

РЕНТГЕНОВСКОЕ ГАЛО ПУЛЬСАРА 4U 1538–52 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ SRG

© 2023 г. А. Е. Штыковский^{1,2*}, А. А. Лутовинов¹, Р. А. Кривонос¹, М. Р. Гильфанов^{1,3},
П. С. Медведев¹, И. А. Мереминский¹, В. А. Арефьев¹, С. В. Мольков¹, Р. А. Сюняев¹

¹Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

²НИУ “Высшая школа экономики”, ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000 Россия

³Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 14.09.2022 г.

После доработки 02.06.2023 г.; принята к публикации 02.06.2023 г.

Представлены первые результаты наблюдения области пульсара 4U 1538–52 обсерваторией SRG по данным телескопов ART-XC и eROSITA. В диапазоне энергий 0.5–8 кэВ вокруг источника регистрируется протяженное излучение в виде гало. Проведенное моделирование показало, что распределение его поверхностной яркости может быть описано двухкомпонентной моделью, составленной из плоского диска радиусом $\sim 250''$ и β -модели с характерным размером $\sim 480''$. Построен широкополосный спектр 4U 1538–52 в диапазоне энергий 0.5–30 кэВ, который может быть хорошо описан слабо поглощенным ($N_{\text{H}} \simeq 0.7 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$) степенным законом с завалом на высоких энергиях. Кроме того, в спектре пульсара регистрируются эмиссионные линии железа в области энергий 6–7 кэВ. Показано, что наблюдаемый спектр гало существенно мягче (показатель степенного закона $\simeq 2.8$) спектра пульсара (показатель степенного закона $\simeq 0.9$), что согласуется с предсказаниями теоретических моделей рассеяния излучения на пыли.

Ключевые слова: рентгеновские пульсары, нейтронные звезды, 4U 1538–52.

DOI: 10.31857/S0320010823050042, EDN: GMSHNT

1. ВВЕДЕНИЕ

Массивная рентгеновская двойная система 4U 1538–52 (также известная как 4U 1538–522) была открыта по данным обсерватории Uhuru (Джаккони и др., 1974). Пульсации в рентгеновском диапазоне были открыты в работах Дэвидсон (1977) и Бекер и др. (1977). Также по данным обсерватории Uhuru был обнаружен затменный характер системы (Коминский, Мораес, 1991), свидетельствующий о ее большом наклонении.

Двойная система состоит из нейтронной звезды, вращающейся вокруг оптического В-сверхгиганта QV Norma (Рейнольдс и др., 1992). Период орбитального обращения составляет ~ 3.73 дня (см. Фаланга и др., 2015, и ссылки там), а период собственного вращения пульсара ~ 526 с (см. Малакария и др., 2020, и ссылки там). Расстояние до системы в ~ 6.5 кпк было оценено еще в ранних работах (см., например, Иловайский и др., 1979; Рейнольдс и др., 1992), что недавно было подтверждено измерением параллакса по данным обсерватории Gaia $6.6_{-1.5}^{+2.2}$ кпк (Байлер-Джонс и др., 2018).

Спектральные и временные характеристики 4U 1538–52 изучались рядом рентгеновских обсерваторий в различных диапазонах энергий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что аккреция вещества на нейтронную звезду происходит из звездного ветра, истекающего со звезды-компаньона. Рентгеновский спектр в широком диапазоне энергий описывается моделью поглощенного степенного континуума с завалом на высоких энергиях (Родес-Рока и др., 2011; Хемпхилл и др., 2019). В спектре присутствует комплекс флуоресцентных линий железа на энергиях 6.4–6.7 кэВ (Родес-Рока и др., 2011). Помимо флуоресцентных линий, по данным обсерватории XMM-Newton было показано наличие в спектре источника линии поглощения на энергии ~ 2.1 кэВ (Родес-Рока и др., 2011). Эта линия не связана с циклотронным поглощением, так как ранее циклотронная линия поглощения была зарегистрирована на энергии ~ 22 кэВ (Кларк и др., 1990; Робба

* Электронный адрес: a.shtykovsky@cosmos.ru

и др., 2001; Хемпхилл и др., 2019) вместе с ее первой гармоникой на энергии ~ 47 кэВ (Родес-Рока и др., 2009), что дает оценку магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B \simeq 2.4 \times 10^{12}$ Гс. Светимость системы в диапазоне энергий 3–100 кэВ варьируется в диапазоне $\sim (2-9) \times 10^{36}$ эрг с^{-1} в предположении изотропного характера излучения и расстояния до системы 6.5 кпк (Рейнольдс и др., 1992).

Данные рентгеновских наблюдений показывают, что поглощение в системе сильно зависит от орбитальной фазы $N_H \sim (1-16) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (Кларк и др., 1994; Робба и др., 2001; Кларк, 2004). Интересно отметить, что во время затмения толщина колонки поглощения оказывается наименьшей (Афтаб и др., 2019) и согласуется со значением поглощения, определяемым по покраснению оптического компаньона (см. Валенчич, Смит, 2015, и ссылки там). Поглощение в направлении на источник, измеренное по распределению Галактического нейтрального водорода в линии 21 см, имеет сходное значение $N_{H \text{ Gal}} \simeq 7.3 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (Группа HI4PI, 2016).

Рассеяние рентгеновского излучения на пыли межзвездной среды может приводить к образованию рентгеновских гало вокруг источников. Теория формирования таких гало в применении к астрофизическим источникам была впервые предложена Овербеком (1965) и в дальнейшем развития в работах ряда авторов (см., например, Мошэ, Горенштейн, 1986; Мэтис, Ли, 1991; Предель, Шмитт, 1995; Смит, Двек, 1998; Дрейн, 2003). Рентгеновское гало вокруг пульсара 4U 1538–52 было впервые описано в работе Ву и др. (1992). В работах Нагасае и др. (2001) и Кларка (2004) по данным обсерваторий ASCA и Chandra были построены радиальные профили гало 4U 1538–52 и проведен спектральный анализ рентгеновского излучения пульсара. В частности, в работе Кларка (2004) по данным обсерватории Chandra профили рентгеновского гало были описаны моделью рассеяния рентгеновского излучения 4U 1538–52 на трех отдельных пылевых облаках, расположенных на луче зрения. Отметим, что в более современной работе Валенчича, Смита (2015) по данным обсерваторий XMM-Newton и Chandra этот результат воспроизвести не удалось.

В настоящей работе мы провели пространственный и спектральный анализы источника 4U 1538–52 по данным обсерватории СРГ, полученным во время фазы калибровочных наблюдений. В разделе “Наблюдения и обработка данных” описаны использованные наблюдения и обработка данных. В разделе “Анализ изображения” представлен пространственный анализ, в разделе “Спектральный

анализ” — анализ спектра пульсара. Выводы кратко представлены в разделе “Заключение”.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обсерватория Спектр–Рентген–Гамма (СРГ) (Сюняев и др., 2021), запущенная 13 июля 2019 г. с космодрома Байконур, имеет на борту два телескопа с рентгеновской оптикой косоугольного падения: eРОЗИТА, работающий в диапазоне энергий 0.2–8 кэВ (Предель и др., 2021), и ART-XC им. М.Н. Павлинского с рабочим диапазоном энергий 4–30 кэВ (Павлинский и др., 2021).

Телескоп СРГ/eРОЗИТА состоит из семи модулей рентгеновских телескопов (ТМ1–ТМ7) с общей эффективной площадью $\sim 2700 \text{ см}^2$ на энергии 1.5 кэВ, энергетическим разрешением 138 эВ на 6 кэВ и временным разрешением ~ 50 мс. Поле зрения eРОЗИТА составляет ~ 0.8 кв. град, угловое разрешение ~ 16 угл. сек (Предель и др., 2021). Первичная обработка и калибровка данных телескопа eРОЗИТА проводились с помощью программного обеспечения, разработанного в ИКИ РАН с использованием компонент системы eSASS, созданной в Институте внеземной физики Общества им. Макса Планка (Германия, Брюннер и др., 2022). При калибровке данных использовались результаты наземных калибровок, а также полетных калибровок, полученных в октябре–ноябре 2019 г.

Телескоп СРГ/ART-XC им. М.Н. Павлинского также состоит из семи модулей рентгеновских телескопов (Т1–Т7) с общей эффективной площадью $\sim 450 \text{ см}^2$ на энергии 6 кэВ, энергетическим разрешением 1.4 кэВ на 6 кэВ и временным разрешением ~ 23 мкс. Поле зрения ART-XC составляет ~ 0.3 кв. град, пространственное разрешение ~ 50 угл. сек (Павлинский и др., 2021). Для обработки данных СРГ/ART-XC использовалось программное обеспечение artpipeline версии 1.0 и CALDB версии 20220908.

В работе анализируются данные, полученные во время калибровочной фазы (CalPV) обсерватории СРГ. В рамках этой программы было проведено точечное наблюдение пульсара 4U 1538–52 (OBSID 11910027001, MJD = 58745.8) длительностью ~ 23 кс в период с 19 по 20 сентября 2019 г. Во время наблюдения работали все семь модулей ART-XC и один модуль eРОЗИТА (ТМ6).

Используя эфемериды из работы Хемпхилл и др. (2019) по данным монитора MAXI/GSC, полученные на временном интервале MJD от 58545 до 58945, методом наложения эпох была построена свертка кривой блеска 4U 1538–52 на интервале одного орбитального периода (см. рис. 1). Красной линией на рисунке показан интервал орбитальных

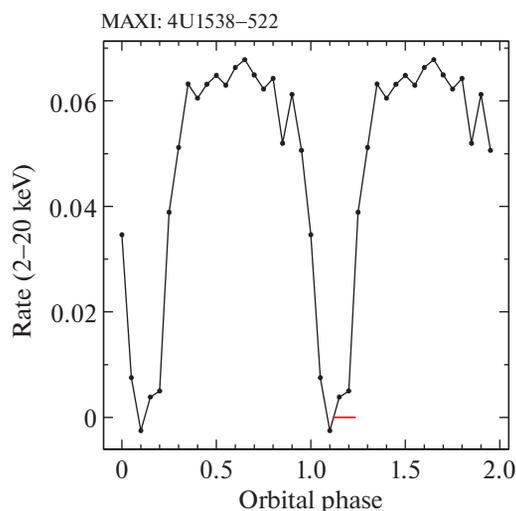


Рис. 1. Свертка кривой блеска 4U 1538–52 в одном орбитальном периоде по данным монитора MAXI/GSC (MJD от 58545 до 58945); красным цветом показан интервал наблюдений СРГ.

фаз, соответствующий наблюдению обсерватории СРГ, показывающий что оно попало на орбитальное затмение.

Исходные события извлекались в круговой области, центрированной на положении источника ($RA = 235.597^\circ$, $Dec = -52.385^\circ$). Для eРОЗИТА использовалась круговая область радиусом $60''$, для ART-XC — $150''$. Фоновые события извлекались в круговых областях радиусом $300''$, расположенных в стороне от источника (фоновые области eРОЗИТА и ART-XC центрировались на координатах $RA = 235.414^\circ$, $Dec = -52.223^\circ$ и $RA = 235.862^\circ$, $Dec = -52.289^\circ$ соответственно).

Спектральные данные eРОЗИТА группировались таким образом, чтобы в каждом бине было не менее одного отсчета. Для оценки качества аппроксимации использовалась статистика Кэша (Кэш, 1979). Группирование каналов осуществлялось с помощью стандартной процедуры GRPPHA из состава программ пакета HEASOFT (HEASARC, 2014). Анализ энергетических спектров источника проводился в пакете XSPEC версии 12.11.0 (Арно, 1996). Все доверительные интервалы приведены на уровне 1σ , если не указано иное.

При аппроксимации спектров использовалась модель поглощения рентгеновских лучей в межзвездной среде Вилмс и др. (2000), и модель сечений взаимодействия Вернер и др. (1996).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ изображений

Изображения области пространства, полученные за все время наблюдения, в полных рабочих диапазонах энергий представлены на рис. 2. На

левой панели представлено изображение, полученное eРОЗИТА по данным модуля ТМ6 в диапазоне энергий 0.5–8 кэВ. На правой — изображение, полученное ART-XC по данным модулей Т1–Т7 в диапазоне энергий 4–30 кэВ.

В поле зрения телескопа eРОЗИТА, помимо исследуемого, регистрируется еще 55 рентгеновских источников. В поле зрения телескопа ART-XC — один слабый источник 2ХММ J154305.5–522709 с координатами $RA = 235.7728^\circ$, $Dec = -52.4517^\circ$, который также регистрируется телескопом eРОЗИТА. Положения точечных источников на небе, регистрируемых одновременно по данным телескопов eРОЗИТА и ART-XC, совпадают с точностью до 5 угл. сек.

Хорошо видно, что на изображении, полученном телескопом eРОЗИТА, присутствует рентгеновское гало радиусом несколько угловых минут. На более высоких энергиях, в данных телескопа ART-XC, гало не наблюдается.

Анализ протяженного изображения

Для исследования структуры рентгеновского гало вокруг источника 4U 1538–52 по данным телескопа eРОЗИТА был использован метод моделирования пространственных компонент с учетом углового отклика рентгеновских зеркал. В основе метода лежит свертка двумерной пространственной модели с Функцией Размытия Точечного Источника (ФРТИ) телескопа, полученной из калибровочной базы данных. Результат свертки сравнивается с наблюдаемым изображением для нахождения наиболее оптимальных параметров модели. Оптимизация параметров

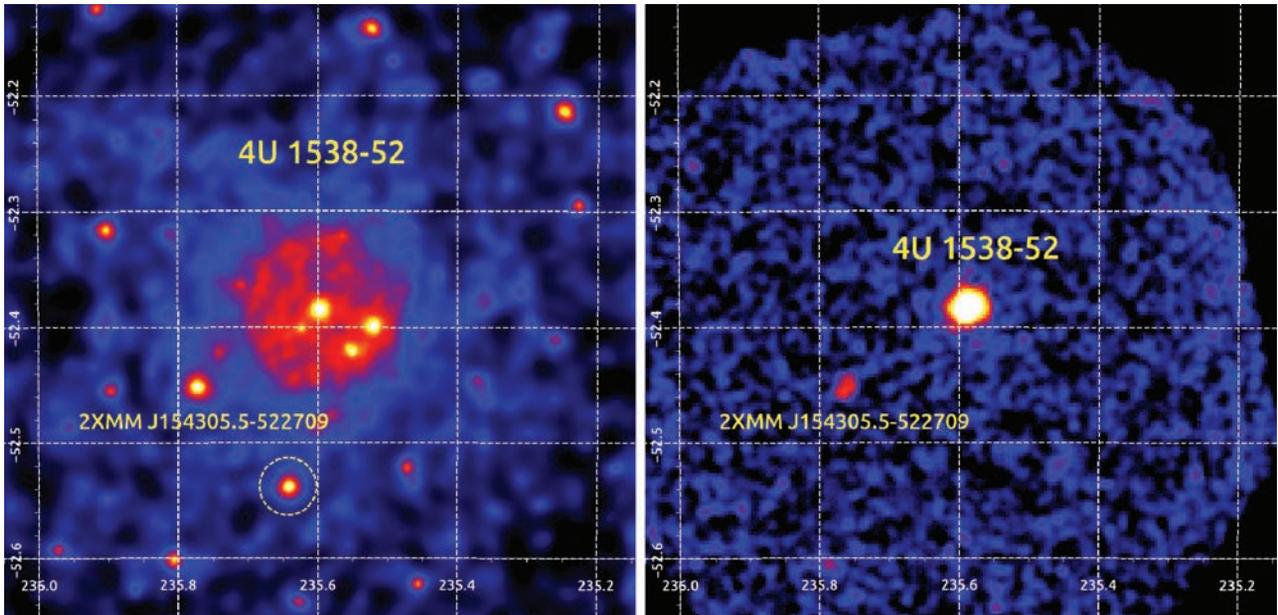


Рис. 2. Левая панель: изображение области неба вблизи пульсара 4U 1538–52 в экваториальной системе координат по данным SRG/eРОЗИТА, диапазон энергий 0.5–8 кэВ. Пунктирным кругом показан рентгеновский источник, использованный для проверки качества работы ФРТИ-моделирования. Правая панель: изображение того же участка неба по данным SRG/ART-XC, диапазон энергий 4–30 кэВ. Изображения были сглажены функцией Гаусса для лучшего отображения.

была проведена методом максимального правдоподобия в режиме Пуассоновской статистики. Для работы была построена карта экспозиции без учета эффекта виньетирования, в соответствии с подходом, изложенным в статье Кривонос и др. (2014). Точечные источники рентгеновского излучения, кроме центрального объекта, были исключены из анализа областей с радиусом $32''$. Данная процедура ФРТИ-моделирования была реализована с помощью пакета математического обеспечения Sherpa/CIAO-4.15 (Фриман и др., 2001; Фрусчione и др., 2006).

Для проверки работы процедуры ФРТИ-моделирования был проведен пространственный анализ точечного источника, обозначенного пунктирным кругом на рис. 2 (слева). Данный источник находится на угловом расстоянии $\sim 6'$ от оптической оси, что немного дальше, чем 4U 1538–52 ($\sim 3'$). Отметим, что для моделирования использовалась одна и та же ФРТИ телескопа, измеренная на оптической оси. Согласно калибровочным измерениям, ФРТИ телескопа eРОЗИТА для всех модулей не имеет значимых угловых деформаций на расстояниях до $\sim 10'$ (Предел и др., 2021). Для моделирования точечного источника была использована функция Гаусса `gauss2d`: $A_{\text{norm}} \exp(-4 \log(2) r^2 / \text{FWHM}^2)$, где A_{norm} — значение в центре, r — расстояние до центра и FWHM (Full Width Half Maximum) — ширина на

полувысоте, $\text{FWHM} = \sigma \sqrt{8 \log(2)} = 4''$. Отметим, что использование δ -функции в качестве приближения точечного источника приводит к численной неустойчивости ФРТИ-моделирования, поэтому применяется функция Гаусса с характерной шириной элемента изображения. В результате была получена хорошая аппроксимация точечного источника ФРТИ-моделированием с Пуассоновской статистикой, приведенной на количество степеней свободы $C/\text{d.o.f.} = 0.63$. Как видно из радиального профиля точечного источника, показанного на рис. 3, используемая ФРТИ телескопа и процедура ФРТИ-моделирования в целом, хорошо описывают наблюдаемую форму тестового источника и могут быть использованы для моделирования рентгеновского гало 4U 1538–52.

Для описания точечного центрального источника и рентгеновского гало в качестве модели были рассмотрены различные комбинации двумерных функций: функции Гаусса, описанной выше (`gauss2d`); `beta2d`: β -модель $A_{\text{norm}} / (1 + r^2 / R_c^2)$, где R_c^2 — размер ядра; `disk2d`: дисковая модель, описываемая радиусом и высотой; а также `const2d`: постоянная компонента суммы инструментального и астрофизического фона.

В процессе ФРТИ-моделирования было обнаружено, что 1) пространственная форма пульсара 4U 1538–52 не описывается приближением точечного источника, и требуется ввести небольшую протяженную структуру в виде β -модели;

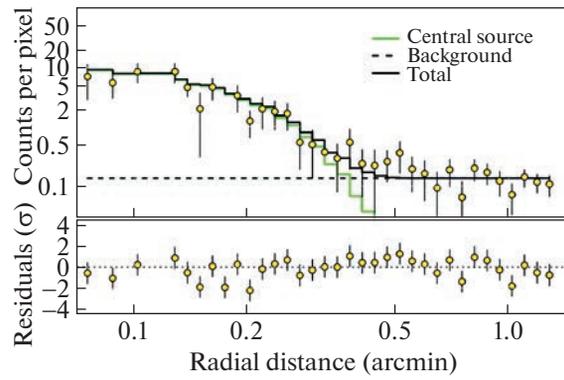


Рис. 3. Радиальный профиль точечного рентгеновского источника (см. рис. 2) в единицах отсчетов на элемент изображения по данным СРГ/еРОЗИТА, диапазон энергий 0.5–8 кэВ.

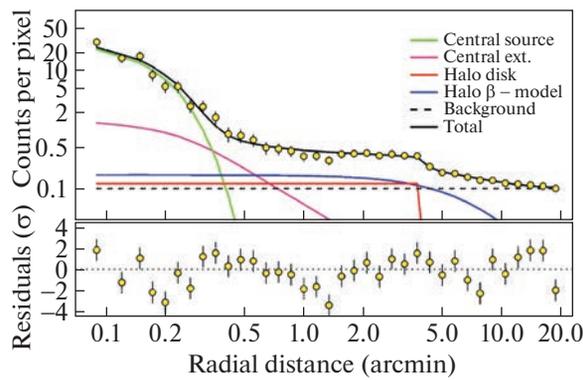


Рис. 4. Радиальный профиль гало 4U 1538–52 в единицах отсчетов на элемент изображения по данным СРГ/еРОЗИТА, диапазон энергий 0.5–8 кэВ.

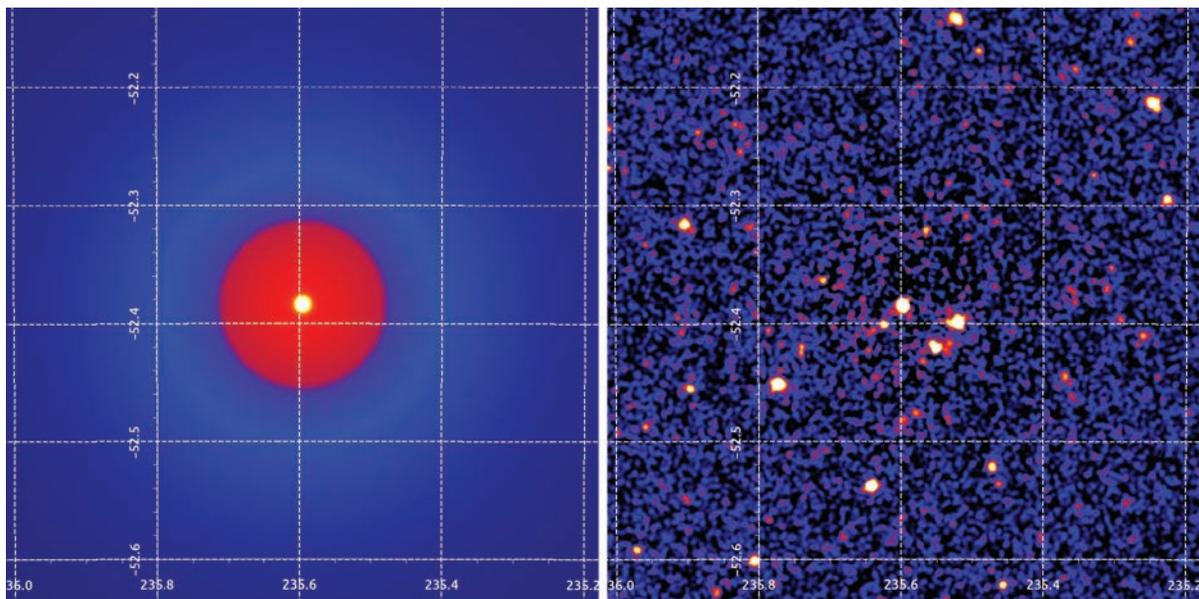


Рис. 5. Левая панель: составная модель поверхностной яркости области неба вблизи пульсара 4U 1538–52 в диапазоне энергий 0.5–8 кэВ по данным СРГ/еРОЗИТА (см. табл. 1). Правая панель: результат вычитания полной модели из изображения СРГ/еРОЗИТА (рис. 2, слева) за исключением компоненты центрального источника.

2) рентгеновское гало плохо моделируется одной β -функцией из-за достаточно резкой наблюдаемой границы радиальной структуры, для описания которой потребовалось добавить модель диска `disk2d`. Итоговое качество аппроксимации, описываемое приведенной Пуассоновской статистикой, составило $C/d.o.f. = 0.55$. Оптимальные параметры модели приведены в табл. 1. Необходимо подчеркнуть, что хотя данная модель хорошо описывает распределение поверхностной яркости рентгеновского гало 4U 1538–52, эта модель является феноменологической и не описывает физику наблюдаемого явления. Радиальный профиль центрального источника и рентгеновского гало продемонстрирован на рис. 4. На рис. 5 слева показано изображение составной пространственной модели в логарифмической шкале, а справа показано соответствующее вычитание модели из рентгеновского изображения (см. рис. 2, слева). Следует отметить, что модель центрального источника не вычиталась, поэтому он присутствует на карте остатков. В целом из рисунка видно, что крупномасштабная составная компонента рентгеновского гало (сумма β -модели и диска) была полностью вычтена из данных, что говорит о достаточно высоком качестве ФРТИ-моделирования.

Спектральный анализ

Спектральный континуум источника 4U 1538–52 по данным телескопа eROZITA описывается поглощенным степенным законом (модель `tbabs` \times `powerlaw` из пакета XSPEC). В спектре (см. рис. 6, панель (а)) также присутствуют избыток в излучении на энергиях 6–7 кэВ. Формально он может быть описан широкой (~ 0.23 кэВ) гауссианой с энергией ~ 6.53 кэВ, которая может быть интерпретирована как линия железа, уширенная, например, за счет эффекта Доплера. С другой стороны, из наблюдений обсерватории XMM-Newton известно, что в спектре 4U 1538–52 регистрируются узкие линии нейтрального Fe K_{α} ($E_1 \sim 6.4$ кэВ) и ионизированного Fe XXV ($E_2 \sim 6.7$ кэВ) железа (Родес-Рока и др., 2011; Афтаб и др., 2019). Поэтому для описания наблюдаемого избытка в излучении в модель поглощенного степенного закона были добавлены две соответствующие компоненты в форме гауссиан (`gauss`). Принимая во внимание конечное энергетическое разрешение телескопа eROZITA и ограниченную статистику в рассматриваемом наблюдении, ширины обеих линий были зафиксированы на 0. Помимо линий железа, по данным обсерватории XMM-Newton (см. Родес-Рока и др., 2014) в спектре пульсара была также зарегистрирована узкая линия поглощения на энергии $E_{abs} \sim 2.1$ кэВ. В спектре 4U 1538–52, полученном по данным обсерватории SRG, подобная особенность

Таблица 1. Параметры наилучшей аппроксимации составной пространственной модели излучения области 4U 1538–52 по данным телескопа eROZITA в диапазоне 0.5–8 кэВ. Нормировки моделей даны с учетом размера пикселя изображения 4 угл. сек. Потоки соответствующих компонент были получены интегрированием модели по всему изображению. Ошибки измерения параметров модели показаны на уровне значимости 68%

Параметр	Значение	Единицы
Центральный источник (Гауссиана <code>gauss2d</code>)		
FWHM	4 (фикс.)	угл. сек
A_{norm}	$(2.3^{+0.2}_{-0.3}) \times 10^{-2}$	отсч. сек $^{-1}$
Поток	$(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	отсч. сек $^{-1}$
Центральное уширение (β -модель <code>beta2d</code>)		
R_{core}	$8.7^{+5.0}_{-8.7}$	угл. сек
A_{norm}	$(1.1^{+5.3}_{-0.6}) \times 10^{-4}$	отсч. сек $^{-1}$
Поток	$(1.0 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	отсч. сек $^{-1}$
Гало (диск <code>disk2d</code>)		
Радиус	248^{+2}_{-5}	угл. сек
Высота	$5.20^{+0.85}_{-0.30} \times 10^{-6}$	отсч. сек $^{-1}$
Поток	$(6.3 \pm 0.17) \times 10^{-2}$	отсч. сек $^{-1}$
Гало (β -модель <code>beta2d</code>)		
R_{core}	480^{+160}_{-10}	угл. сек
A_{norm}	$7.25^{+0.40}_{-0.25} \times 10^{-6}$	отсч. сек $^{-1}$
Поток	$(2.40 \pm 0.03) \times 10^{-1}$	отсч. сек $^{-1}$
Фон (<code>const2d</code>)		
A_{norm}	$(4.26 \pm 0.02) \times 10^{-6}$	отсч. сек $^{-1}$

также присутствует (см. рис. 6). Добавление в модель еще одной компоненты в виде гауссианы с отрицательной нормировкой улучшает качество аппроксимации с $C = 427$ (428 степеней свободы) до $C = 409$ (425 степеней свободы).

Для исключения возможности возникновения этой линии поглощения в результате инструментального эффекта, нами был проведен спектральный анализ излучения рентгеновского источника 2XMM J154305.5–522709 (зарегистрированного телескопом eROZITA во время наблюдения

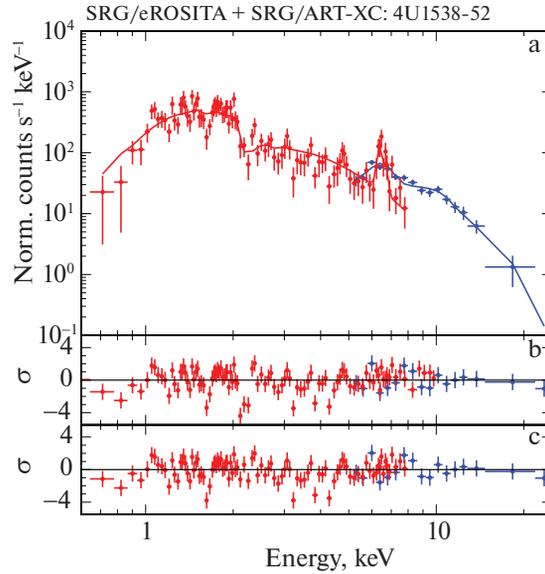


Рис. 6. (а) — Спектр пульсара 4U 1538–52 в диапазоне энергий 0.5–30 кэВ по данным телескопов eРОЗИТА (0.5–8 кэВ) и ART-XC (5–30 кэВ). Отклонения измеренного спектра от аппроксимирующей модели без учета (b) и с учетом (c) линии поглощения на энергии ~ 2.17 кэВ.

4U 1538–52, см. рис. 2). Полученный спектр в диапазоне энергий 0.5–8 кэВ хорошо описывается поглощенной степенной моделью. Добавление к этой модели компоненты линии поглощения в форме гауссианы (параметры энергии и ширины линии были зафиксированы на значениях для 4U 1538–52 из табл. 2) дает значение нормировки, совместимое с нулем $A_{\text{abs, tst}} = (-2.1^{+13.5}_{-11.9}) \times 10^{-7}$ фот. $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, в то время как значение нормировки линии поглощения в спектре 4U 1538–52 составляет $A_{\text{abs, psr}} = (-1.00^{+0.25}_{-0.32}) \times 10^{-5}$ фот. $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Это позволяет сделать вывод о том, что зарегистрированная в спектре 4U 1538–52 линия поглощения, скорее всего, не является приборной, а связана с физическими процессами, протекающими в исследуемом объекте. Одним из возможных объяснений наблюдаемой особенности, предложенной Родес-Рока и др. (2014), является ее связь с атомарными переходами в кислороде или неоне, находящимися в атмосфере нейтронной звезды в сильном магнитном поле, или в водородо- и гелиеподобных ионах железа или кремния, образованных в звездном ветре нормального компаньона. Тем не менее для окончательных выводов о природе регистрируемой линии поглощения необходимо провести дополнительные исследования и моделирования отклика зеркальных систем телескопа eРОЗИТА в области энергий 2.0–2.2 кэВ, где присутствует резкое изменение их эффективной площади (Предел и др., 2021).

Для исследования широкополосного спектра 4U 1538–52 данные модуля ТМ6 телескопа eРОЗИТА (в диапазоне энергий 0.5–8 кэВ) и

модулей Т1–Т7 телескопа ART-XC (в диапазоне энергий 5–30 кэВ) аппроксимировались совместно. На энергиях ниже 5 кэВ отклик ART-XC тре-

Таблица 2. Параметры наилучшей аппроксимации широкополосного спектра 4U 1538–52 по данным ART-XC и eРОЗИТА

Параметр	Значение	Единицы
$N_{\text{H}} [\times 10^{22}]$	$0.69^{+0.08}_{-0.06}$	см^{-2}
Γ	$0.85^{+0.09}_{-0.08}$	
E_{cut}	$13.57^{+3.20}_{-2.04}$	кэВ
E_{fold}	$5.02^{+6.70}_{-2.85}$	кэВ
E_1	$6.40^{+0.01}_{-0.01}$	кэВ
EW_1	524^{+188}_{-128}	эВ
E_2	$6.68^{+0.03}_{-0.02}$	кэВ
EW_2	277^{+117}_{-74}	эВ
E_{abs}	$2.17^{+0.03}_{-0.02}$	кэВ
σ_{abs}	$0.05^{+0.02}_{-0.02}$	кэВ
EW_{abs}	-111^{+46}_{-35}	эВ
C (d.o.f.)	590.79 (584)	

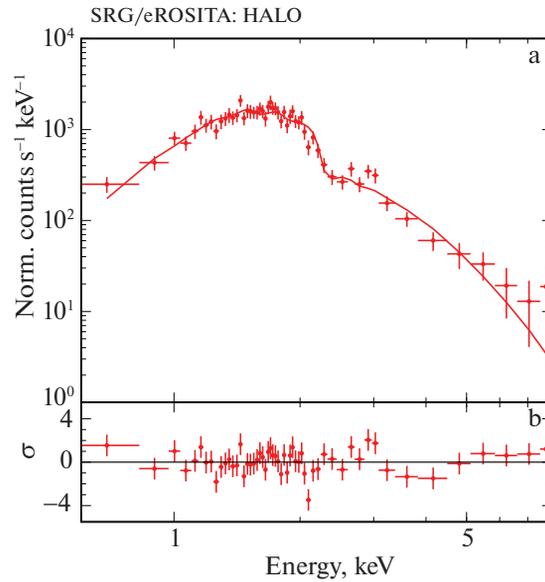


Рис. 7. (а) — Спектр гало пульсара 4U 1538–52 по данным телескопа eРОЗИТА (0.5–8 кэВ). (б) — Отклонения измеренного спектра от аппроксимирующей модели.

бует более тщательной калибровки, в связи с чем эта область не использовалась для спектрального анализа. Для учета разности калибровок модулей в модель были введены соответствующие нормировочные коэффициенты. Все прочие параметры фиксировались между наборами данных. Для учета экспоненциального завала на высоких энергиях, характерного для спектров рентгеновских пульсаров, в модель поглощенного степенного закона была добавлена соответствующая компонента (`highcut` из пакета XSPEC с параметрами E_{cut} и E_{fold}). Итоговая модель обеспечивает хорошее качество аппроксимации со значением $C = 590.79$ для 584 степеней свободы. Параметры наилучшей аппроксимации широкополосного спектра 4U 1538–52 представлены в табл. 2; здесь EW означает эквивалентную ширину указанных выше эмиссионных линий и линии поглощения. В целом они хорошо согласуются с оценками, полученными ранее по данным других рентгеновских обсерваторий, а значение поглощения примерно соответствует галактическому (см. Введение).

Нами также был построен спектр рентгеновского гало вокруг источника (рис. 7). Он извлекался в кольцевой области с радиусами от $R_1 = 80''$ до $R_2 = 250''$. Спектр описывается степенной моделью с поглощением со следующими параметрами: $\Gamma = 2.81^{+0.26}_{-0.22}$, $N_{\text{H}} = (1.70 \pm 0.25) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, при этом качество аппроксимации составило $C = 577.71$ для 577 степеней свободы. Следует отметить, что в спектре, в области энергий ниже ~ 1 кэВ, присутствует избыток фотонов, для описания которого нами была использована

модель черного тела с характерной температурой $kT = 0.07 \pm 0.01$ кэВ.

Сечение рассеяния рентгеновских фотонов на пылинках межзвездного вещества пропорционально E^{-2} , где E — энергия фотона (см. Дрейн, 2003, и ссылки там). Следовательно, можно ожидать, что наблюдаемый спектр гало будет мягче спектра источника. Предполагая, что средний спектр исходного источника степенной с показателем $\Gamma \approx 1$ (см. табл. 2, а также Хемпхилл и др., 2016), можно ожидать, что спектр гало будет иметь показатель $\Gamma \approx 3$, что близко к измеренному значению $\Gamma \approx 2.8$. В свою очередь, наблюдаемый избыток фотонов на энергиях ниже 1 кэВ может быть объяснен вкладом множественных рассеяний (Мэтис, Ли, 1991).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены первые результаты наблюдений пульсара 4U 1538–52 обсерваторией SRG по данным телескопов ART-XC и eРОЗИТА. В частности, построен широкополосный спектр в диапазоне энергий 0.5–30 кэВ, который может быть хорошо аппроксимирован степенным законом с поглощением на низких энергиях и экспоненциальным завалом на высоких энергиях, что типично для рентгеновских пульсаров. Интересно отметить низкое значение поглощения, измеренное в спектре источника и сравненное со значением галактического поглощения в его направлении. Столь низкая величина поглощения оказывается характерной для этого объекта во время орбитального затмения, на которое и пришлось наблюдение обсерватории SRG. В спектре

пульсара были зарегистрированы эмиссионные линии нейтрального и ионизованного железа, а также было независимо подтверждено наличие линии поглощения на энергии ~ 2.17 кэВ, природа которой окончательно не установлена.

Благодаря широкому полю зрения и высокой чувствительности телескопа eРОЗИТА удалось получить подробную карту гало вокруг 4U 1538–52 в диапазоне энергий 0.5–8 кэВ до радиуса примерно $8'$. Было показано, что рентгеновское гало содержит несколько крупномасштабных компонент, которые формально описываются композитной феноменологической моделью плоского диска ($\sim 250''$) и β -модели ($\sim 480''$). Измеренный спектр гало оказывается существенно мягче спектра пульсара, что согласуется с предсказаниями теоретических моделей рассеяния излучения на пыли.

Для более детального пространственного и спектрального анализа гало и физического моделирования его структуры и параметров необходимо улучшение статистики, которое может быть достигнуто в результате возможных дополнительных наблюдений исследуемого объекта.

В этом исследовании использованы данные наблюдений телескопов ART-XC и eРОЗИТА обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований в рамках Федеральной космической программы России с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Команда телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского благодарит госкорпорацию “Роскосмос”, Российскую академию наук и госкорпорацию “Росатом” за поддержку работ по разработке и изготовлению телескопа. Рентгеновский телескоп eРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка при поддержке DLR. Использованные в настоящей работе данные телескопа eРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом eРОЗИТА, и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа eРОЗИТА. АШ благодарит за поддержку грант РФФИ 20-32-90242.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арно (K.A. Arnaud), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **101**, 17 (1996).
2. Афтаб и др. (N. Aftab, B. Paul, and P. Kretschmar), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **243**, 29 (2019).
3. Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Foesneau, G. Mantelet, and R. Andrae), *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
4. Бекер и др. (R.H. Becker, J.H. Swank, E.A. Boldt, S.S. Holt, S.H. Pravdo, J.R. Saba, and P.J. Serlemitsos), *Astrophys. J. (Lett.)* **216**, L11 (1977).
5. Брюннер и др. (H. Brunner, T. Liu, G. Lamer, A. Georgakakis, and A. Merloni, et al.), *Astron. Astrophys.* **661**, A1 (2022).
6. Дэвидсон (P.J.N. Davison), *MNRAS.* **179**, 35 (1977).
7. Валенчич, Смит (L.A. Valencic and R.K. Smith), *Astrophys. J.* **809**, 66 (2015).
8. Вернер и др. (D.A. Verner, G.J. Ferland, K.T. Korista, and D.G. Yakovlev), *Astrophys. J.* **465**, 487 (1996).
9. Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
10. Ву и др. (J.W. Woo, G.W. Clark, and F. Nagase), *Am. Astron. Soc. Meet. Abstracts* **180**, 44 (1992).
11. Группа HI4PI (HI4PI Collaboration and N. Ben Bekhti, L. Flöer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, B. Winkel, J. Bailin, M.R. Calabretta, et al.), *Astron. Astrophys.* **594** (2016).
12. Джаккони и др. (R. Giacconi, S. Murray, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier, T. Matilsky, D. Koch, and H. Tananbaum), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **27**, 37 (1974).
13. Дрейн (B.T. Draine), *Astrophys. J.* **598**, 1026 (2003).
14. Иловайский и др. (S.A. Ilovaisky, C. Chevalier, and C. Motch), *Astron. Astrophys.* **71**, L17 (1979).
15. Кларк (G.W. Clark), *Astrophys. J.* **610**, 956 (2004).
16. Кларк и др. (G.W. Clark, J.W. Woo, F. Nagase, K. Makishima, and T. Sakao), *Astrophys. J.* **353**, 274 (1990).
17. Кларк и др. (G.W. Clark, J.W. Woo, and F. Nagase), *Astrophys. J.* **422**, 336 (1994).
18. Коминский, Мораес (L.R. Cominsky and F. Moraes), *Astrophys. J.* **370**, 670 (1991).
19. Кривонос и др. (R.A. Krivonos, J.A. Tomsick, F.E. Bauer, F.K. Baganoff, N.M. Barriere, et al.), *Astrophys. J.* **781**, 107 (2014).
20. Кэш (W. Cash), *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).
21. Малакария и др. (C. Malacaria, P. Jenke, O.J. Roberts, C.A. Wilson-Hodge, W.H. Cleveland, B. Mailyan, and GBM Accreting Pulsars Program Team), *Astrophys. J.* **896**, 90 (2020).
22. Мошэ, Горенштейн (C.W. Mauche and P. Gorenstein), *Astrophys. J.* **302**, 371 (1986).
23. Мэтис, Ли (J.S. Mathis and C.-W. Lee), *Astrophys. J.* **376**, 490 (1991).
24. Нагаса и др. (F. Nagase, T. Dotani, T. Endo, H. Ozawa, S. Uno, T. Kotani, and T. Mihara), *Am. Inst. Phys. Conf. Ser.* **599**, 794 (2001).
25. HEASARC (Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center), *HEASoft: Unified Release of FTOOLS and XANADU* (2014).
26. Овербек (J.W. Overbeck), *Astrophys. J.* **141**, 864 (1965).

27. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, Yu. Bodnar, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
28. Предель, Шмитт (P. Predehl and J.H.M.M. Schmitt), *Astron. Astrophys.* **293**, 889 (1995).
29. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, H. Böhringer, A. Bogomolov, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
30. Рейнольдс и др. (A.P. Reynolds, S.A. Bell, and R.W. Hilditch), *MNRAS.* **256**, 631 (1992).
31. Робба и др. (N.R. Robba, L. Burderi, T. Di Salvo, R. Iaria, and G. Cusumano), *Astrophys. J.* **562**, 950 (2001).
32. Родес-Рока и др. (J.J. Rodes-Roca, J.M. Torrejón, I. Kreikenbohm, S. Martínez Núñez, A. Camero-Arranz, and G. Bernabéu), *Astron. Astrophys.* **508**, 395 (2009).
33. Родес-Рока и др. (J.J. Rodes-Roca, K.L. Page, J.M. Torrejón, J.P. Osborne, and G. Bernabéu), *Astron. Astrophys.* **526**, A64 (2011).
34. Родес-Рока и др. (J.J. Rodes-Roca, J.M. Torrejón, S. Martínez-Nuñez, A. Giménez-García, and G. Bernabéu), *Astronomische Nachrichten* **225**, 804 (2014).
35. Смит, Двек (R.K. Smith and E. Dwek), *Astrophys. J.* **503**, 831 (1998).
36. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, H. Brunner, R. Burenin, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
37. Фаланга и др. (M. Falanga, E. Bozzo, A. Lutovinov, J.M. Bonnet-Bidaud, Y. Fetisova, and J. Puls), *Astron. Astrophys.* **809**, 66 (2015).
38. Фриман и др. (P. Freeman, St. Doe, and A. Siemiginowska), *Proceedings of the SPIE* **4477**, 76 (2001).
39. Фрусчоне и др. (A. Fruscione, J.C. McDowell, G.E. Allen, N.S. Brickhouse, D.J. Burke, et al.), *Proceedings of the SPIE* **6270** (2006).
40. Хемпхилл и др. (P.B. Hemphill, R.E. Rothschild, F. Fürst, V. Grinberg, D. Klochkov, P. Kretschmar, et al.), *Astrophys. J.* **458**, 2745 (2016).
41. Хемпхилл и др. (P.B. Hemphill, R.E. Rothschild, D.M. Cheatham, F. Fürst, P. Kretschmar, et al.), *Astrophys. J.* **873**, 62 (2019).