ИЗМЕНЕНИЕ ПРИРОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТИНУУМА И СТАБИЛЬНОСТЬ ЦИКЛОТРОННОЙ ЛИНИИ В РЕНТГЕНОВСКОМ ПУЛЬСАРЕ GRO J2058+42

© 2022 г. А. С. Горбан^{1,2*}, С. В. Мольков¹, С. С. Цыганков^{3,1}, А. А. Муштуков^{4,1}, А. А. Лутовинов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия ²НИУ "Высшая школа экономики", Москва, Россия ³Университет Турку, факультет физики и астрономии, Турку, Финляндия ⁴Лейденская обсерватория, Лейденский университет, Лейден, Нидерланды Поступила в редакцию 01.02.2022 г. После доработки 01.03.2022 г.; принята к публикации 02.03.2022 г.

Представлены результаты исследования транзиентного рентгеновского пульсара GRO J2058+42 в широком диапазоне энергий в состоянии со светимостью $L_x \simeq 2.5 \times 10^{36}$ эрг с⁻¹. В ходе работы было обнаружено, что профиль импульса источника, так же как и доля пульсирующего излучения, значительно изменились по сравнению с предыдущими наблюдениями обсерватории NuSTAR, выполненными когда пульсар был примерно в 10 раз ярче. Положение циклотронной линии на энергии ~ 10 кэВ в узкой фазовой области согласуется с наблюдениями в высоком состоянии. Спектральный анализ показал, что при высоких светимостях $L_x \simeq (2.7 - 3.2) \times 10^{37}$ эрг с⁻¹ спектр имеет типичную для аккрецирующих пульсаров форму, в то время как при падении светимости примерно на порядок, до $L_x \simeq 2.5 \times 10^{36}$ эрг с⁻¹, для описания спектра необходимо использование двухкомпонентной модели. Указанное поведение вписывается в модель, в рамках которой низкоэнергетическая часть спектра образуется в горячем пятне, а высокоэнергетическая — в результате резонансного комптоновского рассеяния на падающем веществе в аккреционном канале над поверхностью нейтронной звезды.

Ключевые слова: GRO J2058+42, Х-гау источники, аккреция, магнитное поле.

DOI: 10.31857/S0320010822040027

ВВЕДЕНИЕ

Транзиентный рентгеновский пульсар GRÓ J2058+42 впервые был обнаружен во время гигантской вспышки в сентябре 1995 г. с помощью инструмента BATSE, входящего в состав орбитальной обсерватории Compton Gamma Ray Observatory (Уилсон и др., 1995). Вспышка второго типа (яркие вспышки в рентгеновских Ве-системах, которые не зависят от орбитальной фазы двойной системы с пиковой светимостью, достигающей эддингтоновского предела для нейтронной звезды) длилась около 46 дней, за время которой период пульсаций потока от источника уменьшился со 198 до 196 с. Максимальный поток от пульсара во время вспышки составил около 300 мКраб в диапазоне энергий 20-100 кэВ. После основной вспышки источник оставался активным примерно два года, демонстрируя серию более слабых всплесков первого типа (более слабые вспышки, связанные с прохождением нейтронной звездой периастра двойной системы) с максимальным пульсирующим потоком 10—15 мКраб (20—50 кэВ) и с интервалами между ними около 110 дней, интерпретируемыми как орбитальный период двойной системы. Небольшие повышения яркости до ~8 мКраб наблюдались также между основными вспышками (Уилсон и др., 1995). Эти вспышки были подтверждены инструментом RXTE/ASM и указывали на возможный более короткий орбитальный период в 55 дней (Корбет и др., 1997; Уилсон и др., 2005).

После указанного периода активности GRO J2058+42 перешел в спокойное состояние и не проявлял вспышечной активности в рентгеновском диапазоне до 22 марта 2019 г., когда Burst Alert Telescope (BAT) на борту обсерватории Swift им. Н. Джерельса (Джерельс и др., 2004) и Gamma-ray Burst Monitor (Миган

^{*}Электронный адрес: gorban@iki.rssi.ru

Телескоп	Дата	ObsID	Экспозиция, кс
NuSTAR	25.03.2019 (MJD 58567)	90501313002	20
NuSTAR	28.08.2019 (MJD 58723)	90501336002	38
Swift/XRT	28.08.2019 (MJD 58723)	00088982001	2

Таблица 1. Наблюдения GRO J2058+42, используемые в настоящей работе

и др., 2009) обсерватории Fermi зафиксировали новую гигантскую вспышку излучения (Бартельми и др., 2019; Малакария и др., 2019) с пиком светимости, аналогичным предыдущей вспышке, произошедшей в 1995 г. Во время этой вспышки источник наблюдался орбитальными обсерваториями Swift, NICER, Fermi, также было проведено два наблюдения обсерваторией NuSTAR вблизи максимума светимости пульсара.

Периодические вспышки излучения, следующие за гигантской вспышкой, указывают на то, что звездой-компаньоном в системе является звезда класса Ве. Более точно оптический компаньон был установлен с помощью оптической фотометрии и спектроскопии (Рэйг и др., 2005) и был отождествлен со звездой класса O9.5-B0IV-Ve, расположенной на расстоянии 9 ± 1 кпк. Расстояние до системы $8^{+0.9}_{-1.2}$ кпк (далее будет использоваться для расчетов) было уточнено по данным телескопа Gaia (Арнасон и др., 2021).

Используя данные обсерватории NuSTAR, полученные во время вспышки II типа в 2019 г., Мольков и др. (2019) обнаружили линию циклотронного поглощения в спектре источника на энергии около 10 кэВ и две ее высшие гармоники около 20 и 30 кэВ, регистрируемые, однако, только в узком интервале фаз вращения пульсара. Эти измерения позволили оценить напряженность магнитного поля нейтронной звезды в системе около $\sim 10^{12}$ Гс. Анализ данных обсерватории AstroSat подтвердил наличие циклотронной линии и двух ее гармоник в спектре GRO J2058+42 (Мукерджи и др., 2020) так же, как и значительные вариации их параметров с фазой пульсаций. Кроме того, авторам удалось обнаружить квазипериодические пульсации на частоте 0.09 Гц в спектре мощности источника.

Для того чтобы исследовать свойства пульсара при низких темпах аккреции (см., например, обзор Цыганкова и др., 2017, свойства пульсаров Весистемах), нами было заказано еще одно наблюдение обсерватории NuSTAR, которое проводилось примерно через 150 дней после максимума основной вспышки. В результате от источника был зарегистрирован поток $F_3 = (3.3^{+0.4}_{-2.8}) \times 10^{-10}$ эрг см⁻² c^{-1} в энергетическом диапазоне 3–79 кэВ, что примерно на порядок ниже по сравнению с потоками, зарегистрированными от источника во время двух первых наблюдений обсерватории NuSTAR: $F_1 =$ = $(3.6 \pm 0.1) \times 10^{-9}$ эрг см⁻² с⁻¹ и $F_2 = (4.3 \pm \pm 0.1) \times 10^{-9}$ эрг см⁻² с⁻¹ (Мольков и др., 2019).

Данная работа посвящена изучению характеристик пульсара в низком состоянии и их сравнению с ранее полученными для яркого состояния.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Наблюдение источника GRO J2058+42 в состоянии с низкой светимостью было проведено 28 августа 2019 г. (MJD 58723) с экспозицией около 38 кс (ObsID 90501336002). Для исследования спектральных и временных характеристик пульсара в широком энергетическом диапазоне наблюдение было выполнено одновременно обсерваториями NuSTAR и Swift.

Обсерватория NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope ARray) чувствительна к рентгеновскому излучению в диапазоне энергий от 3 до 79 кэВ. регистрируя его с помощью двух совмещенных идентичных рентгеновских телескопов (FPMA и FPMB), имеющих энергетическое разрешение около 400 эВ на энергии 10 кэВ (Харрисон и др., 2013). Данные обрабатывались в соответствии со стандартными процедурами обработки и стандартного программного обеспечения анализа данных NuSTAR (NuSTARDAS v1.9.7), поставляемого в рамках пакета HEASOFT v6.29 с версией калибровок CALDB v20211202. Первичная обработка данных выполнялась с помощью процедуры NUPIPELINE, далее мы использовали NUPRODUCTS для получения энергетических спектров источника и его кривых блеска. Данные двух модулей для источника были извлечены из круговых областей радиусом 50", центрированных на источник. Фоновая область, радиус которой составил также 50", была извлечена на том же чипе. Для сравнения свойств пульсара в состояниях с разной интенсивностью в данной работе также использовались данные наблюдения NuSTAR, выполненного 25 марта 2019 г. (ObsID 90501313002) с экспозицией около 20 кс (табл. 1), фоновый



Рис. 1. Кривая блеска рентгеновского пульсара GRO J2058+42 в нескольких диапазонах энергии по данным разных инструментов. Потоки, измеренные разными приборами, приведены в разных единицах и перенормированы для большей наглядности (см. вставку). Цифрами отмечены наблюдения NuSTAR. Шкала справа показывает соответствующую светимость, предполагая расстояние до системы 8 кпк. На данном изображении светимость представлена в диапазоне энергий 1–10 кэВ для наглядности профиля кривой блеска.

спектр извлекался на соседнем чипе, так как источник был очень яркий. Фотоны от источника и фона извлекались из круговых областей радиусом 70".

Чтобы расширить диапазон энергий, были добавлены спектральные данные наблюдения GRO J2058+42, проведенного телескопом Swift/XRT в диапазоне 0.3–10 кэВ одновременно с наблюдением NuSTAR 28 августа 2019 г. (ObsID 00088982001) с экспозицией 2 кс. Спектры источника были получены с помощью онлайнинструментов (Эванс и др., 2009), предоставленных UK Swift Science Data Centre при Университете Лестера.¹ В работе использовались данные, полученные в режиме счета фотонов (Photon Counting, PC). Для спектрального анализа с использованием χ^2 статистики все полученные энергетические спектры были сгруппированы по 25 отсчетов на канал. Аппроксимация спектров проводилась в пакете XSPEC v12.12.0 (Арно и др., 1999).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Несколько наблюдений GRO J2058+42, выполненных обсерваторией NuSTAR во время его вспышечной активности в 2019 г., позволили нам провести детальный сравнительный анализ временных и спектральных свойств пульсара в состояниях с темпом аккреции, различающимся примерно в 10 раз: светимость в ярком состоянии $L_x \simeq 2.7 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹ (ObsID 90501313002), в низком $L_x \simeq 2.5 \times 10^{36}$ эрг с⁻¹ (ObsID 90501336002) (здесь и далее используются значения для энергетического диапазона 3–79 кэВ). Кривая блеска, полученная по данным разных инструментов, приведена на рис. 1.

¹http://www.swift.ac.uk/user_objects/



Рис. 2. Профили импульса GRO J2058+42 в широком диапазоне энергий 3–79 кэВ по данным обсерватории NuSTAR. Красным цветом показано наблюдение в ярком состоянии, выполненное 25 марта 2019 г. (ObsID: 90501313002), зеленым — наблюдение 28 августа 2019 г. (ObsID: 90501336002).

Временной анализ излучения GRO J2058+42

Для временного анализа данных обсерватории NuSTAR времена прихода фотонов были сначала скорректированы на барицентр Солнечной системы с помощью стандартных инструментов пакета HEASOFT. В связи с отсутствием хорошо измеренных параметров орбиты двойной системы коррекция времени прихода фотонов на орбитальное движение нейтронной звезды не проводилась. Все кривые блеска были получены с временным разрешением 0.1 с, затем из них вычитался фон и кривые блеска двух модулей объединялись с помощью инструмента lcmath (FTOOLS V6.29). Далее с помощью метода наложения эпох, реализованного в программе efsearch из пакета HEASOFT, был определен период пульсаций излучения, который в низком состоянии составил 193.375 ± 0.001 с. Погрешность на значение периода была оценена с помощью моделирования кривой блеска методом Монте-Карло, описанном в работе Болдина и др. (2013).

Используя определенное выше значение периода пульсаций, был получен профиль импульса GRO J2058+42 в широком диапазоне энергий 3— 79 кэВ и проведено его сравнение с профилем импульса в ярком состоянии (рис. 2). На рисунке видно, что профиль импульса несколько изменился по сравнению с наблюдениями на высоких светимостях. Основные различия в профилях приходятся на четко выраженный главный пик: в ярком состоянии на фазах 0.25–0.35 его относительная интенсивность значительно больше, чем в низком состоянии. В то же время в низком состоянии появляется ярко выраженный глубокий узкий минимум на фазах 0.65–0.75. Также в ярком состоянии на фазе 0.1 присутствует дополнительный пик, возможно связанный с более сложной структурой эмиссионных областей на поверхности нейтронной звезды.

На следующем этапе были извлечены кривые блеска источника по данным обоих модулей обсерватории NuSTAR в энергетических диапазонах 3-5, 5-7, 7-9, 9-11, 11-15, 15-19, 19-23, 23-29,29-41 и 41-79 кэВ. На рис. 3 приведены полученные фазовые кривые блеска источника. Видно, что профиль импульса существенно изменяется с энергией. В диапазоне энергий от 3 до ~10 кэВ в профиле видны четыре отдельных пика на фазах 0.1, 0.3, 0.6, как и в ярком состоянии (Мольков и др., 2019), также в низком состоянии просматривается широкой пик около фазы 0.7-0.9. По мере увеличения энергии пик на фазе 0.3 расширяется, как и в ярком состоянии, пик на фазе 0.7-0.9 сохраняется на всех энергиях до ~40 кэВ. На более высоких энергиях вторичный пик исчезает,



Рис. 3. Профили импульса GRO J2058+42 в низком состоянии в десяти энергетических диапазонах, полученные по данным обсерватории NuSTAR в августе 2019 г. Профили смещены по оси *Y* для наглядности.

что приводит к появлению относительно плоского участка в широком диапазоне фаз 0.5–1.0. Данная форма профиля импульса наблюдалась и в предыдущих работах на энергиях 20–70 кэВ (Уилсон и др., 1998).

Нами была построена зависимость доли пульсирующего излучения от энергии для обоих используемых в работе наблюдений обсерватории NuSTAR. Доля пульсирующего излучения определялась как отношение $(F_{\max} - F_{\min})/(F_{\max} + F_{\min})$, где F_{\max} и F_{\min} — максимальный и минимальный поток в профиле импульса, состоящем из 20 бинов соответственно. Согласно полученным результатам (рис. 4), доля пульсирующего излучения пульсара в обоих состояниях увеличивается с ростом энергии, что типично для большинства рентгеновских пульсаров (Лутовинов, Цыганков, 2009). Однако данный рост происходит не монотонно. В частности, в ярком состоянии (красные точки) явно видна особенность в районе 10 кэВ, где находится линия циклотронного поглощения. В низком состоянии (синие точки) на этой энергии также виден слом зависимости. Особенности на энергиях, соответствующих высшим гармоникам линии, не видны из-за недостаточной статистики и большой ширины энергетических каналов. Важно отметить,

что наличие подобных особенностей в доле пульсирующего излучения в районе циклотронной энергии было показано раньше для ряда рентгеновских пульсаров (Цыганков и др., 2007, 2010; Лутовинов, Цыганков, 2009; Лутовинов и др., 2017).

Спектральный анализ источника GRO J2058+42

сравнения спектральных Для свойств GRO J2058+42 в состояниях с разной интенсивностью мы использовали модель континуума в форме тепловой комптонизации (СОМРТТ, Титарчук, 1994), которая применялась Мольковым и др. (2019) для описания спектра источника в ярком состоянии. Также в модель была добавлена эмиссионная линия железа на энергии 6.4 кэВ, ширина которой была зафиксирована на значении 0.24 кэВ, определенной в работе Молькова и др. (2019). Межзвездное поглощение было учтено включением в модель компоненты PHABS. Полученное поглощение $N_{\rm H}\simeq 7\times 10^{21}~{\rm cm}^{-2}$ хорошо согласуется со значением Галактического поглошения в направлении источника $\sim 6.19 \times 10^{21}$ см $^{-2}$ (НІ4РІ сотрудничество, Бехти и др., 2016, НІ4РІ Collaboration). Для того чтобы учесть различные



Рис. 4. Зависимость доли пульсирующего излучения GRO J2058+42 от энергии по данным обсерватории NuSTAR для двух наблюдений: зеленым цветом показана зависимость в низком состоянии (ObsID 90501336002), красным цветом — в ярком состоянии (ObsID 90501313002), штриховыми линиями отмечены соответствующие значения циклотронной энергии и ее гармоник.

калибровки инструментов FPMA и FMPB на борту NuSTAR, а также неодновременность наблюдений обсерваторий NuSTAR и Swift, были введены нормировочные коэффициенты (табл. 2), остальные параметры модели для разных инструментов фиксировались между собой.

В отличие от данных, полученных в ярком состоянии, для низкого состояния модель PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT) показывает неудовлетворительное качество аппроксимации широкополосного спектра GRO J2058+42 с $\chi^2 =$ = 1443.92 для 1218 степеней свободы и заметными отклонениями в районе энергии ~27 кэВ (рис. 5b). Формально, чтобы описать эту особенность, в модель можно добавить широкую линию поглощения с гауссовым профилем GABS. Это привело к значительному улучшению качества аппроксимации модели $\chi^2 = 1262.05$ (1216 степеней свободы) (рис. 5с). Однако значительная ширина линии (табл. 2) и обнаруженные ранее Мольковым и др. (2019) циклотронные линии поглощения на других энергиях ставят под

сомнение физический смысл этой компоненты. Поэтому мы применили другой подход в описании спектра и использовали комбинацию двух моделей комптонизированного излучения (модель compTT + compTT в XSPEC) в качестве континуума. Следуя подходу из работы Цыганкова и др. (2019), температуры затравочных фотонов обеих компонент были связаны между собой. Данная модель PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT+COMPTT) показала наилучшее качество аппроксимации с $\chi^2 = 1219.86$ для 1214 степеней свободы (рис. 5d). Параметры модели приведены в табл. 2.

Ранее в работе Молькова и др. (2019) было показано, что в фазово-разрешенном спектре источника в ярком состоянии на фазах импульса 0.05— 0.15 присутствует циклотронная линия с энергией ~10 кэВ, а также ее гармоники на ~20 и ~30 кэВ. Нами также была проведена фазово-разрешенная спектроскопия по данным третьего наблюдения обсерватории NuSTAR. Как и для фазовоусредненного спектра мы использовали модель PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT+COMPTT). Мо-

Параметры модели	CompTT+GABS	CompTT+CompTT
$N_{ m H}, 10^{22}~{ m cm}^{-2}$	0.2 ± 0.1	$0.7^{+0.2}_{-0.2}$
$E_{ m Fe},$ кэ $ m B$	6.4, fixed	$6.32_{-0.08}^{+0.08}$
$\sigma_{ m Fe},$ кэ $ m B$	0.24	0.24, fixed
<i>W</i> _{Fe} , кэВ	$0.03\substack{+0.01\\-0.01}$	$0.04\substack{+0.02\\-0.01}$
$E_{ m Cycl}$, кэ $ m B$	27.2 ± 0.7	_
$\sigma_{ m Cycl}$, кэ $ m B$	10 ± 2	_
$ au_{ m Cycl}$	0.53 ± 0.15	_
$T_{0,\text{Comptt}}$, low, кэВ	1.27 ± 0.03	$1.01\substack{+0.05 \\ -0.06}$
$kT_{ ext{Comptt}}$, low, кэ $ ext{B}$	10.9 ± 0.7	$3.9^{+0.4}_{-0.4}$
$ au_{\mathrm{Comptt}}$, low	3.7 ± 0.4	$8.0^{+16.8}_{-1.8}$
$T_{0, ext{Comptt}}$, high, кэ $ ext{B}$	_	$=T_{0,\text{Comptt}},$ low
$kT_{ m Comptt}$, high, кэ $ m B$	_	$14.6^{+1.1}_{-1.2}$
$ au_{ m Comptt}$, high	_	$2.9\substack{+0.9\\-0.5}$
Flux (3–79 кэВ), 10^{-10} эрг см ⁻² с ⁻¹	$3.2^{+0.1}_{-0.1}$	$3.3^{+0.4}_{-2.8}$
$C_{ m NuSTAR}$	$0.99\substack{+0.01\\-0.01}$	$0.99\substack{+0.01\\-0.01}$
$C_{\rm XRT}$	$0.89^{+0.04}_{-0.04}$	$0.89\substack{+0.04\\-0.04}$
χ^2 (d.o.f.)	1262.05 (1216)	1219.86(1214)

Таблица 2. Параметры спектра GRO J2058+42 для моделей CompTT+GABS и CompTT+CompTT

PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT+COMPTT) лель без дополнительных компонент адекватно описала все фазовые спектры, за исключением фазы 0.05-0.15, аппроксимация которой дала неприемлемое значение $\chi^2 = 495.61$ для 406 степеней свободы изза появления особенности около 10 кэВ (рис. 6b). Для описания данной особенности нами была включена дополнительная компонента GABS около 10 кэВ (рис. 6с), что значительно улучшило качество аппроксимации до $\chi^2 = 451.09$ для 403 степеней свободы (табл. 3). Таким образом, линия циклотронного поглощения на энергии ~10 кэВ была подтверждена в спектре источника в низком состоянии на тех же фазах, что и в предыдущих наблюдениях. Из-за низкой статистики нам не удалось зарегистрировать гармоники на энергиях 20 и 30 кэВ.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе показано, что при уменьшерентгеновского светимости пульсара нии GRO J2058+42 до нескольких на 10³⁶ эрг с⁻¹ энергетический спектр источника значительно изменился. В частности, аппроксимация моделью тепловой комптонизации (COMPTT), хорошо работающая для яркого состояния пульсара (Мольков и др., 2019), перестала описывать спектр. Произошло это в связи с явным изменением формы спектра, выраженным в его уплощении в районе 10-30 кэВ. Как было показано выше, получить приемлемую аппроксимацию спектра можно путем модификации модели добавлением либо линии поглощения на энергии около 27 кэВ, либо добавлением второй эмиссионной компоненты с высокой температурой (СОМРТТ+СОМРТТ). Однако слишком большая ширина абсорбционной особенности и наличие истинных циклотронных



Рис. 5. (а) — Энергетический спектр GRO J2058+42, полученный по данным NuSTAR в августе 2019 г. (ObsID 90501336002)(зеленые и черные точки) и Swift/XRT (красные точки), сплошными линиями показана модель, наилучшим образом описывающая спектр; серыми точками показан энергетический спектр по данным NuSTAR, полученным в марте 2019 г. (ObsID 90501313002). (b) — Отклонение наблюдательных данных от модели PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT) без включения в модель других компонент, (c) — для модели PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT)*GABS, (d) — отклонение наблюдательных данных от модели PHABS*(daussian+compth).

линий в фазово-разрешенных спектрах источника на других энергиях исключают интерпретацию уплощения спектра через циклотронное поглощение.

Появление же второй эмиссионной компоненты на высоких энергиях в пульсарах с низкой светимостью является достоверно установленным фактом (Цыганков и др., 2019а,6; Лутовинов и др., 2021; Дорошенко и др., 2021). Связано такое поведение с комптонизацией циклотронных фотонов в перегретой атмосфере нейтронной звезды (Муштуков и др., 2021; Соколова-Лапа и др., 2021) В случае же GRO J2058+42, циклотронная линия находится на самой низкой энергии (~10 кэВ) из всех источников, где наблюдалось подобное изменение спектра.

Из-за того, что циклотронная линия в спектре GRO J2058+42 наблюдается на энергии ~ 10 кэВ,

высокоэнергетичную компоненту спектра нельзя связать с излучением и последующей комптонизацией циклотронных фотонов в горячей атмосфере нейтронной звезды. Однако относительно малая циклотронная энергия делает возможным и даже необходимым другой механизм формирования высокоэнергетичной компоненты в спектре. Именно, в докритическом режиме аккреции, который мы предполагаем для GRO J2058+42 на рассматриваемой светимости, аккреционный канал имеет оптическую толщину <1 по отношению к Томсоновскому рассеянию, но в резонансе, где сечение рассеяния много больше Томсоновского, аккреционный канал является оптически толстым.

Положение резонанса в системе отсчета поверхности нейтронной звезды смещено в красную сторону из-за эффекта Допплера. Красное



Рис. 6. (а) — Энергетический спектр GRO J2058+42 на фазах импульса 0.05–0.15 для наблюдения NuSTAR в августе 2019 г. (ObsID 90501336002). Данные обоих модулей FPMA и FPMB показаны синими и черными точками. Сплошной синей линией показана модель, наилучшим образом описывающая спектр, а черной и зеленой — вклад разных компонент. (b) — Отклонение наблюдательных данных от модели PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT+COMPTT), аналогичной модели среднего спектра, (c) — для модели с циклотронной линией PHABS*(GAUSSIAN+COMPTT+COMPTT)*GABS.

смещение меняется в зависимости от направления выхода фотонов из аккреционного канала, и ожидается, что резонансное рассеяние покрывает широкую спектральную полосу от ~ 6 до ~ 10 кэВ. Фотоны, испытавшие даже однократное резонансное рассеяние на падающем веществе, скорость которого $\sim 0.5c$, выходят из аккреционного канала с энергией, заметно большей, чем до рассеяния, что и формирует высокоэнергетичную часть спектра. Такой механизм формирования высокоэнергетичной части спектра предполагает разную диаграмму направленности выходящего излучения низкоэнергетичной и высокоэнергетичной частей спектра: высокоэнергетичная часть спектра, будучи результатом рассеяния в аккреционном канале, должна иметь диаграмму направленности, близкую к веерной. Возможно, именно с таким различием диаграмм направленности на высоких и низких энергиях связана наблюдаемая эволюция профиля импульса с энергией фотонов (рис. 3) (Муштуков и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты временного и спектрального анализа источника GRO J2058+42 в широком энергетическом диапазоне, данные которого были получены обсерваториями NuSTAR и Swift в августе 2019 г. Согласно полученным результатам, источник находился в состоянии с низкой светимостью $L_x \simeq$ $\simeq 2.5 \times 10^{36}$ эрг с⁻¹, что на порядок ниже наблюдаемых ранее (Мольков и др., 2019). Показано, что при переходе к низкому темпу аккреции энергетический спектр сильно изменился. Для описания спектра нами предложена модель континуума, состоящая из двух комптонизационных компонент СотрТТ+СотрТТ. Наблюдаемую форму спектра в низком состоянии можно интерпретировать в рамках модели, где низкоэнергетическая часть спектра образуется в горячем пятне, а высокоэнергетическая — в результате резонансного комптоновского рассеяния фотонов из диапазона 6-10 кэВ на падающем веществе в аккреционном канале над поверхностью нейтронной звезды.

Таблица 3. Параметры фазового спектра 0.05-0.15 GRO J2058+42 с описанием континуума моделью CONSTANTA * PHABS * (GAUSSIAN + COMPTT + +COMPTT)*GABS

Параметры модели	Значения	
$N_{\rm H},10^{22}~{ m cm}^{-2}$	0.7, fixed	
$E_{ m Fe}$, кэ $ m B$	6.32, fixed	
$\sigma_{ m Fe},$ кэ $ m B$	0.24, fixed	
$W_{ m Fe}$, кэ $ m B$	$0.08\substack{+0.04 \\ -0.04}$	
$E_{ m Cycl}$, кэ $ m B$	$10.6^{+0.2}_{-0.2}$	
$\sigma_{ m Cycl}$, кэ $ m B$	$1.3^{+0.3}_{-0.2}$	
$ au_{ m Cycl}$	$0.31\substack{+0.03 \\ -0.02}$	
$T_{0,\text{Comptt}}$, low, кэВ	1.01, fixed	
kT_{Comptt} , low, кэВ	$4.9_{-0.5}^{+0.7}$	
$ au_{\mathrm{Comptt}}, \mathrm{low}$	$4.8^{+0.6}_{-0.5}$	
$T_{0,\text{Comptt}}$, high, кэВ	$=T_{0,\text{Comptt}},$ low	
$kT_{ m Comptt}$, high, кэ $ m B$	$14.5^{+2.3}_{-1.6}$	
$ au_{ m Comptt}$, high	>15	
$C_{ m NuSTAR}$	$0.98\substack{+0.02\\-0.02}$	
χ^2 (d.o.f.)	336.49(362)	

В работе была проведена фазово-разрешенная спектроскопия, которая показала дефицит фотонов около 10 кэВ в фазовом интервале импульса 0.05—0.15. Эта особенность может быть интерпретирована как циклотронная линия поглощения. Положение циклотронной линии на энергии ~10 кэВ в узкой фазовой области согласуется с наблюдениями в высоком состоянии источника (Мольков и др., 2019).

Временной анализ показал изменения в усредненном по энергии профиле импульса по сравнению с ярким состоянием. Доля пульсирующего излучения имеет типичный для рентгеновских пульсаров вид возрастающей зависимости от энергии, при этом указывает на наличие особенности в районе циклотронной энергии как в низком, так и в ярком состояниях.

В работе использованы данные, полученные с помощью обсерватории NuSTAR, проекта Caltech, финансируемого NASA и управляемого

NASA/JPL, и данные, предоставленные UK Swift Science Data Centre (анализ данных телескопа XRT). Также использовалось программное обеспечение, предоставленное Исследовательским центром архива астрофизики высоких энергий (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, HEASARC), который является службой отдела астрофизических наук NASA/GSFC (Astrophysics Science Division). Работа выполнена при поддержке гранта PHФ 19-12-00423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Арнасон и др. (R.M. Arnason, H. Papei, P. Barmby, A. Bahramian, and M.D. Gorski), MNRAS, in press (2021).
- 2. Арно и др. (K. Arnaud, B. Dorman, and C. Gordon), Astrophys. Source Code Library 10005 (1999).
- Бартельми и др. (S.D. Barthelmy, P.A. Evans, J.D. Gropp, J.A. Kennea, N.J. Klingler, A.Y. Lien, and B. Sbarufatti), GRB Coordinates Network 23985 (2019).
- 4. Бехти и др. (HI4PI Collaboration: N. Ben Bekhti, L. Floer, et al.), Astron. Astrophys. **594**, A116 (2016).
- Болдин П.А., Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 375 (2013) [P.A. Boldin, S.S. Tsygankov, and A.A. Lutovinov, Astron. Lett. **39**, 375 (2013)].
- 6. Герелс и др. (N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K.O. Mason, J.A. Nousek, A.A. Wells, N.E. White, S.D. Barthelmy, et al.), Astrophys. J. **611**, 1005 (2004).
- 7. Дорошенко и др. (V. Doroshenko, A. Santangelo, S.S. Tsygankov, and L. Ji), Astron. Astrophys. **647**, A165 (2021).
- 8. Корбет и др. (R. Corbet, A. Peele, and R. Remillard), Inter. Astron. Union Circ. **6556**, 3 (1997).
- Лутовинов А.А., Цыганков С.С., Письма в Астрон. журн. 35, 433 (2009) [А.А. Lutovinov and S.S. Tsygankov, Astron. Lett. 35, 433 (2009)].
- 10. Лутовинов и др. (A. Lutovinov, S. Tsygankov, S. Molkov, V. Doroshenko, A. Mushtukov, V. Arefiev, I. Lapshov, A. Tkachenko, and M. Pavlinsky), Astrophys. J. **912**, 17 (2021).
- 11. Лутовинов и др. (A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, K.A. Postnov, R.A. Krivonos, S.V. Molkov, and J.A. Tomsick), MNRAS **466**, 593 (2017).
- 12. Малакария и др. (С. Malacaria, P. Jenke, C.A. Wilson-Hodge, and O.J. Roberts), Astron. Telegram 12614 (2019).
- 13. Миган и др. (С. Meegan, G. Lichti, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, V. Connaughton, R. Diehl, G. Fishman, et al.), Astrophys. J. **702**, 791 (2009).
- Мольков и др. (S. Molkov, A. Lutovinov, S. Tsygankov, I. Mereminskiy, and A. Mushtukov), Astrophys. J. 883, L11 (2019).
- 15. Мукерджи и др. (К. Mukerjee, H.M. Antia, and T. Katoch), Astrophys. J. **897**, 73 (2020).

- 16. Муштуков и др. (A.A. Mushtukov, P.A. Verhagen, S.S. Tsygankov, M. van der Klis, A.A. Lutovinov, and T.I. Larchenkova), MNRAS **474**, 5425 (2018).
- 17. Муштуков и др. (A.A. Mushtukov, V.F. Suleimanov, S.S. Tsygankov, and S. Portegies Zwart), MNRAS **503**, 5193 (2021).
- 18. Рейг и др. (P. Reig, I. Negueruela, G. Papamastorakis, A. Manousakis, and T. Kougentakis), Astron, Astrophys. **440**, 637 (2005).
- 19. Соколова-Лапа и др. (Е. Sokolova-Lapa, M. Gornostaev, J. Wilms, R. Ballhausen, S. Falkner, K. Postnov, P. Thalhammer, F. Furst, et al.), Astron. Astrophys. **651**, A12 (2021).
- 20. Титарчук (L. Titarchuk), AIP Conf. Proc. No. 304, 380 (1994).
- 21. Уилсон и др. (С.А. Wilson, М.Н. Finger, B.A. Harmon, D. Chakrabarty, and T. Strohmayer), Astrophys. J. **499**, 820 (1998).
- 22. Уилсон и др. (С.А. Wilson, М.С. Weisskopf, M.H. Finger, M.J. Coe, J. Greiner, P. Reig, and G. Papamastorakis), Astrophys. J. **622**, 1024 (2005).
- 23. Харрисон и др. (F.A. Harrison, W.W. Craig, F.E. Christensen, Ch.J. Hailey, W.W. Zhang,

S.E. Boggs, D. Stern, W.R. Cook, et al.), Astrophys. J. **770**, 103 (2013).

- 24. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, V. Doroshenko, A.A. Mushtukov, V.F. Suleimanov, A.A. Lutovinov, and J. Poutanen), MNRAS: Lett. **487**, L30 (2019a).
- 25. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov, and A.V. Serber), MNRAS **401**, 1628 (2010).
- Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. 33, 368 (2007) [S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov, E.M. Churazov, and R.A. Sunyaev, Astron. Lett. 33, 368 (2007)].
- 27. Цыганков и др. (S.S. Tsygankov, A. Rouco Escorial, V.F. Suleimanov, A.A. Mushtukov, V. Doroshenko, A.A. Lutovinov, R. Wijnands, and J. Poutanen), MNRAS: Lett. **483**, L144 (2019b).
- 28. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), MNRAS **397**, 1177 (2009).