

- 1. Авторы:** Кузнецова Е.А., младший научный сотрудник, аспирант 2 года, 52 отдел  
**2. Название:** «Процессы генерации диффузного излучения в направлении на Галактический центр по данным NuSTAR, ИНТЕГРАЛ и XMM-Ньютон»  
**3. Ссылки на публикации:**

1) <https://doi.org/10.1093/mnras/stz119>

Kuznetsova E., Krivonos R., Clavel M., Lutovinov A., Chernyshov D., Hong J., Mori K., Ponti G., Tomsick J., Zhang S., «Investigating the origin of the faint non-thermal emission of the Arches cluster using the 2015–2016 *NuSTAR* and *XMM-Newton* X-ray observations», *MNRAS*, Volume 484, Issue 2, April 2019, Pages 1627–1636, IF = 5.231.

2) <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2261>

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*», *MNRAS*, Volume 489, Issue 2, October 2019, Pages 1828–1836, IF = 5.231.

#### **4. Общая формулировка научной проблемы и её актуальность**

Изучение процессов генерации жесткого рентгеновского излучения протяженных объектов, таких как молекулярные облака и остатки вспышек сверхновых, может помочь в исследованиях прошлой активности сверхмассивной черной дыры Стрелец А\* и взаимодействия космических лучей с межзвездной средой в Галактике.

#### **5. Конкретная решаемая в работе задача и её значение**

В цикле работ решается задача, связанная с изучением происхождения диффузного рентгеновского излучения в области Галактического центра.

В первой работе поднимается вопрос о присутствии протяженного излучения молекулярного облака около звездного скопления Арки, расположенного в непосредственной близости от Галактического центра, его пространственных и спектральных свойств. Недавние наблюдения обсерваториями NuSTAR и XMM-Ньютон комплекса Арки демонстрируют резкие изменения как в морфологии, так и в интенсивности нетеплового излучения. Эти изменения аналогичны наблюдаемым в молекулярных облаках Галактического центра, которые поддерживают гипотезу флуоресценции газа от прошлой вспышечной активности Стрелец А\*. Альтернативной гипотезой генерации излучения молекулярного облака Арки является его взаимодействие с космическими лучами. В данной работе обсуждаются обе гипотезы.

Во второй работе исследуются пространственные и спектральные свойства диффузного излучения от остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946 в направлении на Галактический центр. На данный момент существует мало наблюдений этого объекта в жестком рентгеновском диапазоне и является открытым вопрос формы его спектра на этих энергиях. Спектральная форма и ее характеристики в области жестких рентгеновских лучей содержат информацию о процессах ускорения космических лучей на оболочке сверхновой.

#### **6. Используемый подход, его новизна и актуальность**

В первой статье мы представляем результаты длительного наблюдения комплекса Арки с помощью орбитального телескопа NuSTAR в 2016 г. Кроме того, мы использовали наблюдения 2015 г. для получения карты области скопления Арки с глубокой экспозицией в 460 кс и уточнения спектральных и пространственных параметров протяженного излучения. Кроме того, широкополосный спектр по данным XMM-Ньютон и NuSTAR позволил уточнить значения поглощения и фотонного индекса. В данной работе впервые выполнен детальный спектральный анализ трех ярких областей молекулярного облака Арки, видимых в линии излучения 6.4 кэВ, по данным XMM-Ньютон 2015 г.

RX J1713.7-3946 является наиболее изученным остатком вспышки сверхновой,

наблюдаемом в разных энергетических диапазонах. Несмотря на большое количество космических обсерваторий, работающих в жестком рентгеновском диапазоне, наблюдения больших протяженных объектов сопровождаются большими трудностями. Однако, обсерватория ИНТЕГРАЛ позволяет нам получить изображение всего протяженного объекта и произвести первый детальный анализ на энергиях до 120 кэВ. Работа основана на данных обзора области Галактического Центра в жестком рентгеновском диапазоне с декабря 2002 по март 2017 гг. с помощью телескопа с кодирующей апертурой IBIS, установленного на космической обсерватории ИНТЕГРАЛ. Кроме того, для сравнения параметров излучения в мягком и жестком рентгеновском диапазонах в работе использовались данные телескопа ХММ-Ньютон с 2001 по 2017 гг. в энергетическом диапазоне 1-10 кэВ. В данной работе впервые используется диаграмма фотонных индексов, полученная по данным разных обсерваторий, для сопоставления аналитической моделью.

### **7. Полученные результаты и их значимость**

Наблюдения НуСТАР в 2016 г. подтвердили сильное снижение нетеплового излучения от молекулярного облака Арки и показали, что как и нетепловое излучение континуума, так и поток в линии Fe Ka 6,4 кэВ согласуются с уровнем, измеренным в 2015 г. Не было обнаружено значимых изменений ни в спектральной форме, ни в эквивалентной ширине линии Fe Ka EW, что может быть интерпретировано как достижение стационарного уровня нетеплового излучения комплекса Арки. В то же время, нетепловой поток, измеренный в 2016 г., формально не противоречит спадающему тренду, наблюдаемому в течение 2007-2015 гг. Широкополосный спектр по данным 2015-2016 гг. НуСТАР и 2015 г. ХММ-Ньютон позволил уточнить наклон степенного закона на значениях  $\Gamma = 2.21 \pm 0.15$ . Данное значение согласуется с  $\Gamma \sim 2$ , наблюдаемым в молекулярных облаках Галактического центра, что поддерживает гипотезу о прошлой активности Стрельца A\*. Анализ трех ярких областей, видимых в линии 6.4 кэВ, показал различные значения EW и поглощения, что является серьезным признаком того, что рентгеновское излучение молекулярного облака представляет собой смесь компонент различного происхождения.

В данной работе мы впервые провели детальный анализ остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946 в жестком рентгеновском диапазоне 17–60 кэВ, излучение которого доминируется двумя яркими источниками протяженного излучения. Кроме того, была получена наиболее чувствительная на данный момент карта RX J1713.7-3946 по данным ХММ-Ньютон в мягком рентгеновском диапазоне 1-10 кэВ. Хорошая корреляция изображений остатка вспышки сверхновой по данным ИНТЕГРАЛ (17–60 кэВ) и ХММ-Ньютон (1–10 кэВ) указывает на единый механизм генерации излучения в мягком и жестком рентгеновских диапазонах. Различие в значениях фотонных индексов для спектров, извлеченных из данных ХММ-Ньютон ( $\Gamma \sim 2.23$ ) и ИНТЕГРАЛ ( $\Gamma \sim 1.13$ ), указывает на смену наклона степенного спектра при переходе от мягкого к жесткому диапазонам. Аналитическая модель синхротронного спектра электронов, ускоренных на нерелятивистской ударной волне в молодом остатке вспышки сверхновой дает хорошее согласие с данными при характеристических энергиях  $\sim 1-2$  кэВ, что ожидается от режима диффузии Бома, предположительно наблюдаемом в RX J1713.7-3946.