

На правах рукописи

Мереминский Илья Александрович

Мониторинг неба в рентгеновском диапазоне
энергий обсерваторией INTEGRAL:
обзоры большой площади и транзиентные
источники

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва, 2018

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, ИКИ РАН
Гребенев Сергей Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга
МГУ имени М.В. Ломоносова
Пширков Максим Сергеевич

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГБУН Институт астрономии РАН
Юнгельсон Лев Рафаилович

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Защита диссертации состоится **27 марта 2018 года в 11 часов**
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте
космических исследований Российской Академии Наук по адресу:
Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-
зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2017/mereminskiy.htm>

Автореферат разослан 22 февраля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук



А.Ю. Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность и цели работы

Обзоры неба в рентгеновском диапазоне важны для изучения популяций рентгеновских источников, населяющих как нашу Галактику, так и всю Вселенную в целом. Так, обзоры проведенные по данным обсерватории INTEGRAL, благодаря большой экспозиции, накопленной в области Галактической плоскости, позволили утроить число известных массивных двойных систем с оптическими компаньонами-супергигантами (Уолтер и др., 2015) и выделить среди них новый класс сильнопеременных систем (т.н. SFXT - быстрые рентгеновские транзиенты с супергигантом, см. обзор Гребенев (2010)), а также впервые измерить функцию светимости в жестком рентгеновском диапазоне для катаклизмических переменных (Ревнивцев и др., 2008) и маломассивных рентгеновских двойных в балдже Млечного Пути (Ревнивцев и др., 2008). Кроме того, благодаря большому полю зрения и жесткому энергетическому диапазону, который хорошо подходит для поиска сильнопоглощенных объектов (см, например Сазонов и др., 2015), удалось измерить неоднородность в пространственном распределении ярких АЯГ в локальной Вселенной (Кривонос и др., 2007).

Помимо обзоров, необходим также регулярный мониторинг неба в рентгеновских лучах. Для этого есть несколько причин. Во-первых, большая часть рентгеновских источников является переменной, причем амплитуда переменности рентгеновского потока может превышать 5-7 порядков величины (например у рентгеновских новых). Учитывая, что плотность рентгеновских объектов на небе существенно меньше, чем плотность оптических или инфракрасных, получается, что обнаружить такие объекты проще всего в рентгеновском диапазоне. Такие переменные источники - транзиенты - представляют интерес с точки зрения изучения процессов нестационарной аккреции. Во-вторых, многие катастрофические события также сопровождаются излучением рентгеновских лучей - например приливные разрушения звезд центральными сверхмассивными черными дырами галактик, слияния нейтронных звезд, вспышки сверхновых. В этом случае основной интерес представляют сами эти катастрофические события. Обсерватория INTEGRAL, за счет своего большого поля зрения, хорошо подходит для решения подобных мониторинговых задач.

Основной целью первой части диссертационной работы являлось

проведение глубоких обзоров с использованием архивных данных обсерватории INTEGRAL и исследование свойств популяций зарегистрированных объектов. Были проведены два обзора - обзор области Галактического центра по данным рентгеновского телескопа JEM-X и обзор трех глубоких полей телескопом IBIS. Кроме того, было проведено отождествление новых источников, зарегистрированных в четырнадцатилетнем обзоре Галактической плоскости по данным других рентгеновских обсерваторий.

Во второй части работы приведены результаты продолжительного мониторинга неба в режиме близком к реальному времени. В ходе наблюдений была обнаружена очередная вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278, а также открыт первый рентгеновский всплеск от ранее неотожествленного объекта IGR J17445-2747.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми. Впервые проведен систематический обзор большой площади по данным рентгеновского телескопа JEM-X. Показано, что подобные обзоры могут достигать высокой чувствительности и являются полезным дополнением к обзорам, проводимым основным инструментом обсерватории - телескопом IBIS.

Проведен внегалактический обзор с рекордной чувствительностью в жестком рентгеновском диапазоне 17–60 кэВ, обнаружено 37 новых источников.

Впервые зарегистрирован всплеск первого рода от ранее неидентифицированного объекта IGR J17445-2747. Это позволило классифицировать его как барстер - маломассивную рентгеновскую двойную систему, в которой происходит аккреция на нейтронную звезду. Впервые удалось точно измерить координаты источника и определить возможный диапазон расстояний до него.

Научная и практическая ценность

Полученные каталоги источников опубликованы и могут использоваться для исследований как популяций, так и отдельных источников. Перечень транзиентных источников, приведенный в обзоре Галактического центра может служить источником информации о том, вспышки каких источников были зафиксированы телескопом JEM-X; для всех таких источников возможно построение широкополосных спектров в диапазоне энергий 3–60 кэВ. Отождествления

источников из обзоров глубоких полей и из обзора Галактической плоскости представляют интерес для наблюдателей, т.к. представленной информации достаточно для поиска и спектроскопии оптических компаньонов источников.

Функция средней рентгеновской светимости транзитных рентгеновских двойных систем в балдже Млечного Пути может использоваться для определения вклада транзитных источников в измеряемые функции светимости для других галактик. Выборка слабых постоянных ЛМХВ также представляет интерес для отдельного исследования, поскольку такие объекты практически недоступны для изучения за пределами нашей Галактики.

Полученная в обзоре трех внегалактических площадок кривая подсчетов АЯГ может быть использована для определения функции светимости АЯГ в локальной Вселенной. Поскольку использованный энергетический диапазон менее подвержен селективным эффектам (связанным с внутренним поглощением в источниках), чем более мягкие обзоры, полученная выборка АЯГ может использоваться для определения доли поглощенных АЯГ (см., например, Сазонов и др., 2015).

Точное определение координат источника IGR J17445-2747 делает возможным поиск его оптического компаньона, хотя высокая плотность источников в поле и делает эту задачу нетривиальной.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведен обзор области центра Галактики телескопом JEM-X в диапазонах энергий 5–10 и 10–35 кэВ. Зарегистрировано 105 источников, большинство из которых являются маломассивными рентгеновскими двойными (LMXB). Получена функция светимости (в диапазоне 5-10 кэВ) постоянных LMXB в интервале $8 \times 10^{34} - 6 \times 10^{38}$ эрг с^{-1} , её форма хорошо соответствует предсказанию модели Гильфанова (2004). Исследован вклад сильнопеременных LMXB в усредненную за большой период времени (10 лет) функцию светимости, добавка таких источников начинает превосходить вклад постоянных источников на светимостях ниже 10^{36} эрг с^{-1} . Показано, что пространственное распределение LMXB следует распределению массы Галактики в трех-компонентной модели Бакала и Солейры (1980).
2. Проведен глубокий обзор трех внегалактических полей теле-

скопом IBIS в диапазоне энергий 17–60 кэВ. Зарегистрировано 147 источников, 37 из которых были обнаружены впервые. С использованием данных телескопов Swift-XRT, XMM и ROSAT 13 (из 37) новых источников были отождествлены с известными оптическими компаньонами и классифицированы как АЯГ. Наклон кривой подсчетов источников соответствует ожидаемому ($-3/2$) вплоть до потоков $\approx 3 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, а нормировка незначительно меньше значения, полученного в обзоре всего неба (Кривонос и др., 2010). Нормировка кривой подсчетов АЯГ в направлении на БМО ниже, чем для других полей, а наклон кривой - круче. Этот эффект вызывается отсутствием в этом направлении ярких АЯГ. Оценки плотности АЯГ в локальной Вселенной в направлении на все три поля согласуются между собой.

3. Для 11 из 41 новых жестких рентгеновских источников, зарегистрированных в 14-летнем обзоре Галактической плоскости телескопом IBIS были найдены мягкие рентгеновские компаньоны. Четыре из них являются кандидатами в АЯГ. Еще один кандидат в поглощенные АЯГ найден на основании совпадения положения с центром близкой оптической галактики.
4. Обнаружена и исследована вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278. Вспышка оказалась “неудавшейся”, источник не перешел из низкого жесткого состояния в высокое мягкое, о чем свидетельствуют полученные широкополосные (0.8-100 кэВ) спектры.
5. Обнаружен первый рентгеновский всплеск I типа от источника IGR J17445-2747. Это позволило установить, что компактным объектом в этой системе является нейтронная звезда со слабым магнитным полем. Получены уточненные координаты источника и пределы на расстояние до него ($5.0 \lesssim D \lesssim 12.3$ кпк). Регистрация всплеска позволяет предположить, что IGR J17445-2747 - маломассивная рентгеновская двойная, расположенная в балдже Галактики.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты работы полностью содержатся в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. "Deep hard X-ray survey of the Large Magellanic Cloud"
Grebenev, S. A., Lutovinov, A. A., Tsygankov, S. S., Mereminskiy, I. A., 2013, MNRAS, 428, 50
2. "Обзор области Галактического центра в рентгеновских лучах телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL"
Гребенев С.А., Мереминский И.А., 2015, Письма в Астрономический журнал, 41, 826
3. "INTEGRAL/IBIS deep extragalactic survey: M81, LMC and 3C 273/Coma fields"
Mereminskiy I.A., Krivonos R.A., Lutovinov A.A., Sazonov S.Yu., Revnivtsev M.G., Sunyaev R.A., 2016, MNRAS, 459, 140
4. "New hard X-ray sources discovered in the ongoing INTEGRAL Galactic plane survey after 14 years of observations"
Krivonos R.A., Tsygankov S.S., Mereminskiy I.A., Lutovinov A.A., Sazonov S.Yu., Sunyaev R.A., 2017, MNRAS, 470, 512
5. "Вспышка рентгеновской новой GRS 1739-278 в сентябре 2016 г"
Мереминский И.А., Филиппова Е.В., Кривонос Р.А., Гребенев С.А., Буренин Р.А., Сюняев Р.А., 2017, Письма в Астрономический журнал, 43, 194
6. "IGR J17445-2747 - еще один рентгеновский барстер в балдже Галактики"
Мереминский И.А., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., 2017, Письма в Астрономический журнал, 43, 727
7. "Рентгеновские всплески I рода, обнаруженные телескопом JEM-X обсерватории INTEGRAL в 2003-2015 гг"
Человеков И.В., Гребенев С.А., Мереминский И.А., Просветов А.В., 2017, Письма в Астрономический журнал, 43, 859

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на семинарах отдела Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН в 2013–2017 гг., международной конференции "*11th INTEGRAL Conference*",

2016 г., Амстердам, Нидерланды; а также на Всероссийских конференциях “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, 2014–2015 г., Москва.

Объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав, общий объем которых составляет 85 страниц, включая 34 рисунка и 10 таблиц. В тексте диссертации цитируется 131 литературный источник.

Содержание работы

Первая глава представляет собой краткое введение в историю развития рентгеновской астрономии. Также в первой главе сформулированы основные цели диссертационной работы. Во второй главе кратко излагаются основные характеристики рентгеновских обсерваторий INTEGRAL и Swift, по данным которых было получено большинство результатов. Третья глава, состоящая из трех частей, посвящена проведенным обзорам. В части 3.1 представлены результаты обзора области Галактического центра выполненной по данным телескопа JEM-X обсерватории INTEGRAL в диапазонах 5–10 и 10–25 кэВ. Этот обзор, уникальный по своим характеристикам - промежуточному энергетическому диапазону и временной базе - был направлен в первую очередь на исследование популяции маломассивных рентгеновских двойных систем (*low-mass X-ray binaries* - LMXB), населяющих область Галактического балджа.

Всего было зарегистрировано 105 источников, 75 из которых оказались LMXB. Среди прочих источников представлены массивные рентгеновские двойные (18), катаклизмические переменные (3), АЯГ (3) и скопление галактик в Змееносце. Благодаря высокой чувствительности обзора (1 мКраб) удалось измерить функцию светимости LMXB (приведена на Рис. 1) до светимостей $\approx 10^{35}$ эрг с^{-1} в диапазоне 5–10 кэВ, а десятилетняя временная база позволила разделить постоянные и транзиентные источники. Полученная функция светимости постоянных источников согласуется со средней функцией светимости LMXB, наблюдавшихся в других галактиках (Гильфанов, 2004). Распределение транзиентных источников по средней светимости обладает схожей формой, однако слом в функции светимости происходит при меньших светимостях, примерно на $\approx 10^{36}$ эрг с^{-1} .

Также исследовалось пространственное распределение LMXB в

Галактике. Было показано, что их радиальное распределение относительно центра Млечного Пути соответствует распределению звездной массы в Галактике в модели Бакал и Сонеира (1980). В части 3.2 излагаются результаты обзора трех глубоких экстрагалактических площадок, полей M81, Большого Магелланова Облака (БМО) и Волос Вероники, телескопом IBIS обсерватории INTEGRAL в диапазоне энергий 17–60 кэВ. На момент своего опубликования данный обзор являлся самым глубоким из проведенных телескопами с кодирующей апертурой, пиковая чувствительность составила 0.18 мКраб. Всего было зарегистрировано 147 источников, 37 из которых были обнаружены впервые. По архивным данным телескопов Swift-XRT, XMM и ROSAT 13 из 37 новых источников были затем отождествлены с оптическими компаньонами и классифицированы как АЯГ. Полученная таким образом выборка АЯГ и предполагаемых АЯГ использовалась затем для построения кривой подсчетов источников. Также отдельно исследовались кривые подсчетов, полученные для каждого из полей по отдельности. Показано, что вплоть до потоков $\simeq 3 \times 10^{-12}$ эрг с⁻¹ см⁻² кривая подсчетов хорошо аппроксимируется степенным законом с наклоном -1.56 ± 0.13 и нормировкой $(3.1 \pm 0.3) \times 10^{-3}$ градус⁻², что совместимо с ранее измеренным значением в $(3.59 \pm 0.35) \times 10^{-3}$ градус⁻² полученного Кривонос и др. (2010) по данным обзора всего неба. Кривая подсчетов в поле БМО оказалась круче, чем для двух других полей, был подтвержден недостаток ярких (с потоками $> 2 \times 10^{-11}$ эрг с⁻¹ см⁻²) АЯГ в этом направлении, отмеченный впервые в работе Лутовинов, Гребенев и Цыганков (2012), однако значимого различия в объемных плотностях АЯГ между различными полями найдено не было. Обзор трех глубоких полей позволил сократить разрыв в функции светимости АЯГ в жестком рентгеновском диапазоне, полученной ранее по данным NuSTAR и INTEGRAL. В ближайшем будущем полностью закрыть этот разрыв сможет телескоп ART-XC обсерватории Спектр-РГ.

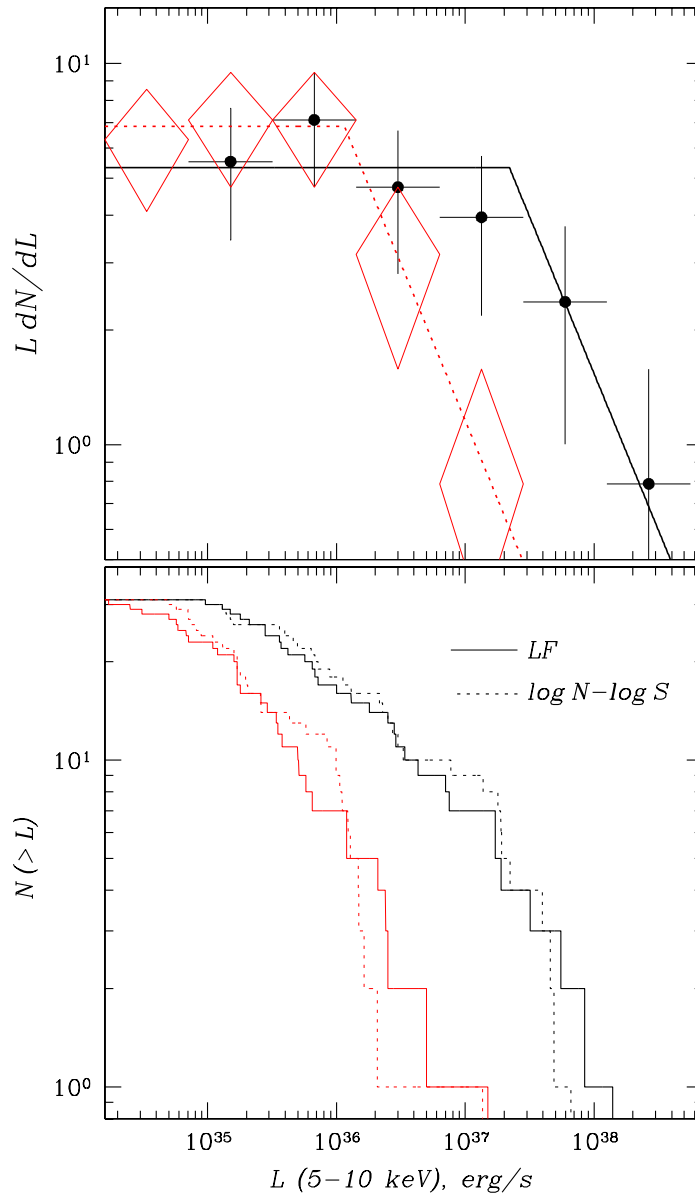


Рис. 1: Функция средней рентгеновской (5–10 кэВ) светимости ЛМХВ-источников, зарегистрированных телескопом **ЖЕМ-Х** в области галактического центра в 2003–2013 гг. *Вверху*: дифференциальная функция светимости: заштрихованные кружки — постоянные источники, ромбы — транзиенты; сплошной линией показана модельная функция светимости, полученная по наблюдениям спутником **Chandra** ряда близких галактик (Гильфанов, 2004), штриховой — аппроксимация этой моделью функции светимости, измеренной телескопом **ЖЕМ-Х** для транзиентных ЛМХВ-источников. *Внизу*: Кумулятивные функции светимости (сплошные линии) этих групп источников в сравнении с кривыми $\log(N) - \log(S)$ (штриховые линия), предполагающими, что все объекты находятся на расстоянии 8 кпк.

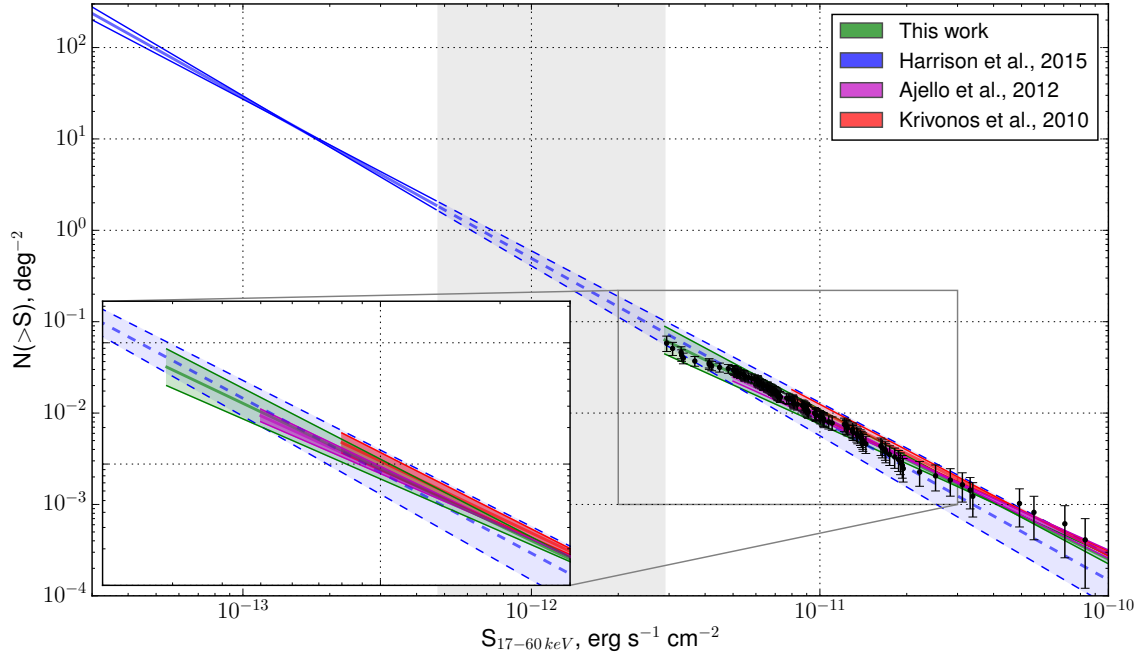


Рис. 2: Кривые подсчетов АЯГ в жестком рентгеновском диапазоне по данным различных миссий. Сплошными линиями показаны аппроксимации степенным законом (и соответствующие области ошибок) для следующих телескопов: синим - *NuSTAR* (Харрисон и др., 2015), фиолетовым *Swift*/БАТ (Ажелло и др., 2012) и красным *INTEGRAL*/IBIS (Кривonos и др., 2010). Прерывистая синяя линия показывает экстраполяцию результатов *NuSTAR* в область более высоких потоков. Черным изображена кривая подсчетов АЯГ, полученная в этой работе, а зеленым - наилучшая аппроксимация. Измерения *NuSTAR* и *Swift*/БАТ переведены в диапазон 17–60 кэВ. Серым закрашена область, в которой еще не проводились непосредственные измерения.

Часть 3.3 посвящена отождествлению источников зарегистрированных в ходе четырнадцатилетнего обзора Галактической плоскости телескопом IBIS обсерватории INTEGRAL в диапазоне энергий 17–60 кэВ. Для 11 из 41 нового источника, обнаруженного в ходе обзора были найдены мягкие рентгеновские компаньоны в архивных наблюдениях обсерваторий ROSAT, XMM-Newton и Swift-XRT. Пять из них, скорее всего, являются АЯГ, проецирующимися на плоскость Галактики, природа прочих пока остается неизвестным. В четвертой главе приведены результаты, полученные в ходе мониторинга неба обсерваторией INTEGRAL. В 2016 г. было обнаружено начало новой вспышки от рентгеновской новой GRS 1739-278. Вспышка была покрыта координированными наблюдениям обсерваторий INTEGRAL и Swift. Однако, в отличие от двух предыдущих вспышек этого источника, в этот раз типичного развития вспышки, сопровождающегося сменой спектральных состояний не наблюдалось. Таким образом, вспышка оказалась “проваленной”. Вместе с тем интересно отметить, что в этой вспышке в степенном спектре источника отсутствовал экспоненциальный завал на энергиях 30–50 кэВ, наблюдавшийся ранее. Кроме рентгеновских наблюдений, были проведены также наблюдения на РТТ-150 в оптическом диапазоне, однако задетектировать источник не удалось. В 2017 г. был зарегистрирован первый рентгеновский всплеск первого типа от известного, но неоттождествленного источника IGR J17445-2747. Это позволило установить что источник является маломассивной рентгеновской двойной системой, в которой происходит аккреция вещества на нейтронную звезду со слабым магнитным полем, и получить ограничение на расстояние до него ($5.0 \lesssim D \lesssim 12.3$ кпк). Инициированные наблюдения на телескопе Swift-XRT позволили локализовать источник с точностью до $2.1''$ (см. Рис. 3), чего ранее сделать не удавалось из-за его переменности. Измеренная колонка поглощения в направлении на источник составляет $N_{\text{H}} \simeq (5.6 \pm 1.3) \times 10^{22}$ см⁻², что вкуче с ограничениями на расстояние до него позволяет предположить что IGR J17445-2747 расположен в балдже Млечного Пути.

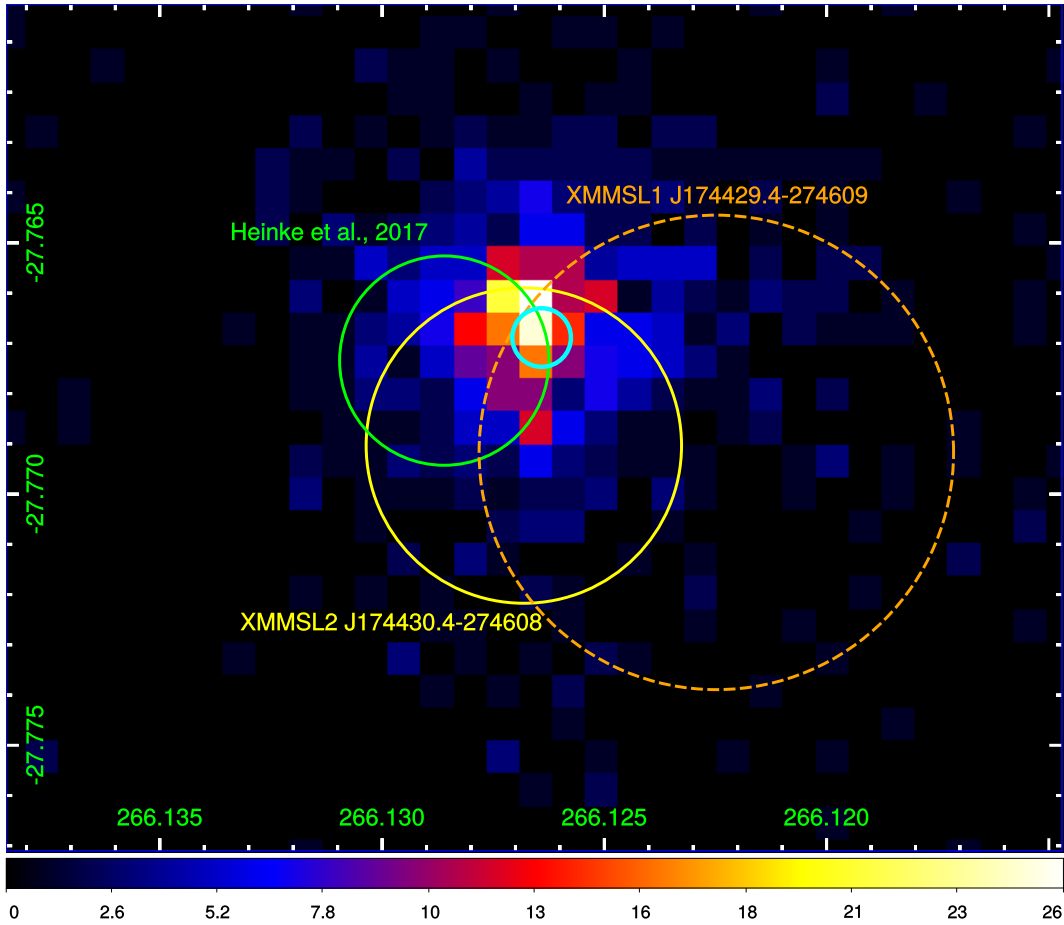


Рис. 3: Изображение неба, полученное телескопом **Swift–XRT** в диапазоне 0.3–10 кэВ по сумме двух первых сеансов наблюдений источника IGR J17445-2747 (14 апреля и 1 мая 2017 г., полная экспозиция ~ 2100 с). Большой пунктирный (оранжевый) круг — область ошибок локализации источника по данным *Первого каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton* (Сакстон и др., 2008), желтый круг — по данным *Второго каталога перенаведений обсерватории XMM-Newton*, зеленый круг — по данным Хейнке и др. (2017) и маленький голубой круг — по данным наших наблюдений (см. также Кеннеа и др. (2017)). Изображение смещено относительно оригинального так, чтобы соответствовать небесным координатам.

Список литературы

- [1] Ажелло и др. (Ajello, M. and Alexander, D. M. and Greiner, J. and Madejski, G. M. and Gehrels, N. and Burlon, D.), 2012, ApJ, 749, 12
- [2] Бакал Дж.Н. и Сонеира Р.М. (Bahcall, J. N. and Soneira, R. M.), 1980, ApJS, 44, 73-110
- [3] Гребенев С.А. (Grebenev S.A.), 2010, arXiv preprint arXiv:1004.0293
- [4] Гребенев и др. (Grebenev, S. A. and Lutovinov, A. A. and Tsygankov, S. S. and Mereminskiy, I. A.), 2013, MNRAS, 428, 50-57
- [5] Гильфанов М.Р. (Gilfanov, M.), 2004, MNRAS, 349, 146-168
- [6] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Revniltsev, M. and Lutovinov, A. and Sazonov, S. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2007, A&A, 475, 775-784
- [7] Кеннеа и др. (Kennea, J. A. and Heinke, C. O. and Bahramian, A. and Maccarone, T. and in't Zand, J. and Kuulkers, E. and Degenaar, N. and Shaw, A. W. and Sivakoff, G. R. and Strader, J. and Wijnands, R.), 2017, ATel, 10273
- [8] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Revniltsev, M. and Tsygankov, S. and Sazonov, S. and Vikhlinin, A. and Pavlinsky, M. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2010, A&A, 519, A107
- [9] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Revniltsev, M. and Grebenev, S. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2010, A&A, 523, A61
- [10] Кривонос и др. (Krivonos, R. and Tsygankov, S. and Lutovinov, A. and Revniltsev, M. and Churazov, E. and Sunyaev, R.), 2012, A&A, 545, A27
- [11] ЛУТОВИНОВ А.А., ГРЕБЕНЕВ С.А. и ЦЫГАНКОВ С.С. (Lutovinov, A. A. and Grebenev, S. A. and Tsygankov, S. S.), 2012, AstL, 38, 492-496
- [12] РЕВНИЦЕВ И ДР. (Revniltsev, M. and Lutovinov, A. and Churazov, E. and Sazonov, S. and Gilfanov, M. and Grebenev, S. and Sunyaev, R.), 2008, A&A, 491, 209-217
- [13] РЕВНИЦЕВ И ДР. (Revniltsev, M. and Sazonov, S. and Krivonos, R. and Ritter, H. and Sunyaev, R.), 2008, A&A, 489, 1121-1127

- [14] Сакстон и др. (Saxton, R. D. and Read, A. M. and Esquej, P. and Freyberg, M. J. and Altieri, B. and Bermejo, D.), 2008, A&A, 480, 611-622
- [15] Сазонов С.Ю., Чуразов Е.М. и Кривонос Р.А. (Sazonov, S. and Churazov, E. and Krivonos, R.), 2015, MNRAS, 454, 1202-1220
- [16] Уолтер и др. (Walter et al.), 2015, A&ARv, 23, 99
- [17] Харрисон и др. (Harrison, F. A. and Aird, J. and Civano, F. and Lansbury, G. and Mullaney, J. R. and Ballantyne, D. R. and Alexander, D. M. and Stern, D. and Ajello, M. and Barret, D. and Bauer, F. E. and Balokovic, M. and Brandt, W. N. and Brightman, M. and Boggs, S. E. and Christensen, F. E. and Comastri, A. and Craig, W. W. and Del Moro, A. and Forster, K. and Gandhi, P. and Giommi, P. and Grefenstette, B. W. and Hailey, C. J. and Hickox, R. C. and Hornstrup, A. and Kitaguchi, T. and Koglin, J. and Luo, B. and Madsen, K. K. and Mao, P. H. and Miyasaka, H. and Mori, K. and Perri, M. and Pivovarov, M. and Puccetti, S. and Rana, V. and Treister, E. and Walton, D. and Westergaard, N. J. and Wik, D. and Zappacosta, L. and Zhang, W. W. and Zoglauer, A.), ApJ, 831, 185
- [18] Хейнке и др. (Heinke, C., O. and Bahramian, A. and Maccarone, T. and in't Zand, J. and Kennea, J. and Kuulkers, E. and Degenaar, N. and Shaw, A., W. and Sivakoff, G., R. and Strader, J. and Wijnands, R.), 2017, ATel, 10265