecular clouds in the Galactic Centre region using X-ray reflection spectra simulations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Dec. — Vol. 463. — Pp. 2893–2903.
38. *Clavel M. [et al.]*. Echoes of multiple outbursts of Sagittarius A* revealed by Chandra // *Astronomy & Astrophysics*. — 2013. — Oct. — Vol. 558. — P. A32.
39. *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.

40. *Chuard D. [et al.]*. Glimpses of the past activity of Sgr A inferred from X-ray echoes in Sgr C // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Feb. — Vol. 610. — P. A34.
41. *Kuznetsova E. [et al.]*. Sgr B2 hard X-ray emission with INTEGRAL after 2009: still detectable? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Jan. — Vol. 509, no. 2. — Pp. 1605–1613.
42. *Lebrun F. [et al.]*. ISGRI: The INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Nov. — Vol. 411. — Pp. L141–L148.
43. *Ubertini P. [et al.]*. IBIS: The Imager on-board INTEGRAL // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Nov. — Vol. 411. — Pp. L131–L139.
44. *Winkler C. [et al.]*. The INTEGRAL mission // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Nov. — Vol. 411. — Pp. L1–L6.
45. *Huettemeister S. [et al.]*. A multilevel study of ammonia in star-forming regions. VI. The envelope of Sagittarius B2. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1995. — Feb. — Vol. 294. — Pp. 667–676.
46. *Schmiedeke A. [et al.]*. The physical and chemical structure of Sagittarius B2. I. Three-dimensional thermal dust and free-free continuum modeling on 100 au to 45 pc scales // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Apr. — Vol. 588. — P. A143.
47. *Eckert D. [et al.]*. South-West extension of the hard X-ray emission from the Coma cluster // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Aug. — Vol. 470. — Pp. 835–841.
48. *Eckert D. [et al.]*. INTEGRAL discovery of non-thermal hard X-ray emission from the Ophiuchus cluster // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Feb. — Vol. 479. — Pp. 27–34.
49. *Lutovinov A. A. [et al.]*. X-Ray Observations of the Coma Cluster in a Broad Energy Band with the INTEGRAL, RXTE, and ROSAT Observatories // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Nov. — Vol. 687. — Pp. 968–975.

50. Krivonos R. [et al.]. INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-ray Survey. I. Image reconstruction // *Astronomy & Astrophysics*. — 2010. — Sep. — Vol. 519. — P. A107.
51. Krivonos R. [et al.]. INTEGRAL/IBIS nine-year Galactic hard X-ray survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Sep. — Vol. 545. — P. A27.
52. Churazov E [et al.]. Cobalt-56 γ -ray emission lines from the type Ia supernova 2014J // *Nature*. — 2014. — Aug. — Vol. 512, no. 7515. — Pp. 406–408.
53. Krivonos R. A. [et al.]. New hard X-ray sources discovered in the ongoing INTEGRAL Galactic plane survey after 14 yr of observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — May. — Vol. 470, no. 1. — Pp. 512–516.
54. Churazov E. [et al.]. INTEGRAL observations of the cosmic X-ray background in the 5-100 keV range via occultation by the Earth // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — May. — Vol. 467, no. 2. — Pp. 529–540.
55. Madsen K. K. [et al.]. Measurement of the Absolute Crab Flux with NuSTAR // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — May. — Vol. 841, no. 1. — P. 56.
56. Oh K. [et al.]. The 105-Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — Mar. — Vol. 235, no. 1. — P. 4.
57. Caballero I. [et al.]. INTEGRAL IBIS/ISGRI energy calibration in OSA 10 // *arXiv e-prints*. — 2013. — Apr. — P. arXiv:1304.1349.
58. Revnivtsev M. G. [et al.]. A Hard X-ray Survey of the Galactic-Center Region with the IBIS Telescope of the INTEGRAL Observatory: A Catalog of Sources // *Astronomy Letters*. — 2004. — Jun. — Vol. 30. — Pp. 382–389.
59. Bélanger G. [et al.]. A Persistent High-Energy Flux from the Heart of the Milky Way: INTEGRAL's View of the Galactic Center // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — Jan. — Vol. 636, no. 1. — Pp. 275–289.
60. 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.

61. *Krivonos R. [et al.]*. INTEGRAL/IBIS all-sky survey in hard X-rays // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Nov. — Vol. 475, no. 2. — Pp. 775–784.
62. *Vehtari A. [et al.]*. Bayesian Leave-One-Out Cross Validation Approximations for Gaussian Latent Variable Models // *Journal of Machine Learning Research*. — 2014. — 12. — Vol. 17.
63. *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by G. H. Jacoby, J. Barnes. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1996. — P. 17.
64. *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.
65. *Feldman U.* Elemental abundances in the upper solar atmosphere. // *Physica Scripta*. — 1992. — Sep. — Vol. 46, no. 3. — Pp. 202–220.
66. *Inui T. [et al.]*. Time Variability of the Neutral Iron Lines from the Sagittarius B2 Region and Its Implication of a Past Outburst of Sagittarius A // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2009. — Jan. — Vol. 61. — P. S241.
67. *Nobukawa M. [et al.]*. New Evidence for High Activity of the Supermassive Black Hole in our Galaxy // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2011. — Oct. — Vol. 739, no. 2. — P. L52.
68. *Kuznetsova E. [et al.]*. 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. — Apr. — Vol. 484, no. 2. — Pp. 1627–1636.
69. *Rogers F. [et al.]*. New Constraints on Cosmic Particle Populations at the Galactic Center using X-ray Observations of the Molecular Cloud Sagittarius B2 // *arXiv e-prints*. — 2021. — Aug. — P. arXiv:2108.13399.
70. *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.

71. *Porquet D. [et al.]*. XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from Sgr A* // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Aug. — Vol. 407. — Pp. L17–L20.
72. *Porquet D. [et al.]*. X-ray hiccups from Sagittarius A* observed by XMM-Newton. The second brightest flare and three moderate flares caught in half a day // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Sep. — Vol. 488, no. 2. — Pp. 549–557.
73. *Nowak M. A. [et al.]*. Chandra/HETGS Observations of the Brightest Flare Seen from Sgr A* // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Nov. — Vol. 759, no. 2. — P. 95.
74. *Degenaar N. [et al.]*. The X-Ray Flaring Properties of Sgr A* during Six Years of Monitoring with Swift // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Jun. — Vol. 769, no. 2. — P. 155.
75. *Neilsen J. [et al.]*. A Chandra/HETGS Census of X-Ray Variability from Sgr A* during 2012 // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Sep. — Vol. 774, no. 1. — P. 42.
76. *Barrière N. M. [et al.]*. NuSTAR Detection of High-energy X-Ray Emission and Rapid Variability from Sagittarius A* Flares // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — May. — Vol. 786, no. 1. — P. 46.
77. *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.
78. *Dogiel V. A. [et al.]*. Spectrum of Relativistic and Subrelativistic Cosmic Rays in the 100 pc Central Region // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Aug. — Vol. 809, no. 1. — P. 48.
79. *Odaka H. [et al.]*. X-Ray Diagnostics of Giant Molecular Clouds in the Galactic Center Region and Past Activity of Sgr A* // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Oct. — Vol. 740, no. 2. — P. 103.
80. *Molaro M., Khatri R., Sunyaev R. A.* Probing the clumping structure of giant molecular clouds through the spectrum, polarisation and morphology of X-ray reflection nebulae // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — May. — Vol. 589. — P. A88.

81. *Sazonov S. [et al.]*. The Galactic LMXB Population and the Galactic Centre Region // *New Astronomy Review*. — 2020. — Jun. — Vol. 88. — P. 101536.
82. *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.
83. *Berezhko E. G., Ellison Donald C.* A Simple Model of Nonlinear Diffusive Shock Acceleration // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — Nov. — Vol. 526, no. 1. — Pp. 385–399.
84. *Lis D. C., Goldsmith P. F.* Modeling of the Continuum and Molecular Line Emission from the Sagittarius B2 Molecular Cloud // *The Astrophysical Journal*. — 1990. — Jun. — Vol. 356. — P. 195.
85. *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.
86. *Dogiel V. [et al.]*. K-Shell Emission of Neutral Iron Line from Sagittarius B2 Excited by Subrelativistic Protons // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2011. — Jun. — Vol. 63. — P. 535.
87. *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.
88. *Cotera A. S. [et al.]*. The Discovery of Hot Stars near the Galactic Center Thermal Radio Filaments // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — Apr. — Vol. 461. — P. 750.
89. *Serabyn E., Shupe D., Figer D. F.* An extraordinary cluster of massive stars near the centre of the Milky Way // *Nature*. — 1998. — Jul. — Vol. 394. — Pp. 448–451.
90. *Figer D. F. [et al.]*. Hubble Space Telescope/NICMOS Observations of Massive Stellar Clusters near the Galactic Center // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — Nov. — Vol. 525. — Pp. 750–758.

91. *Figer D. F. [et al.]*. Massive Stars in the Arches Cluster // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Dec. — Vol. 581. — Pp. 258–275.
92. *Yusef-Zadeh F. [et al.]*. Detection of X-Ray Emission from the Arches Cluster near the Galactic Center // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — May. — Vol. 570. — Pp. 665–670.
93. *Wang Q. D., Dong H., Lang C.* The interplay between star formation and the nuclear environment of our Galaxy: deep X-ray observations of the Galactic centre Arches and Quintuplet clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Sep. — Vol. 371. — Pp. 38–54.
94. *Capelli R. [et al.]*. Discovery of X-ray flaring activity in the Arches cluster // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — an. — Vol. 525. — P. L2.
95. *Tsujimoto M., Hyodo Y., Koyama K.* Suzaku Spectroscopic Study of Hard X-Ray Emission in the Arches Cluster // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2007. — Jan. — Vol. 59. — Pp. 229–235.
96. *Capelli R. [et al.]*. Fe K α line emission from the Arches cluster region - evidence for ongoing particle bombardment? // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — Jun. — Vol. 530. — P. A38.
97. *Krivonos R. A. [et al.]*. First Hard X-Ray Detection of the Non-thermal Emission around the Arches Cluster: Morphology and Spectral Studies with NuSTAR // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Feb. — Vol. 781. — P. 107.
98. *Churazov E. [et al.]*. Low-flux hard state of IE 1740.7-2942 // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Apr. — Vol. 407. — Pp. 752–757.
99. *Murakami Hiroshi [et al.]*. ASCA Observations of the Sagittarius B2 Cloud: An X-Ray Reflection Nebula // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — May. — Vol. 534, no. 1. — Pp. 283–290.
100. *Ryu S. G. [et al.]*. X-Ray Echo from the Sagittarius C Complex and 500-year Activity History of Sagittarius A* // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2013. — Apr. — Vol. 65. — P. 33.

101. *Churazov E. [et al.]*. Not that long time ago in the nearest galaxy: 3D slice of molecular gas revealed by a 110 yr old flare of Sgr A* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Feb. — Vol. 465. — Pp. 45–53.
102. *Churazov E. [et al.]*. Can Sgr A* flares reveal the molecular gas density PDF? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Nov. — Vol. 471. — Pp. 3293–3304.
103. *Harrison F. A. [et al.]*. The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-energy X-Ray Mission // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Jun. — Vol. 770. — P. 103.
104. *Madsen K. K [et al.]*. Observational artifacts of Nuclear Spectroscopic Telescope Array: ghost rays and stray light // *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. — 2017. — Oct. — Vol. 3. — P. 044003.
105. *Freeman P., Doe S., Siemiginowska A.* Sherpa: a mission-independent data analysis application // *Astronomical Data Analysis* / Ed. by J.-L. Starck, F. D. Murtagh. — Vol. 4477 of *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation*. — 2001. — Nov. — Pp. 76–87.
106. *Fruscione A. [et al.]*. CIAO: Chandra's data analysis system // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — Vol. 6270 of *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation*. — 2006. — Jun. — P. 62701V.
107. *Strüder L. [et al.]*. The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The pn-CCD camera // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — Jan. — Vol. 365. — Pp. L18–L26.
108. *Turner M. J. L. [et al.]*. The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The MOS cameras // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — Jan. — Vol. 365. — Pp. L27–L35.
109. *Snowden S. L. [et al.]*. A catalog of galaxy clusters observed by XMM-Newton // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Feb. — Vol. 478, no. 2. — Pp. 615–658.
110. *Law C., Yusef-Zadeh F.* X-Ray Observations of Stellar Clusters Near the Galactic Center // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 611, no. 2. — P. 858.

111. Wenger M. [et al.]. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. — 2000. — Apr. — Vol. 143. — Pp. 9–22.
112. Ross R. R., Fabian A. C. A comprehensive range of X-ray ionized-reflection models // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2005. — Mar. — Vol. 358. — Pp. 211–216.
113. Blasi P. The origin of galactic cosmic rays // *The Astronomy and Astrophysics Review*. — 2013. — Nov. — Vol. 21. — P. 70.
114. Slane P. [et al.]. Nonthermal X-Ray Emission from the Shell-Type Supernova Remnant G347.3-0.5 // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — Nov. — Vol. 525. — Pp. 357–367.
115. Pfeffermann E., Aschenbach B. ROSAT observation of a new supernova remnant in the constellation Scorpius. // *Roentgenstrahlung from the Universe* / Ed. by H. U. Zimmermann, J. Trümper, H. Yorke. — 1996. — Feb. — Pp. 267–268.
116. Uchiyama Y., Aharonian F. A., Takahashi T. Fine-structure in the nonthermal X-ray emission of SNR RX J1713.7-3946 revealed by Chandra // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Mar. — Vol. 400. — Pp. 567–574.
117. Cassam-Chenai G. [et al.]. XMM-Newton observations of the supernova remnant RX J1713.7-3946 and its central source // *Astronomy & Astrophysics*. — 2004. — Nov. — Vol. 427. — Pp. 199–216.
118. Butt Y. M. [et al.]. Is the Supernova Remnant RX J1713.7-3946 a Hadronic Cosmic-Ray Accelerator? // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Dec. — Vol. 562, no. 2. — Pp. L167–L171.
119. Hiraga J. S. [et al.]. Spectral properties of nonthermal X-ray emission from the shell-type SNR RX J1713.7 3946 as revealed by XMM-Newton // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — Mar. — Vol. 431. — Pp. 953–961.
120. Fukui Y. [et al.]. Discovery of Interacting Molecular Gas toward the TeV Gamma-Ray Peak of the SNR G 347.3–0.5 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2003. — Oct. — Vol. 55. — Pp. L61–L64.

121. *Moriguchi Y. [et al.]*. A Detailed Study of Molecular Clouds toward the TeV Gamma-Ray Supernova Remnant G347.3-0.5 // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — Oct. — Vol. 631. — Pp. 947–963.
122. *Wang Z. R., Qu Q.-Y., Chen Y.* Is RX J1713.7-3946 the remnant of the AD393 guest star? // *Astronomy & Astrophysics*. — 1997. — Feb. — Vol. 318. — Pp. L59–L61.
123. *Katsuda S. [et al.]*. Evidence for Thermal X-Ray Line Emission from the Synchrotron-dominated Supernova Remnant RX J1713.7-3946 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Nov. — Vol. 814. — P. 29.
124. *Koyama K. [et al.]*. Discovery of Non-Thermal X-Rays from the Northwest Shell of the New SNR RX J1713.7-3946: The Second SN 1006? // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 1997. — Jun. — Vol. 49. — Pp. L7–L11.
125. *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.
126. *Okuno T. [et al.]*. Spatially resolved spectroscopy of non-thermal X-rays in RX J1713.7-3946 with Chandra // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2018. — Aug. — Vol. 70. — P. 77.
127. *Acero F. [et al.]*. A joint spectro-imaging analysis of the XMM-Newton and HESS observations of the supernova remnant RX J1713.7-3946 // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — Oct. — Vol. 505. — Pp. 157–167.
128. *Takahashi T. [et al.]*. Measuring the Broad-Band X-Ray Spectrum from 400eV to 40keV in the Southwest Part of the Supernova Remnant RXJ1713.7-3946 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2008. — Jan. — Vol. 60. — P. S131.
129. *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.
130. *Muraishi H. [et al.]*. Evidence for TeV gamma-ray emission from the shell type SNR RX J1713.7-3946 // *Astronomy & Astrophysics*. — 2000. — Feb. — Vol. 354. — Pp. L57–L61.

131. *Enomoto R. [et al.]*. The acceleration of cosmic-ray protons in the supernova remnant RX J1713.7-3946 // *Nature*. — 2002. — Apr. — Vol. 416. — Pp. 823–826.
132. *Aharonian F. A. [et al.]*. High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant // *Nature*. — 2004. — Nov. — Vol. 432. — Pp. 75–77.
133. *Aharonian F. [et al.]*. A detailed spectral and morphological study of the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946 with HESS // *Astronomy & Astrophysics*. — 2006. — Apr. — Vol. 449. — Pp. 223–242.
134. *Aharonian F. [et al.]*. Primary particle acceleration above 100 TeV in the shell-type supernova remnant RX J1713.7-3946 with deep HESS observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Mar. — Vol. 464. — Pp. 235–243.
135. *H. E. S. S. Collaboration, Abdalla H. [et al.]*. H.E.S.S. observations of RX J1713.7-3946 with improved angular and spectral resolution: Evidence for gamma-ray emission extending beyond the X-ray emitting shell // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Apr. — Vol. 612. — P. A6.
136. *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.
137. *Kuznetsova E. [et al.]*. 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. — Oct. — Vol. 489, no. 2. — Pp. 1828–1836.
138. *Churazov E. [et al.]*. XMM-Newton Observations of the Perseus Cluster. I. The Temperature and Surface Brightness Structure // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Jun. — Vol. 590. — Pp. 225–237.
139. *Gros A. [et al.]*. The INTEGRAL IBIS/ISGRI System Point Spread Function and Source Location Accuracy // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Nov. — Vol. 411. — Pp. L179–L183.
140. *Voges W. [et al.]*. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 1999. — Sep. — Vol. 349. — Pp. 389–405.
141. *Sugizaki M. [et al.]*. Discovery of an 11-s X-Ray Pulsar in the Galactic-Plane Section of the Scorpius Constellation // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 1997. — Oct. — Vol. 49. — Pp. L25–L30.

142. *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.
143. *Vikhlinin A. [et al.]*. Matched Filter Source Detection Applied to the ROSAT PSPC and the Determination of the Number-Flux Relation // *The Astrophysical Journal*. — 1995. — Oct. — Vol. 451. — P. 542.
144. *den Hartog P. R., Kuiper L., Hermsen W.* Detailed high-energy characteristics of AXP 1RXS J170849-400910. Probing the magnetosphere using INTEGRAL, RXTE, and XMM-Newton // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Oct. — Vol. 489. — Pp. 263–279.
145. *Goldwurm A. [et al.]*. The INTEGRAL/IBIS scientific data analysis // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Nov. — Vol. 411. — Pp. L223–L229.
146. *Krivonos R. [et al.]*. Extragalactic Source Counts in the 20-50 keV Energy Band from the Deep Observation of the Coma Region by INTEGRAL IBIS // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — May. — Vol. 625, no. 1. — Pp. 89–94.
147. *Wilms J., Allen A., McCray R.* On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Oct. — Vol. 542. — Pp. 914–924.
148. *Verner D. A. [et al.]*. Atomic Data for Astrophysics. II. New Analytic FITS for Photoionization Cross Sections of Atoms and Ions // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — Jul. — Vol. 465. — P. 487.
149. *Perez K. [et al.]*. Extended hard-X-ray emission in the inner few parsecs of the Galaxy // *Nature*. — 2015. — Apr. — Vol. 520, no. 7549. — Pp. 646–649.
150. *Krivonos R. [et al.]*. Hard X-ray emission from the Galactic ridge // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Mar. — Vol. 463, no. 3. — Pp. 957–967.
151. *von Fellenberg S. [et al.]*. The young stars in the Galactic Center // *arXiv e-prints*. — 2022. — May. — P. arXiv:2205.07595.
152. *Backer D. C.* Scattering of radio emission from the compact object in Sagittarius A. // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1978. — May. — Vol. 222. — Pp. L9–L12.

153. Bower G. C. The Galactic center pulsar SGR J1745-29 // *The Galactic Center: Feeding and Feedback in a Normal Galactic Nucleus* / Ed. by L. O. Sjouwerman, C. C. Lang, J. Ott. — Vol. 303. — 2014. — May. — Pp. 444–448.
154. Dexter J., O'Leary R. M. The peculiar pulsar population of the central parsec // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Feb. — Vol. 783, no. 1. — P. L7.
155. Liu K. [et al.]. Prospects for Probing the Spacetime of Sgr A* with Pulsars // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Mar. — Vol. 747, no. 1. — P. 1.
156. Ben-Salem B., Hackmann E. Relativistic propagation and frame dragging time delay in the timing of a pulsar orbiting the supermassive black hole SgrA* // *arXiv e-prints*. — 2022. — Mar. — P. arXiv:2203.10931.
157. Turolla R., Zane S., Watts A. L. Magnetars: the physics behind observations. A review // *Reports on Progress in Physics*. — 2015. — Nov. — Vol. 78, no. 11. — P. 116901.
158. Degenaar N. [et al.]. Large Flare from Sgr A* Detected by Swift // *The Astronomer's Telegram*. — 2013. — Apr. — Vol. 5006. — P. 1.
159. Kennea J. A. [et al.]. Swift/BAT detection of an SGR-like flare from near Sgr A* // *The Astronomer's Telegram*. — 2013. — Apr. — Vol. 5009. — P. 1.
160. Kennea J. A. [et al.]. Swift/BAT detection of a burst from SGR J1745-29 // *The Astronomer's Telegram*. — 2013. — Jun. — Vol. 5124. — P. 1.
161. 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.
162. Mori K. [et al.]. NuSTAR Discovery of a 3.76 s Transient Magnetar Near Sagittarius A* // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2013. — Jun. — Vol. 770, no. 2. — P. L23.
163. Shannon R. M., Johnston S. Radio properties of the magnetar near Sagittarius a* from observations with the australia telescope compact array. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Aug. — Vol. 435. — Pp. L29–L32.

164. Lynch R. S. [et al.]. Green Bank Telescope and Swift X-Ray Telescope Observations of the Galactic Center Radio Magnetar SGR J1745-2900 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Jun. — Vol. 806, no. 2. — P. 266.
165. Pennucci T. T. [et al.]. Simultaneous Multi-band Radio and X-Ray Observations of the Galactic Center Magnetar SGR 1745-2900 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Jul. — Vol. 808, no. 1. — P. 81.
166. 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.
167. Coti Zelati F. [et al.]. Chandra monitoring of the Galactic Centre magnetar SGR J1745-2900 during the initial 3.5 years of outburst decay // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Oct. — Vol. 471, no. 2. — Pp. 1819–1829.
168. Rea N. [et al.]. The X-Ray Outburst of the Galactic Center Magnetar over Six Years of Chandra Observations // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — May. — Vol. 894, no. 2. — P. 159.
169. Yusef-Zadeh F. [et al.]. Radio Continuum Emission from the Magnetar SGR J1745-2900: Interaction with Gas Orbiting Sgr A* // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2015. — Oct. — Vol. 811, no. 2. — P. L35.
170. Bower G. C., [et al.]. The Proper Motion of the Galactic Center Pulsar Relative to Sagittarius A* // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Jan. — Vol. 798, no. 2. — P. 120.
171. Bower G. C., [et al.]. The Angular Broadening of the Galactic Center Pulsar SGR J1745-29: A New Constraint on the Scattering Medium // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — Jan. — Vol. 780, no. 1. — P. L2.
172. Pearlman A. B. [et al.]. Pulse Morphology of the Galactic Center Magnetar PSR J1745-2900 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Oct. — Vol. 866, no. 2. — P. 160.
173. Wharton R. S. [et al.]. VLA Observations of Single Pulses from the Galactic Center Magnetar // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Apr. — Vol. 875, no. 2. — P. 143.

174. Levin Yu., Beloborodov A. M. Stellar Disk in the Galactic Center: A Remnant of a Dense Accretion Disk? // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2003. — Jun. — Vol. 590, no. 1. — Pp. L33–L36.
175. 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. 250–259.
176. Press W. H., Rybicki G. B. Fast Algorithm for Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data // *The Astrophysical Journal*. — 1989. — Mar. — Vol. 338. — P. 277.
177. Buccheri R. [et al.]. Search for pulsed γ -ray emission from radio pulsars in the COS-B data. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1983. — Dec. — Vol. 128. — Pp. 245–251.
178. Beloborodov A. M. Gravitational Bending of Light Near Compact Objects // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2002. — Feb. — Vol. 566, no. 2. — Pp. L85–L88.
179. Hu C.-P., Ng C.-Y., Ho Wynn C. G. A systematic study of soft X-ray pulse profiles of magnetars in quiescence // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — May. — Vol. 485, no. 3. — Pp. 4274–4286.
180. Sitter R. R., Wu C. A note on Woodruff confidence intervals for quantiles // *Statistics & Probability Letters*. — 2001. — Vol. 52, no. 4. — Pp. 353–358.
181. Beloborodov A. M. Untwisting Magnetospheres of Neutron Stars // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Sep. — Vol. 703, no. 1. — Pp. 1044–1060.
182. Özel F. Timing Properties of Magnetars // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Aug. — Vol. 575, no. 1. — Pp. 397–406.
183. Ferrazzoli R. [et al.]. Prospects for a polarimetric mapping of the Sgr A molecular cloud complex with IXPE // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Nov. — Vol. 655. — P. A108.