

УДК 524.38-43/735

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ УЛЬТРАЯРКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА HOLMBERG II X-1 В РЕНТГЕНОВСКОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ С ПОМОЩЬЮ ИНДИЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ ASTROSAT

© 2022 А. Винокуров^{1*}, К. Атапин¹, О. П. Бордолои², А. Саркисян¹, Ю. Кашияп³, М. Чакраборти³, П. Т. Рахна⁴, А. Костенков¹, Ю. Соловьева¹, С. Фабрика¹, М. Сафонова⁵, Р. Гогой², Ф. Сутариа⁵, Дж. Мурти⁵

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Университет Тезпур, Тезпур, штат Ассам, 784028 Индия

³Индийский институт технологий, Индор, 453552 Индия

⁴Шанхайская астрономическая обсерватория, Шанхай, 200030 Китай

⁵Индийский институт астрофизики, Бангалор, 560034 Индия

Поступила в редакцию 19 апреля 2022 года; после доработки 10 мая 2022 года; принята к публикации 12 мая 2022 года

Мы представляем результаты восьми одновременных наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) и рентгеновском диапазонах сильно переменного ультраяркого рентгеновского источника (ultraluminous X-ray source, ULX) Holmberg II X-1, выполненных с помощью AstroSat — индийского космического спутника, работающего в нескольких диапазонах длин волн. В течение всего периода наблюдений с конца 2016 г. по начало 2020 г. Holmberg II X-1 показал умеренную рентгеновскую светимость около 8×10^{39} эрг с⁻¹ и жесткий степенной спектр с $\Gamma \lesssim 1.9$. Продемонстрированная объектом в наблюдениях AstroSat низкая амплитуда вариаций рентгеновского потока (около 50% от величины минимального потока) и незначимая переменность в УФ-диапазоне (верхний предел примерно 25%) не позволили надежно обнаружить корреляцию между изменениями потоков в этих диапазонах. При этом в пределах каждого конкретного наблюдения амплитуда рентгеновской переменности оказалась более высокой, достигая фактора 2–3 относительно среднего уровня, однако она наблюдается в виде относительно коротких стохастических всплесков. Полученные результаты были рассмотрены с точки зрения трех моделей: прогретых рентгеновским излучением фотосферы звезды-донора, диска и ветра. Мы также оценили нижний предел переменности объекта в рентгеновском диапазоне, который позволил бы отвергнуть хотя бы некоторые из перечисленных моделей.

Ключевые слова: аккреция, аккреционные диски — рентгеновское излучение: звезды: двойные — рентгеновское излучение: индивидуальные объекты: Holmberg II X-1

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультраяркими рентгеновскими источниками (ultraluminous X-ray sources, ULXs) называют точечные внегалактические источники, светимость которых превышает эддингтоновский предел типичных черных дыр нашей Галактики, но при этом активными ядрами галактик они не являются. Согласно современным представлениям, большинство ULXs являются двойными системами с черными дырами звездных масс и нейтронными звездами, аккрецирующими в сверхэддингтоновском режиме (Fabrika et al. 2021, Kaaret et al.

2017). Наличие нейтронных звезд в системах ULX стало очевидным после обнаружения когерентных пульсаций рентгеновского излучения у известного ULX M 82 X-2 (Bachetti et al. 2014). В настоящее время подтвержденных ультраярких рентгеновских пульсаров (ULXP) насчитывается около десятка.

Ключевой особенностью сверхэддингтоновской аккреции является наличие сильных истечений газа из самых внутренних частей сверхкритического аккреционного диска (Poutanen et al. 2007). Спектроскопические свидетельства таких истечений были обнаружены как в рентгеновском, так и в оптическом диапазонах, однако свойства этих истечений, по-видимому, различаются в зависимости

*E-mail: vinokurov@sao.ru

от диапазона. Рентгеновские линии, связанные с истекающим веществом, имеют смещение в сторону высоких энергий, соответствующее скоростям около $0.1c$, так называемые сверхбыстрые истечения (Pinto et al. 2016). В оптическом диапазоне истечения выглядят похожими на звездные ветры и имеют скорости $500\text{--}1500 \text{ км с}^{-1}$ (Fabrika et al. 2015). Предполагается, что этот ветер должен быть оптически толстым и должен формировать протяженную фотосферу вокруг сверхкритического аккреционного диска. С помощью методов, разработанных для моделирования оптических спектров звезд Вольфа–Райе и LBV, показано, что темп потери массы в ветрах ULX составляет около $10^{-5}\text{--}10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (Kostenkov et al. 2020b).

Для обеспечения требуемых темпов аккреции звезда-донор должна находиться на близкой орбите и чаще всего заполнять свою полость Роша, хотя, по-видимому, и не всегда, т. к. в случае с первым в истории обнаруженным донором ULX им оказалась звезда Вольфа–Райе (объект M 101 ULX-1, Liu et al. 2013), радиус которой значительно меньше ее полости Роша. В настоящее время типы доноров известны только у нескольких ULX, и в большинстве случаев это голубые или красные сверхгиганты (Heida et al. 2016; 2019; 2015, López et al. 2020, Motch et al. 2014). Тем не менее считается, что значительная часть оптического излучения исходит не от донора, а от фотосферы ветра сверхкритического диска (Fabrika et al. 2021 и ссылки внутри статьи). Было показано, что самые яркие в оптическом диапазоне ULX имеют спектральные распределения энергии (SED), хорошо описываемые степенным законом, с максимумом в дальнем ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (Grisé et al. 2012, Tao et al. 2012, Vinokurov et al. 2013). Менее яркие источники показывают SED, соответствующие спектрам звезд класса A–G (Avdan et al. 2019; 2016). Это может свидетельствовать о том, что в спектрах наиболее ярких в оптическом диапазоне ULX преобладает излучение горячего сверхкритического аккреционного диска, но по мере уменьшения вклада диска становится заметным излучение относительно холодного донора (Vinokurov et al. 2018).

Предполагается, что оптическое излучение сверхкритического диска является результатом переработки рентгеновских квантов во внешних частях диска или ветра (Fabrika et al. 2015, Gierliński et al. 2009). Более того, в зависимости от физических характеристик области переизлучения жестких квантов и угла наклона аккреционного диска к лучу зрения соотношение между потоками в этих двух диапазонах может сильно различаться. В связи с этим совместный анализ оптического и рентгеновского излучения ULXs является актуальной задачей, поскольку такие исследования могли

бы пролить свет на детали процесса формирования ветра и геометрию истечений. Некоторые подвижки в этом направлении уже имеются. В частности, в работе Grisé et al. (2012) авторы получили ряд синхронных рентген-оптических наблюдений источника NGC 5408 X-1, выполненных с помощью рентгеновской обсерватории Chandra и космического телескопа имени Хаббла (Hubble Space Telescope, HST), что позволило построить SED источника от рентгеновского до ближнего ИК-диапазона. Однако во время этих наблюдений источник показал слабую переменность, что не позволило авторам проверить наличие корреляции между диапазонами.

Надежная корреляция между УФ/оптическим и рентгеновским потоками отмечена у нескольких ULX-транзиентов. Например, в случае UGC 6456 ULX было обнаружено, что рентгеновское излучение положительно коррелирует не только с широкополосным оптическим излучением, но и (косвенно) с потоком в эмиссионной линии He II $\lambda 4686$ (Vinokurov et al. 2020), однако физические механизмы наблюдаемой переменности на разных длинах волн в той работе не рассматривались из-за малого числа наблюдений.

В текущей работе мы представляем результаты ряда одновременных наблюдений объекта Holmberg II X-1 (далее Ho II X-1) в УФ и рентгеновском диапазонах, полученных с помощью обсерватории AstroSat¹ — первого индийского специализированного астрономического спутника, разработанного для синхронного наблюдения небесных объектов в рентгеновском, оптическом и УФ-диапазонах (Singh et al. 2014). Мы исследовали переменность потока объекта в УФ и рентгеновском диапазонах, а также попытались найти корреляцию между ними. Кроме того, мы обсуждаем несколько моделей, в рамках которых подобная корреляция могла бы возникать.

2. ВОЗМОЖНОСТИ ASTROSAT ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ULX

Обсерватория была запущена 8 сентября 2015 года на орбиту высотой 650 км с космодрома им. Сатиш Дхаван (о. Шрихарикота, Индия). Спутник оснащен тремя инструментами, работающими в рентгеновском диапазоне: телескопом мягкого рентгеновского излучения (Soft X-ray Telescope, SXT), набором пропорциональных счетчиков (Large Area X-ray Proportional Counters, LAXPC), детектором из теллуридов кадмия и цинка (Cadmium Zinc Telluride Imager, CZTI), а также

¹Подробная информация об обсерватории и размещенных на ее борту приборах доступна на сайте миссии (<http://astrosat-ssc.iucaa.in>).

УФ-телескопом (Ultra Violet Imaging Telescope, UVIT), обеспечивающими чувствительность обсерватории в диапазоне энергий 0.3–100 кэВ и на длинах волн 1300–5500 Å.

2.1. Прибор UVIT

UVIT состоит из двух сонаправленных 37.5-сантиметровых телескопов системы Ричи–Кретьена, один из которых собирает свет для детектора, чувствительного в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (канал FUV: 1300–1800 Å), а другой через светоделительную пластинку — для каналов, работающих в ближнем ультрафиолетовом (NUV: 1800–3000 Å) и в видимом диапазонах (VIS: 3200–5500 Å). Размер поля зрения (FOV) составляет 28', масштаб пикселя около 0"41. Пространственное разрешение, достижимое в ультрафиолетовых каналах, составляет 1"2–1"6 и в основном определяется качеством коррекции движения космического аппарата на этапе предварительной обработки данных (см. раздел 3.1), что в конечном итоге зависит от наличия ярких звезд в поле зрения. Каждый из двух УФ-каналов имеет колесо фильтров на восемь позиций. В широкополосных фильтрах фотометрическая чувствительность прибора сравнима с таковой у миссии GALEX (Rahna et al. 2017).

Регистрация фотонов осуществляется КМОП-матрицами размером 512 × 512 пикселей (одинаковыми для каждого канала), которые могут работать либо в режиме счета фотонов, либо в интегрирующем режиме. Детекторы оснащены аппаратными усилителями изображения, состоящими из фотокатода и микроканальных пластин. В режиме счета фотонов за секунду считывается 29 кадров, что соответствует времени экспозиции 35 мс на кадр. Канал VIS используется только для коррекции движения космического аппарата и всегда работает в интегрирующем режиме.

Канал NUV вышел из строя 20 марта 2018 года и после этой даты больше не использовался.

2.2. Телескоп для мягкого рентгеновского излучения

Прибор SXT предназначен для получения рентгеновских изображений и спектров в диапазоне энергий 0.3–8 кэВ. В нем применяется фокусирующая рентгеновская оптика системы Вольтера первого типа и ПЗС-камера разрешением 600 × 600 пикселей, аналогичная тем, что используются в миссиях XMM-Newton и Swift. Эффективная площадь равна 200 см² на энергии 1.5 кэВ, фокусное расстояние — 2 м. Полная ширина на полувысоте (*FWHM*) функции рассеяния точки

(point spread function, PSF) составляет 3'–4'; диаметр кружка, собирающего половину от полного потока точечного источника (half-power diameter, HPD) — 10', поле зрения телескопа около 40'. В случае наблюдения слабых объектов детектор работает в режиме счета фотонов с временным разрешением 2.4 с.

2.3. Детекторы жесткого рентгеновского излучения

Два других детектора, представляющих собой набор заполненных ксеноном пропорциональных счетчиков (LAXPC) и пикселизованная кадмий-цинк-теллуридная матрица с кодирующей апертурой (CZTI), покрывают диапазон энергий от 10 до 150 кэВ. Несмотря на большую эффективную площадь (у LAXPC 6000 см²), эти детекторы имеют плохое пространственное разрешение и вследствие этого высокий уровень фона, что делает их неэффективными для наблюдения внегалактических источников, таких как ULX. Кроме того, наблюдения ULX с помощью обсерватории NuStar показали резкое падение их рентгеновского потока на энергиях выше 15–20 кэВ (см. данные для выборки ULXs — Walton et al. 2018 и для No II X-1 в частности — Walton et al. 2015). Наш пробный анализ данных LAXPC показал, что сигнал, остающийся после вычитания фона, статистически незначим во всех имеющихся рядах No II X-1. Поэтому ниже данные LAXPC и CZTI мы больше не упоминаем.

Находясь на низкой околоэкваториальной орбите, AstroSat периодически пролетает через Южно-Атлантическую магнитную аномалию, что влияет на работу спутника в течение примерно 2/3 орбитального периода. Эта область характеризуется высокой концентрацией заряженных частиц, которые могут навредить оборудованию. Концентрация частиц постоянно отслеживается специальным прибором — монитором заряженных частиц; он может дать команду научному оборудованию обсерватории перейти в спящий режим до тех пор, пока уровень частиц не вернется к безопасному уровню.

3. ОБЪЕКТ, НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

No II X-1 относится к наиболее ярким источникам среди известных ULXs ($L_X > 10^{40}$ erg s⁻¹, Grisé et al. 2010). Этот объект находится в богатой газом карликовой неправильной галактике Holmberg II, входящей в группу галактик M 81–NGC 2403. Расстояние до этой галактики составляет 3.39 Мпк (Karachentsev et al. 2002). Галактика имеет низкое содержание кислорода,

Таблица 1. Даты наблюдений, экспозиции и измеренные потоки объекта. Рентгеновские потоки (диапазон 0.7–7.0 кэВ) даны в единицах 10^{-12} эрг с^{-1} см^{-2} . Плотности потоков в ультрафиолетовом диапазоне, скорректированные за уровень глобального фона, но не исправленные за вклад соседних (неразрешенных на AstroSat) источников (см. Приложение), даны в единицах 10^{-16} эрг с^{-1} см^{-2} \AA^{-1}

#	ObsID	Начало экспозиции Конец экспозиции	Канал (фильтр)	Поток	t_{exp} , кс
1	G05_204T01_9000000688	2016-09-29 11:05:10	SXT	5.6 ± 0.4	32.8
		2016-09-30 18:00:59	F148W	3.59 ± 0.11	11.2
			N279N	0.85 ± 0.07	10.6
2	A02_046T01_9000000814	2016-11-21 10:05:38	SXT	6.2 ± 0.6	11.8
		2016-11-21 19:02:48	F154W	3.60 ± 0.12	9.0
			N245M	1.20 ± 0.03	8.2
3	A02_046T01_9000000864	2016-12-08 16:09:32	SXT	6.3 ± 0.7	13.0
		2016-12-09 09:25:44	F154W	3.40 ± 0.12	9.1
			N245M	1.11 ± 0.04	8.7
4	A07_054T01_9000003286	2019-11-06 13:40:15 2019-11-07 16:08:24	SXT	7.0 ± 0.6	18.6
5	A07_054T01_9000003348	2019-11-30 20:04:51 2019-12-01 18:19:17	SXT	6.4 ± 0.5	22.8
6	A07_054T01_9000003370	2019-12-16 12:10:41	SXT	7.7 ± 0.5	24.0
		2019-12-17 13:01:34	F148W	3.48 ± 0.08	17.4
7	A07_054T01_9000003378	2019-12-19 23:11:21	SXT	6.9 ± 0.5	26.8
		2019-12-21 07:44:29	F148W	3.55 ± 0.09	17.2
8	A07_054T01_9000003406	2020-01-02 00:36:10	SXT	6.9 ± 0.5	23.0
		2020-01-02 22:55:01	F148W	3.59 ± 0.09	16.8
9	A07_054T01_9000003486	2020-02-07 17:18:19	SXT	7.0 ± 0.5	23.1
		2020-02-08 18:48:29	F148W	3.45 ± 0.08	16.6
10	A07_054T01_9000003504	2020-02-15 08:58:50	SXT	6.5 ± 0.5	23.2
		2020-02-16 08:34:22	F148W	3.40 ± 0.08	17.1

соответствующее металличности порядка $0.1 Z_{\odot}$ (Pilyugin et al. 2014). Мы выбрали Но II X-1 в качестве объекта наблюдения на AstroSat из-за высокой амплитуды его переменности в рентгеновском диапазоне, превышающей порядок величины на временах от нескольких дней до месяцев (Grisé et al. 2010), а также из-за его яркости в УФ-диапазоне (Vinokurov et al. 2013). Применяя модели спектров различных звезд к разновременным данным в диапазоне длин волн от УФ до ближнего ИК, Tao et al. (2012) показали, что спектральное распределение энергии объекта одинаково хорошо описывается как спектрами поздних O-звезд с низкой металличностью, так и моделью прогретого рентгеном диска. Модель сверхкритического аккреционного диска с истечением вещества в виде ветра также дает сопоставимый результат (Vinokurov et al. 2017; 2013). Исследования объекта в ИК-диапазоне позво-

ляют предположить, что донором в этой двойной системе может быть B[e]-сверхгигант (Lau et al. 2017). Но II X-1 предположительно был выброшен из молодого звездного скопления: возможные кинематические доказательства этого события обнаружили Egorov et al. (2017). Известно, что этот ULX окружен яркой компактной туманностью (Pakull and Mirioni 2002), и поскольку вклад туманности в УФ-диапазоне значительно меньше, чем в оптическом и ближнем ИК-диапазоне, короткие длины волн более предпочтительны для изучения оптических двойников ULX.

Всего было выполнено десять наблюдений Но II X-1 на AstroSat, их детали приведены в таблице 1. Наблюдения во всех диапазонах длин волн велись одновременно, UVIT выступал в качестве основного инструмента. Используемые при УФ-наблюдениях фильтры и их характеристики приведены в таблице 2.

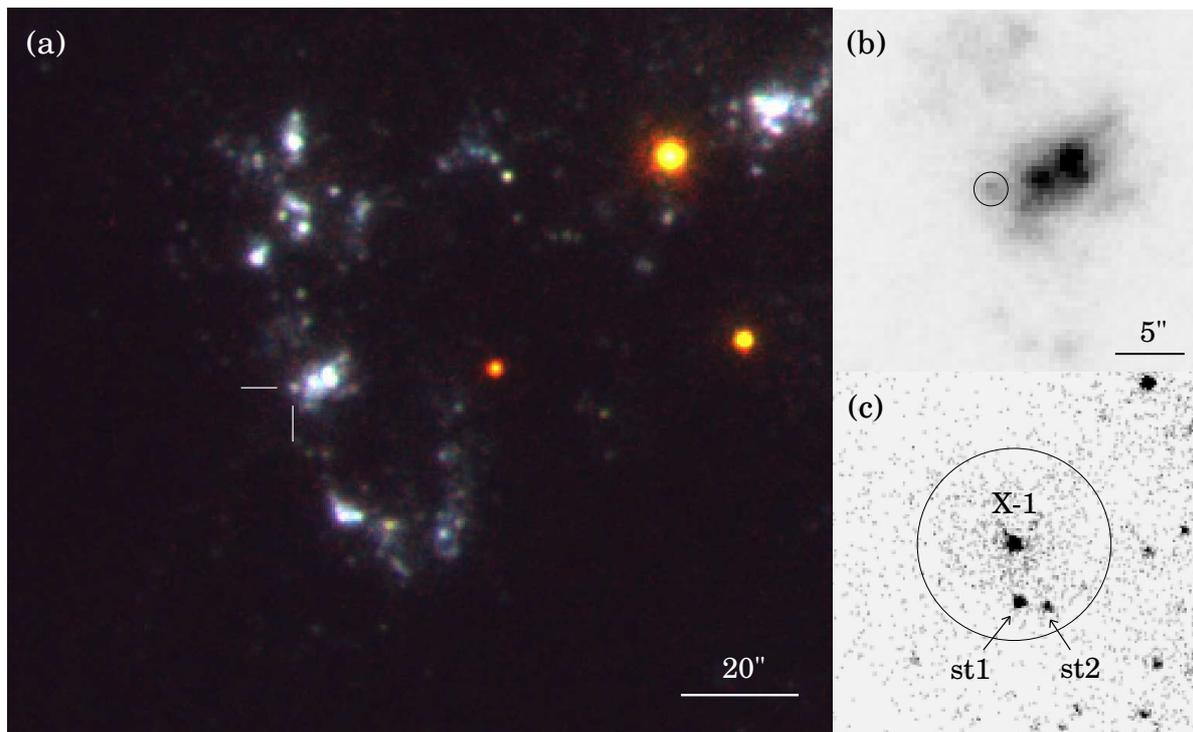


Рис. 1. (a) — цветное изображение окрестностей Но II X-1, в котором синий, зеленый и красный каналы соответствуют снимкам в UVIT-фильтрах *F154W*, *N245M* и *N279N*, просуммированным по всем датам. (b) — локальная область около Но II X-1 в фильтре *F148W* (из наблюдения #1 в таблице 1). Кружком обозначена апертура $1''.23$, используемая для фотометрии всех наблюдений. (c) — снимок HST ACS/SBC/*F165LP* той же области, демонстрирующий, что данная апертура в действительности помимо самого объекта также захватывает туманность вокруг ULX и две соседние звезды сравнимой яркости, не разрешаемые AstroSat.

Таблица 2. Характеристики фильтров телескопа UVIT, используемых при наблюдениях. Эффективная ширина полосы пропускания является интегралом нормированной эффективной площади. Средняя длина волны — это центральная длина волны, не зависящая от вида спектра источника. Коэффициенты перехода от инструментальных единиц к абсолютным были взяты с веб-страницы AstroSat <https://uvit.iap.res.in/Instrument/Filters>

Канал	Слот	Фильтр	Полоса пропускания, нм	Эффективная ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$, нм	Средняя длина волны, нм	Коэффициент пересчета, $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{\AA}^{-1} \text{отсчетов}^{-1}$
FUV	1	<i>F148W</i>	125–179	44.1	148.1	3.127×10^{-15}
	2	<i>F154W</i>	133–183	37.8	154.1	3.593×10^{-15}
NUV	3	<i>N245M</i>	220–265	28.17	244.7	0.725×10^{-15}
	6	<i>N279N</i>	273–288	8.95	279.2	3.500×10^{-15}

3.1. Наблюдения в УФ-диапазоне

Предварительный этап обработки заключается в конвертации сырых данных, поступающих с камер в режиме счета фотонов, в изображения, пригодные для научного анализа. Необходимость этого связана с тем, что обсерватория не «смотрит» на объект прямо, а настроена совершать небольшие колебания возле точки наведения с амплитудой в несколько угловых минут и скоростью несколько угловых секунд в секунду для предотвращения

возможных повреждений детекторов слишком яркими звездами в поле зрения, а также сглаживания дефектов изображения связанных с горячими пикселями. В результате этих колебаний положения звезд на детекторе со временем дрейфуют, и, чтобы получить изображение, требуется компенсировать движения спутника, расположив каждый зарегистрированный фотон в «правильном» месте. Для выполнения этой задачи существует несколько программных продуктов, разработанных специально для UVIT, в данной статье мы использовали

пакет JUDE². Пакет читает сырые (Level-1) данные приборов FUV и NUV, извлекает для каждого кадра список фотонных событий и рассчитывает для каждого события новые координаты, отслеживая движение обсерватории по ярким звездам (детальное описание алгоритма можно найти в разделе 3.8 статьи Murthy et al. (2016)). Отдельные сегменты каждого из наблюдений (т. е. непрерывные интервалы времени между прохождением спутника через магнитную аномалию) обрабатывались в JUDE независимо. Затем все полученные индивидуальные изображения совмещались (для этого делалась привязка пиксельных координат к небесным) и складывались. В конечном итоге для данных FUV было достигнуто пространственное разрешение 1"4–1"8 (оно слегка варьируется от одного наблюдения к другому); для NUV разрешение немного лучше — 1"2–1"4. Пример получаемых изображений показан на рис. 1.

Важно отметить, что такого разрешения недостаточно для отделения Но II X-1 от соседних источников. Помимо упомянутой выше яркой компактной туманности размером приблизительно 2"5, на расстоянии 0"9 от ULX находятся две звезды, а также присутствует диффузное излучение более далеких звезд (см. изображение HST на рис. 1)). Поэтому для наиболее точного измерения потоков ULX мы провели апертурную фотометрию, учитывая вклады потоков от каждого из сторонних источников, которые определялись на основе изображения HST в дальнем УФ-диапазоне. В расчет брались четыре основных источника: туманность, две ближайшие звезды, попадающие в апертуру, и «скопление», представляющее собой диффузное излучение более далеких звезд (см. рис. 1). Мы учли разную природу этих источников, а также возможную вариацию их вклада в общий поток в зависимости от пространственного разрешения, полученного в каждом из наблюдений. Детали фотометрии, а также результирующие потоки Но II X-1 в фильтре AstroSat F148W приведены в Приложении и в таблице А.2. Кривая блеска Но II X-1 представлена на рис. 2.

3.2. Наблюдения в рентгеновском диапазоне

Данные, полученные с прибором SXT, обрабатывались с применением официального пакета программ³. Предобработанные файлы (Level-2) отдельных сегментов орбит объединялись в единый

²Выпущен под свободной лицензией Apache License 2.0 и доступен по адресу <https://github.com/jaymurthy/JUDE>. Руководство пользователя опубликовано в работе Rahna et al. (2021).

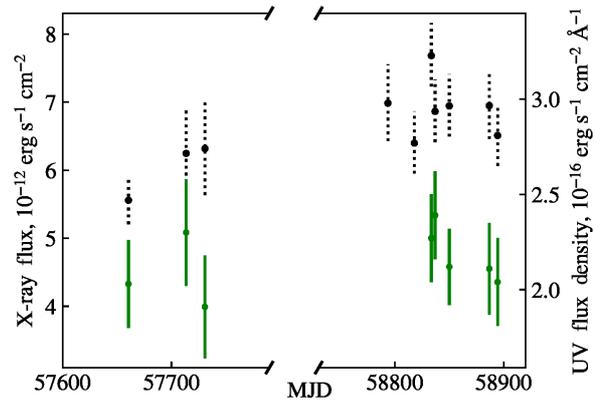


Рис. 2. Кривые блеска, построенные по одновременным наблюдениям Но II X-1 в рентгеновском и УФ-диапазонах. Оценки рентгеновских потоков (0.7–7 кэВ) обозначены черными точками с пунктирными барами ошибок, значения плотностей потока в УФ-диапазоне на длине волны 148.1 нм (фильтр F148W, их величины приведены в последней колонке таблицы А.2 в Приложении) показаны зеленым.

evt-файл для каждого наблюдения с помощью программы `sxtevtmergertool`. Для извлечения кривых блеска и спектров использовалась программа `xselect`, являющаяся частью пакета Heasoft v6.28. Спектральный анализ проводился с использованием пакета программ `xspec` v12.11.1.

При обработке данных, полученных с помощью SXT, имеются трудности с вычитанием фона, связанные с тем, что размер PSF не может считаться малым по сравнению с полем зрения прибора. Поэтому нами были опробованы два варианта анализа: экстракция отсчетов источника в малой (5') и в стандартной (16') апертурах. По задумке, апертура меньшего радиуса должна собирать меньше фоновых отсчетов, делая проблему учета фона менее существенной. Однако мы обнаружили, что потоки, измеренные в меньшей апертуре, демонстрируют больший разброс, что, вероятно, связано с более высокой чувствительностью данного метода к случайным вариациям формы PSF (подробности в Приложении). Поэтому везде в дальнейшем, говоря о потоках, мы имеем в виду потоки, измеренные в апертуре 16', считая их более надежными.

На рис. 3 приведены кривые блеска индивидуальных наблюдений (в скоростях счета). Несмотря на достаточно большие ошибки измерений, можно заметить, что источник демонстрирует умеренную переменность. Ее значимость мы оценили, рассчитав вероятность того, что абсолютно непременный источник (нулевая гипотеза) даст

³ Программное обеспечение, калибровочные файлы, а также комментарии разработчиков прибора доступны по адресу https://www.tifr.res.in/~astrosat_sxt/dataanalysis.html

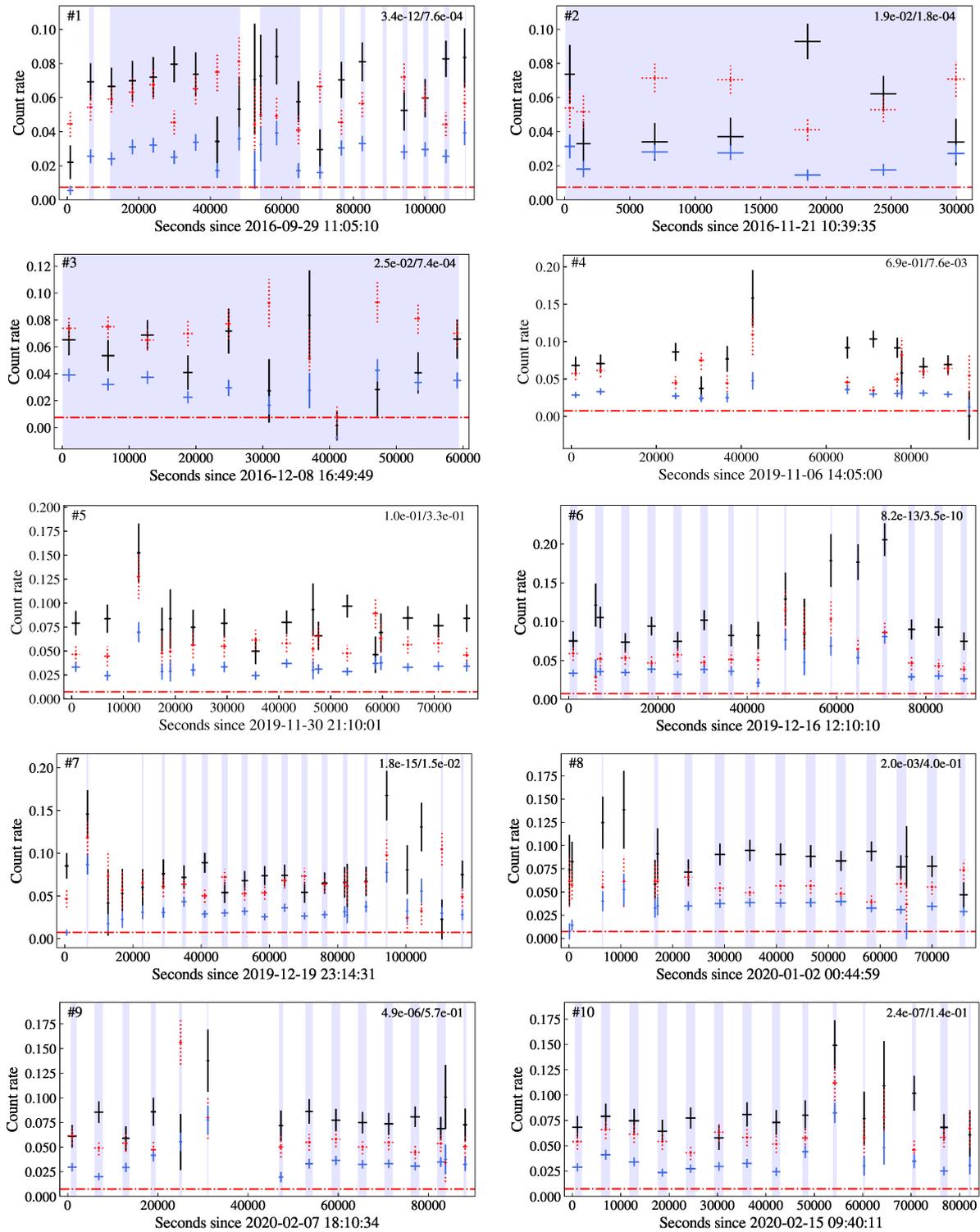


Рис. 3. Рентгеновские кривые блеска в диапазоне 0.7–7.0 кэВ. Поскольку Но II X-1 имеет невысокую яркость по отношению к уровню фона AstroSat, мы выполнили анализ в двух вариантах (см. Приложение): экстрагируя отсчеты объекта в апертуре радиусом $5'$ и вычитая «стандартный» уровень фона (одинаковый для всех наблюдений, метод I) и используя апертуру $16'$ с фоном, измеряемым непосредственно по наблюдаемым снимкам (метод II). Соответствующие «чистые» скорости счета показаны синими и черными точками. Скорость счета фона, пересчитанная на апертуру $16'$, показана красными точками. Красная штрихпунктирная линия обозначает уровень стандартного фона, пересчитанного на апертуру $5'$ (0.0074 отсчетов в секунду). Вертикальные полосы показывают временные интервалы, когда был включен прибор UVIT. Числа в правых верхних углах показывают уровни значимости переменности (p – value) для каждого из двух методов.

наблюдаемый разброс точек вследствие случайных ошибок измерений; использовалось распределение χ^2_{n-1} , где n — количество точек в кривой блеска. Полученные уровни значимости (p — value) показаны в правых верхних углах каждой панели рисунка.

Оценки блеска объекта в физических единицах (в потоках) были получены с помощью спектрального анализа. Аппроксимация спектров проводилась степенным законом, свернутым с кривой межзвездного поглощения. Спектральные индексы во всех наблюдениях оказались в районе 1.6 (см. Приложение и рисунки в нем). Исправленные за поглощения потоки приведены в таблице 1 и показаны на рис. 2.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение всех десяти наблюдений Но II X-1, выполненных на AstroSat с сентября 2016 по февраль 2020 года, объект демонстрировал довольно слабую переменность как в рентгеновском, так и УФ-диапазонах. Максимальное изменение потока примерно в 1.5 раза в рентгеновском диапазоне зарегистрировано нами между наблюдениями #1 и #6. В отдельных наблюдениях выявлена более высокая амплитуда переменности. На кривых блеска (рис.3) видны изменения потока в 2–3 раза от среднего уровня на временной шкале порядка 10 кс и даже меньше в пяти рядах данных (#1, 6, 7, 9, 10). Подобное поведение Но II X-1 описано еще в работах Gúrpide et al. 2021, Kajava et al. 2012. Авторы последней работы отмечают, что быстрые изменения рентгеновского потока не приводят к спектральным изменениям. Авторы предположили, что наблюдаемые вариации потока могут быть вызваны облаками относительно холодного газа, которые пересекают луч зрения и уменьшают рентгеновское излучение для наблюдателя (Middleton et al. 2015, Pinto et al. 2017).

Значение светимости, полученное усреднением измерений, выполненных двумя методами по всем наблюдениям, составляет $L_{0.7-7\text{keV}} \approx 8 \times 10^{39} \text{ эрг с}^{-1}$ (предполагалось, что излучение источника изотропно, а он сам находится на расстоянии 3.39 Мпк). Анализ рентгеновских данных показал, что во время наших наблюдений Но II X-1 находился в жестком состоянии с $\Gamma \approx 1.6$ –1.8 (рис. А.1). Интересно отметить, что на основании результатов ранних наблюдений ХММ-Newton (2002–2010 гг.) Но II X-1 рассматривался как типичный ULX с мягким спектром, $\Gamma \sim 2.4$ (Pintore et al. 2014, Sutton et al. 2013). Позже его спектр стал жестче (2013, $\Gamma \sim 1.9$, Gúrpide et al. 2021, Kobayashi et al. 2019) и оставался таковым к моменту наших наблюдений. Более того, синие

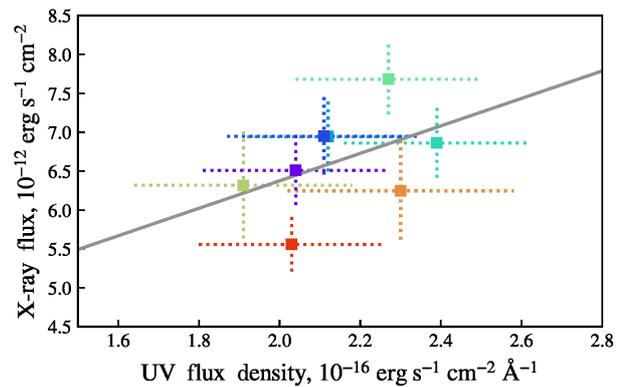


Рис. 4. Потоки рентгеновского излучения в зависимости от плотности потока УФ-излучения на длине волны 148.1 нм (фильтр $F148W$). Изменение цвета от красного к фиолетовому соответствует порядковому номеру наблюдений (от #1 до #10). Формально рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона равен $R = 0.45 \pm 0.36$.

точки на рис. А.1 указывают на увеличение жесткости спектра ULX до $\Gamma \sim 1.6$ с декабря 2019 г. Проверка, проведенная в середине февраля 2020 года на AstroSat наблюдения ХММ-Newton (ObsID 0843840201, 23 марта 2020 г.), показала, что источник действительно демонстрирует жесткий спектр с $\Gamma = 1.66 \pm 0.6$.

Средняя плотность УФ-потока в фильтре $F148W$ (центральная длина волны около 1500 Å) составляет $2.15 \times 10^{-16} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ Å}^{-1}$, что соответствует светимости $L_{F148W} = 1.30 \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$, рассчитанной с использованием ширины эффективной полосы пропускания фильтра $F148W$ (таблица 2). Амплитуда переменности составляет около 25% от минимального значения, что лишь немного превышает уровень 2σ ошибок отдельных измерений. Применение критерия χ^2 (нулевая гипотеза — отсутствие реальной переменности источника) дает вероятность (p — value), примерно равную 0.89. Это означает, что обнаруженную переменность нельзя считать значимой и можно говорить только о ее верхнем пределе. На слабую переменность Но II X-1 в УФ-диапазоне также указывают измерения HST: поток, полученный при моделировании спектрального распределения энергии источника (см. Приложение) и пересчитанный в фильтр $F148W$ AstroSat, соответствует светимости $(1.51 \pm 0.05) \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$. Это сопоставимо с результатами, полученными по данным AstroSat, несмотря на то, что эти наблюдения разделяют года.

На рис. 4 приведены потоки рентгеновского излучения вместе с плотностями потока УФ-излучения на длине волны около 1500 Å. Из-за больших ошибок измерения на рисунке связь между

ними не видна. Тем не менее многими моделями ULX предсказывается корреляция между потоками в двух диапазонах, связанная с нагревом различных газовых структур рентгеновскими квантами. Рентгеновское излучение должно исходить из областей, находящихся в непосредственной близости от аккретора. Его источником могут быть внутренние части сверхкритического аккреционного диска и/или горячая оптически толстая газовая оболочка, если аккретором является сильно намагниченная нейтронная звезда (Walton et al. 2018). Эффект прогрева могут испытывать на себе оптически плотный ветер, истекающий с поверхности сверхкритического диска (Poutanen et al. 2007), внешние части самого аккреционного диска или звезда-донор. Присутствие ветра, излучающего в УФ/оптическом диапазоне, подтверждается как двумерными МГД-моделированием (например, Kawashima et al. 2012), так и наблюдаемыми оптическими спектрами ULX (Fabrika et al. 2015), в которых ветер необходим для описания множества эмиссионных линий (Kostenkov et al. 2020a; b). Ниже мы рассмотрим все три варианта.

Даже если начальный темп аккреции в диске составляет $\dot{M}_0 \gg \dot{M}_{\text{Edd}}$, его дальние области, которые и являются источником УФ/оптического излучения, выделяют мало энергии и, следовательно, должны быть очень похожи на области стандартных подкритических дисков (Poutanen et al. 2007). Для подкритических геометрически тонких дисков в маломассивных рентгеновских двойных было показано, что изменение их УФ-оптического потока, связанное с прогревом рентгеновским излучением, должно описываться соотношением $F_{\text{UV}} \propto L_X^\alpha$ с $\alpha \sim 0.5$ (Gierliński et al. 2009, van Paradijs and McClintock 1994). В соответствии с этим, обнаруженная по данным AstroSat переменность рентгеновского потока с фактором 1.5 должна соответствовать переменности в УФ-диапазоне, равной 20–30%, что близко к наблюдаемому значению.

Оптическое и ИК-излучения ветра сверхкритического диска, как показали Fabrika et al. (2015), должны иметь более сильную зависимость от рентгеновской светимости. Это связано с тем, что светимость в этих диапазонах, будучи связанной с релей-джинсовской областью спектра, определяется главным образом размером излучающей области, который не является постоянным, как в случае стандартного диска, а приблизительно линейно зависит от начального темпа аккреции \dot{M}_0 . Чем выше темп аккреции, тем сильнее ветер, а его фотосфера больше и холоднее, при этом максимум излучаемого спектра смещается в сторону больших длин волн (Fabrika et al. 2021). Рентгеновская светимость в свою очередь зависит от \dot{M}_0 лишь логарифмически (Poutanen et al. 2007, Shakura

and Sunyaev 1973). Тем не менее размер области ветра, излучающей в УФ-диапазоне, практически не меняется, так как увеличение \dot{M}_0 лишь достраивает за пределами этой области новые, более холодные участки ветра. Таким образом, можно сделать вывод, что ветер сверхкритического диска в УФ-диапазоне должен демонстрировать аналогичную зависимость $F_{\text{UV}} \propto L_X^{0.5}$.

Для оценки переменности УФ-потока вследствие прогрева донора мы провели моделирование со следующими допущениями. Поскольку результат должен сильно зависеть от начальной температуры T_0 поверхности звезды, в качестве возможных доноров Но II X-1 мы рассмотрели две звезды: спектрального класса B2 Ib и O8 Ib, как было предложено в работе Tao et al. (2012). В роли аккретора выступала либо черная дыра (black hole, BH) массой $10 M_\odot$, либо нейтронная звезда (neutron star, NS) массой $1.5 M_\odot$. Предполагалось, что источник рентгеновских квантов является точечным, а донор заполняет свою полость Роша, размер которой вычислялся по соотношениям, представленным в работе Eggleton (1983). Массы, эффективные температуры и радиусы доноров ($20.0 M_\odot$, 20.3 кК, $23.2 R_\odot$ и $52.5 M_\odot$, 34.3 кК, $20.4 R_\odot$ для звезд B2 Ib и O8 Ib соответственно) взяты из работы Straizys and Kurilienne (1981). Орбита системы предполагалась круговой с расстоянием между компонентами, определяемым из условия заполнения донором полости Роша. Наблюдаемая плотность потока от i -го элемента поверхности звезды вычислялась с помощью функции Планка с температурой, полученной из уравнения:

$$\sigma T_{\text{new},i}^4 = \sigma T_0^4 + (1 - \epsilon) \cos \beta_i F_i,$$

где F_i —облучающий поток, β_i —угол между направлением на рентгеновский источник и нормалью к элементу поверхности, альbedo ϵ принималось равным 0.5 (Zhang et al. 1986). На рис. 5 как функции рентгеновской светимости показаны рассчитанные температуры, усредненные по видимому диску звезды, и суммарные плотности потока на длине волны 1500 \AA (что близко к λ_c фильтра F148W, таблица 2), нормированные на первоначальные значения потока, не измененные прогревом. Помимо двух типов донора и двух типов аккретора, мы также рассматривали два угла наклона орбиты $i = 0$ и $i = i_{\text{max}}$, которые рассчитывались индивидуально для каждого случая (для конкретного размера звезды и расстояния между компонентами, см. подпись к рисунку) из условия отсутствия затмений в рентгеновском диапазоне. В последнем случае считалось, что донор находится за источником рентгеновского излучения, чтобы наблюдаемый эффект прогрева был как можно больше. Вариант $i = 0$ рассматривался потому,

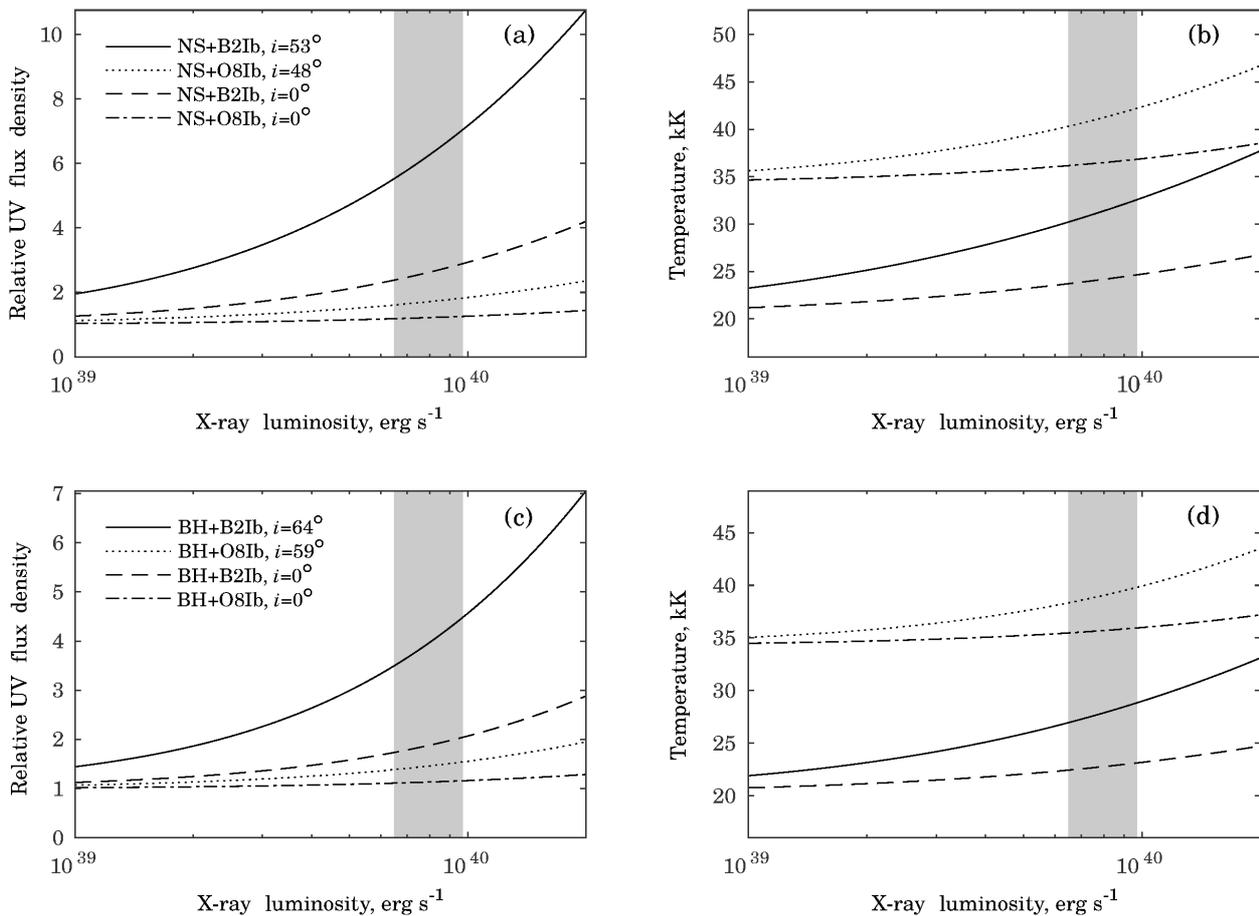


Рис. 5. Отношение плотностей потоков излучения на 1500 Å прогретых и непрогретых фотосфер доноров (панели (а) и (с)), а также усредненные по видимому диску звезды температуры (панели (b) и (d)) как функции рентгеновской светимости аккректора. Рассмотрены два типа аккректоров: нейтронная звезда (панели (а), (b)) и черная дыра (панели (с), (d)); два типа доноров: сверхгигант спектрального класса O8 и B2 и два типа ориентации системы: наклонение орбиты либо $i = 0$ (система наблюдается вдоль с полюса своей орбиты), либо i — максимально возможный (для данного типа донора и аккректора) угол, при котором система все еще остается внезатменной в рентгеновском диапазоне. Серые области показывают диапазон рентгеновских светимостей Ho II X-1 в наблюдениях AstroSat.

что большинство моделей ULX предсказывает, что такие системы должны наблюдаться близко к их оси, поскольку при такой ориентации различные газовые потоки не будут закрывать от наблюдателя внутренние части аккреционного диска.

На рис. 5 хорошо видно, что системы с нейтронной звездой должны давать более заметное увеличение УФ-потока за счет своей компактности. Максимальное изменение УФ-потока около 27–28% (для рентгеновских светимостей от 6.5×10^{39} до 9.7×10^{39} эрг с⁻¹ по данным AstroSat) происходит у звезды B2Ib вне зависимости от типа аккректора. В остальных случаях вариации составляют менее 20%, при этом минимальное изменение около 4% показывает наблюдаемая с полюса система BH+O8Ib. В то же время прогретая звезда B2Ib дает требуемые значения температуры (т.е. близкие к значению $T_{\text{eff}} = 35.5 \pm 2.9$ K, полученному на основе мо-

делирования SED, см. Приложение) только для систем с нейтронной звездой при i_{max} (когда наблюдается максимальный эффект прогрева). Звезда O8Ib, напротив, дает нужную температуру во всех случаях, кроме «NS при i_{max} ». Таким образом, оценка температуры, полученная на основе наблюдаемого SED, и малая наблюдаемая амплитуда переменности в УФ-диапазоне делают модель с более горячим донором наиболее предпочтительной. Стоит отметить, что в данном моделировании мы не учитывали орбитальные вариации потока, однако влияние этого эффекта может быть важно только для тех систем, которые наблюдаются почти в плоскости орбиты, а это считается маловероятным для ULXs. Также наблюдаемые изменения рентгеновского потока могут быть вызваны эффектами экранирования источника рентгеновского излучения холодными непрозрачными облаками/потоками газа, при этом

реальные светимость и величина облучающего потока остаются постоянными. Описанные явления должны уменьшать амплитуду переменности УФ-излучения, предсказываемую моделями.

В свете вышеизложенного можно заключить, что предсказываемые всеми тремя рассмотренными моделями амплитуды УФ-переменности не противоречат наблюдаемому значению ввиду его больших неопределенностей. Поэтому мы оценили минимальный необходимый уровень переменности в обоих диапазонах, который позволил бы различить модели. Мы предположили, что переменность можно считать значимой, когда хотя бы одно из измерений отклоняется на 3σ вверх и одно на 3σ вниз от среднего значения потока. Поскольку погрешность измерений, выполненных по данным UVIT, составляет около 10%, переменность УФ-потока должна быть не менее 60% (от среднего уровня), чтобы считаться достоверно обнаруженной. Для моделей прогрева диска/ветра это соответствует рентгеновским вариациям потока с коэффициентом около или больше 2.5. Таким образом, при обнаружении переменности заданного уровня в рентгеновском диапазоне и отсутствии значимой переменности в УФ-диапазоне можно будет сделать вывод о том, что в УФ-излучении преобладает прогретый донор О-типа, поскольку системы с такой звездой способны обеспечить УФ-переменность меньше или около 30% независимо от типа аккректора и наклона орбиты.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами были проведены десять наблюдений Но II X-1 с помощью индийского космического спутника AstroSat, восемь из них одновременно в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах. Неоспоримым преимуществом AstroSat в сравнении с обсерваториями со сравнимыми техническими характеристиками (такими как Swift), является почти вдвое лучшее пространственное разрешение в УФ-оптическом диапазонах, что позволяет наблюдать объекты, расположенные в тесных звездных полях.

Несмотря на то, что Но II X-1 известен как один из самых переменных источников среди так называемых «bona fide» ULXs (с амплитудой изменений рентгеновского потока до 13 раз, Kajava et al. 2012), наши наблюдения пришлись на состояние с низкой переменностью. Переменность в рентгеновском диапазоне составила около 50% от величины минимального потока и около 25% (верхний предел) в УФ-диапазоне, что не позволило выявить предсказываемую разными моделями корреляцию между изменениями потоков в указанных диапазонах. Мы рассмотрели три модели

прогрева: прогретый тонкий диск, ветер и донор О–В-сверхгигант, однако наблюдаемый уровень переменности не позволяет полностью отвергнуть или подтвердить ни одну из них. Мы считаем, что для того чтобы различить вышеупомянутые модели, переменность рентгеновского излучения должна быть выше в 2.5 раза. Предварительные результаты анализа недавних наблюдений Swift показал, что Но II X-1 вернулся в состояние с высокой переменностью в феврале 2021 года. Это дает надежду, что дальнейшие наблюдения AstroSat в конце концов позволят обнаружить искомую корреляцию и помогут прояснить природу УФ и оптического излучения Но II X-1.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование основано на наблюдениях, выполненных с помощью космического телескопа им. Хаббла НАСА/ЕКА. Данные наблюдений получены от Института исследований космоса с помощью космического телескопа под управлением Ассоциации университетов по исследованиям в области астрономии, в соответствии с контрактом НАСА NAS 5–26555. Программы наблюдений имеют следующие идентификаторы: ID 10522, 10814 и 13364.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект No. 21-72-10167 «Ультраяркие рентгеновские источники: ветер и доноры»). О. П. Б. и Р. Г. благодарны агентству по Научным и техническим исследованиям департамента Науки и технологий правительства Индии за поддержку наблюдений на AstroSat и предобработку данных.

CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Abolmasov, S. Fabrika, O. Sholukhova, and V. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 36 (2007).
2. S. Avdan, A. Akyuz, A. Vinokurov, et al., *Astrophys. J.* **875** (1), id. 68 (2019).
3. S. Avdan, A. Vinokurov, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455**, L91 (2016).
4. M. Bachetti, F. A. Harrison, D. J. Walton, et al., *Nature* **514**, 202 (2014).
5. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
6. W. Cash, *Astrophys. J.* **228**, 939 (1979).

7. F. Castelli and R. L. Kurucz, Proc. IAU Symp., No. 210, A20 (2003).
8. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
9. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, and A. V. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (1), L1 (2017).
10. S. Fabrika, Y. Ueda, A. Vinokurov, et al., *Nature Physics* **11**, 551 (2015).
11. S. N. Fabrika, K. E. Atapin, A. S. Vinokurov, and O. N. Sholukhova, *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 6 (2021).
12. M. Gierliński, C. Done, and K. Page, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **392** (3), 1106 (2009).
13. F. Grisé, P. Kaaret, S. Corbel, et al., *Astrophys. J.* **745** (2), id. 123 (2012).
14. F. Grisé, P. Kaaret, H. Feng, et al., *Astrophys. J.* **724** (2), L148 (2010).
15. A. Gürpide, O. Godet, G. Vasilopoulos, et al., *Astron. and Astrophys.* **654**, id. A10 (2021).
16. M. Heida, P. G. Jonker, M. A. P. Torres, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (1), 771 (2016).
17. M. Heida, R. M. Lau, B. Davies, et al., *Astrophys. J.* **883** (2), id. L34 (2019).
18. M. Heida, M. A. P. Torres, P. G. Jonker, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (4), 3510 (2015).
19. P. Kaaret, H. Feng, and T. P. Roberts, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **55**, 303 (2017).
20. J. J. E. Kajava, J. Poutanen, S. A. Farrell, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422** (2), 990 (2012).
21. I. D. Karachentsev, A. E. Dolphin, D. Geisler, et al., *Astron. and Astrophys.* **383**, 125 (2002).
22. T. Kawashima, K. Ohsuga, S. Mineshige, et al., *Astrophys. J.* **752** (1), id. 18 (2012).
23. S. B. Kobayashi, K. Nakazawa, and K. Makishima, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (1), 366 (2019).
24. A. Kostenkov, A. Vinokurov, and Y. Solovyeva, in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 242–243 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020a).
25. A. Kostenkov, A. Vinokurov, Y. Solovyeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 182 (2020b).
26. R. M. Lau, M. Heida, M. M. Kasliwal, and D. J. Walton, *Astrophys. J.* **838** (2), id. L17 (2017).
27. J.-F. Liu, J. N. Bregman, Y. Bai, et al., *Nature* **503** (7477), 500 (2013).
28. K. M. López, M. Heida, P. G. Jonker, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (1), 917 (2020).
29. M. J. Middleton, L. Heil, F. Pintore, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447** (4), 3243 (2015).
30. C. Motch, M. W. Pakull, R. Soria, et al., *Nature* **514**, 198 (2014).
31. J. Murthy, P. T. Rahna, M. Safonova, et al., *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1607.007 (2016).
32. J. Murthy, P. T. Rahna, F. Sutaria, et al., *Astronomy and Computing* **20**, 120 (2017).
33. M. W. Pakull and L. Mirioni, arXiv e-prints astro-ph/0202488 (2002).
34. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and A. Y. Kniazev, *Astron. J.* **147** (6), id. 131 (2014).
35. C. Pinto, W. Alston, R. Soria, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468** (3), 2865 (2017).
36. C. Pinto, M. J. Middleton, and A. C. Fabian, *Nature* **533**, 64 (2016).
37. F. Pintore, L. Zampieri, A. Wolter, and T. Belloni, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (4), 3461 (2014).
38. J. Poutanen, G. Lipunova, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **377**, 1187 (2007).
39. P. Rahna, J. Murthy, and M. Safonova, *J. Astrophysics and Astronomy* **42** (2), id. 1 (2021).
40. P. T. Rahna, J. Murthy, M. Safonova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471** (3), 3028 (2017).
41. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **24**, 337 (1973).
42. K. P. Singh, S. N. Tandon, P. C. Agrawal, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9144**, p. 91441S (2014).
43. S. G. Stewart, M. N. Fanelli, G. G. Byrd, et al., *Astrophys. J.* **529** (1), 201 (2000).
44. V. Straizys and G. Kuriliene, *Astrophys. and Space Sci.* **80** (2), 353 (1981).
45. A. D. Sutton, T. P. Roberts, and M. J. Middleton, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (2), 1758 (2013).
46. L. Tao, H. Feng, F. Grisé, and P. Kaaret, *Astrophys. J.* **737** (2), id. 81 (2011).
47. L. Tao, P. Kaaret, H. Feng, and F. Grisé, *Astrophys. J.* **750** (2), id. 110 (2012).
48. J. van Paradijs and J. E. McClintock, *Astron. and Astrophys.* **290**, 133 (1994).
49. A. Vinokurov, K. Atapin, and S. Fabrika, *ASP Conf. Ser.* **510**, 476 (2017).
50. A. Vinokurov, K. Atapin, and Y. Solovyeva, *Astrophys. J.* **893** (2), id. L28 (2020).
51. A. Vinokurov, S. Fabrika, and K. Atapin, *Astrophysical Bulletin* **68**, 139 (2013).
52. A. Vinokurov, S. Fabrika, and K. Atapin, *Astrophys. J.* **854**, id. 176 (2018).
53. D. J. Walton, F. Fürst, M. Heida, et al., *Astrophys. J.* **856**, id. 128 (2018).
54. D. J. Walton, M. J. Middleton, V. Rana, et al., *Astrophys. J.* **806** (1), id. 65 (2015).
55. E. H. Zhang, E. L. Robinson, and R. E. Nather, *Astrophys. J.* **305**, 740 (1986).

ПРИЛОЖЕНИЕ
ДЕТАЛИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Обработка УФ-данных

Фотометрию УФ-изображений можно разделить на три этапа. Прежде всего мы определили точное положение Но II X-1, выполнив астрометрическую коррекцию изображений AstroSat с помощью данных HST для центрирования апертуры на источник, и измерили в ней полные потоки. Все измерения потока проводились с помощью пакета APPHOT IRAF. На втором этапе измерялись и вычитались потоки всех сторонних источников. Последним шагом стал учет апертурной поправки и пересчет потоков в выбранный фильтр, чтобы иметь возможность сравнивать наблюдения разных дат. Для данных в ближнем УФ-диапазоне было решено пропустить последние два этапа в виду наличия всего трех наблюдений в этом диапазоне длин волн.

Предварительная апертурная фотометрия

Мы провели фотометрические измерения в одинаковой апертуре размером 3 пикселя ($1''.23$, отмечена на рис. 1) для всех наблюдений независимо от размера PSF. В такую апертуру попадает большая часть фотонов источника даже на самых плохих изображениях с размером PSF $FWHM = 1''.8$, при этом минимизируется вклад соседних звезд в полный поток. Чтобы убедиться, что выбранная нами апертура всегда соответствует точному положению ULX на кадре, мы выполнили астрометрическое совмещение данных AstroSat с изображениями HST, на которых оптический аналог ULX четко виден как изолированный точечный источник. Для этих целей было выбрано изображение⁴, полученное 24 августа 2013 г. с помощью обладающей достаточно большим полем зрения (около $3'$) Широкоугольной камеры 3 (Wide Field Camera 3, WFC3) в фильтре $F275W$, полоса пропускания которого близка к полосе пропускания NUV-фильтров AstroSat. В качестве опорных источников при астрометрии использовались три одиночные звезды. Полученная точность рассчитанного положения Но II X-1 для каждого наблюдения AstroSat оказалась лучше $0''.13$.

Уровень глобального фона, во многом связанного с инструментальными особенностями детекторов UVIT, оценивался в кольцевой апертуре с внутренним и внешним радиусами $8''$ и $16''$ соответственно. Измеренные скорости счета были скорректированы за этот фон, а затем умножены на коэффициенты пересчета (таблица 2) для получения потоков в физических единицах ($\text{эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$). Полученные значения вместе с их 1σ -ошибками приведены в таблице 1.

Вклад окружающих источников в полный поток в апертуре объекта

Потоки, измеренные на предыдущем шаге, не исправлены за вклад окружающих источников: туманности, окружающей Но II X-1, звезд st1 и st2 (рис. 1), непосредственно попадающих в апертуру $1''.23$, а также более далеких звезд, расположенных в нескольких секундах дуги от ULX и, вероятно, являющихся членами единого звездного скопления. Вклад в поток каждого конкретного источника варьируется от наблюдения к наблюдению в зависимости от размера PSF. Для оценки этих вкладов для каждого из наблюдений на AstroSat мы использовали изображение ACS/SBC/ $F165LP$ космического телескопа им. Хаббла (таблица А.1), разрешение которого было ухудшено до уровня изображений AstroSat. Выбор фильтра $F165LP$ обусловлен тем, что его полоса пропускания близка к FUV-фильтрам AstroSat, хотя и не совпадает с ними полностью. Поэтому для наиболее точного пересчета измеренных по данным HST потоков сторонних источников в фильтры AstroSat мы использовали их модельные спектральные распределения энергии, построенные с привлечением результатов фотометрии по данным HST в других фильтрах.

Поскольку сторонние источники имеют различную природу (туманность и звезды), сумму их спектральных распределений энергии невозможно аппроксимировать единой физической моделью, следовательно, их вклады в апертуру $1''.23$ нужно учитывать индивидуально. Для оценки индивидуального вклада в поток от каждого стороннего источника мы удаляли (т. е. заменяли уровнем локального фона) Но II X-1 и все остальные сторонние источники на изображении в фильтре $F165LP$. Затем мы ухудшали пространственное разрешение изображения и измеряли поток в апертуре $1''.23$, центрированной на

⁴Все используемые в данной работе изображения, полученные с помощью HST, были получены в архиве MAST <https://archive.stsci.edu/>

Таблица А.1. Результаты фотометрии Но II X-1 и соседних источников, полученные по данным HST

Камера/Фильтр	Дата наблюдений	Время накопления, с	Звездные величины в системе Vegamag			
			st1	st2	скопление	Но II X-1
ACS/SBC/F165LP	Nov. 27, 2006	600	20.12 ± 0.08	21.12 ± 0.13	16.16 ± 0.03	18.90 ± 0.05
WFC3/UVIS/F275W	Aug. 24, 2013	2424	20.88 ± 0.03	21.84 ± 0.04	16.81 ± 0.02	19.49 ± 0.03
WFC3/UVIS/F336W	Aug. 24, 2013	1146	21.44 ± 0.04	22.42 ± 0.05	17.23 ± 0.03	19.91 ± 0.03
WFC3/UVIS/F438W	Aug. 24, 2013	992	23.02 ± 0.04	24.06 ± 0.06	18.68 ± 0.05	21.58 ± 0.03
ACS/WFC/F550M	Jan. 28, 2006	1505	23.13 ± 0.04	24.07 ± 0.05	18.84 ± 0.03	21.84 ± 0.04
ACS/WFC/F814W	Jan. 28, 2006	600	23.46 ± 0.07	24.08 ± 0.10	18.65 ± 0.03	21.40 ± 0.03

Но II X-1. Для уменьшения разрешения изображение сглаживалось с применением фильтра Гаусса⁵, параметры которого определялись для каждого наблюдения AstroSat путем анализа PSF четырех ярких одиночных звезд в поле зрения UVIT. Эта процедура повторялась четырежды: для туманности, для звезд st1 и st2 и для остальных звезд, которые рассматривались как члены единого звездного скопления (для краткости будем называть их скоплением).

Используя эту методику, мы обнаружили, что относительный вклад обеих звезд примерно одинаков. В апертуру размером 1''23 попадает доля от суммы их исправленных за апертурную поправку потоков в фильтре F165LP — w_{st} — в диапазоне от 0.468 до 0.566 для размеров PSF 1''8 и 1''4 соответственно. Для протяженных источников (туманности и скопления) мы измерили w_{neb} и w_{cl} как отношения потоков, попадающих в апертуру 1''23, и потоков, используемых для моделирования SED (см. следующий абзац). Получены значения $w_{neb} = [0.664; 0.749]$ и $w_{cl} = [0.022; 0.015]$ для 1''8 и 1''4 соответственно.

Для построения SED мы выполнили апертурную фотометрию источников на HST-изображениях формата drc (камеры, фильтры и другие подробности указаны в таблице А.1). Для измерения потоков двух ближайших к Но II X-1 звезд мы использовали апертуру радиусом 4 пикселя (0''10) на изображении, полученном камерой ACS/SBC, и 3 пикселя для данных ACS/WFC и WFC3/UVIS (0''15 и 0''12 соответственно). Столь малые размеры апертур были выбраны для минимизации вклада туманности, яркость которой особенно велика в видимом диапазоне. Уровень фона определялся в кольцах с внутренним радиусом около 0''25 и шириной около 0''15, эти значения варьируются в диапазоне 0''02 в зависимости от конкретной камеры. Апертурные поправки определялись по измерениям 6–17 ярких изолированных звезд в большой (0''5 для ACS и 0''4 для WFC3) и малых апертурах. В качестве нуль-пунктов использовались величины, рассчитанные в пакете программ PySynphot v2.01 с помощью команды `effstim`. Результирующие звездные величины и их ошибки для обеих звезд перечислены в таблице А.1. Приведенные ошибки соответствуют доверительным интервалам 1σ и включают в себя статистические ошибки измерения потока, ошибки апертурных поправок, а также неопределенности, связанные со стабильностью нуль-пунктов и стабильностью PSF фильтров в каждом конкретном наблюдении.

Фотометрия ближайшей к Но II X-1 области скопления проводилась в апертуре 2''2 с координатами центра $\alpha = 08 : 19 : 28.29$, $\delta = +70 : 42 : 19.9$ (J2000.0). Уровень фона измерялся в нескольких областях вокруг скопления. Полученные звездные величины представлены в таблице А.1. Относительно большие фотометрические ошибки в основном обусловлены сильными вариациями уровня фона. Звездная величина туманности $m_{neb} = 18.94 \pm 0.05$ была измерена только в фильтре F165LP в апертуре радиусом 1''23, центрированной на ULX.

Измеренные потоки st1 и st2 аппроксимировались моделями Куруца из ATLAS9 (Castelli and Kurucz 2003) с учетом величины межзвездного поглощения $A_V = 0.23$, измеренного по отношению линий бальмеровской серии водорода в туманности вокруг Но II X-1 (Vinokurov et al. 2013). При аппроксимации использовалась кривая поглощения, представленная в работе Cardelli et al. (1989). Металличность принималась равной 0.1 Z_\odot (Pilyugin et al. 2014). Наилучшее согласие с наблюдаемыми распределениями энергии получено для моделей с $\lg g = 4.0$ и эффективными температурами и радиусами фотосферы $T_{eff} = 32.2 \pm 1.4$ кК, $R_{ph} = 10.4 \pm 0.6 R_\odot$ ($\chi^2/dof \approx 1.2$) и $T_{eff} = 29.4 \pm 2.1$ кК,

⁵Использовалась сумма двух соосных двумерных гауссиан, описывающих ядро и крылья PSF; всего четыре параметра.

Таблица А.2. Детали фотометрических измерений по данным AstroSat: B_{neib} — полные потоки в апертуре радиусом $1''.23$ всех окружающих Но II X-1 сторонних источников, F_{net} — потоки Но II X-1 в апертуре $1''.23$ за вычетом фона и B_{neib} , F_{F148W} — чистые потоки Но II X-1, приведенные к бесконечной апертуре и единому фильтру $F148W$

#	Filter	FWHM of PSF, секунд дуги	Доля потока в апертуре $1''.23$	Плотность потока, 10^{-16} эрг с^{-1} см^{-2} \AA^{-1}		
				B_{neib}	F_{net}	F_{F148W}
1	$F148W$	1.40 ± 0.07	0.61 ± 0.05	2.36 ± 0.07	1.24 ± 0.13	2.03 ± 0.23
2	$F154W$	1.53 ± 0.07	0.57 ± 0.05	2.35 ± 0.07	1.25 ± 0.14	2.30 ± 0.28
3	$F154W$	1.56 ± 0.07	0.57 ± 0.05	2.35 ± 0.07	1.05 ± 0.14	1.91 ± 0.27
6	$F148W$	1.83 ± 0.06	0.51 ± 0.04	2.33 ± 0.07	1.15 ± 0.11	2.27 ± 0.23
7	$F148W$	1.77 ± 0.05	0.51 ± 0.04	2.33 ± 0.07	1.22 ± 0.11	2.39 ± 0.23
8	$F148W$	1.58 ± 0.05	0.58 ± 0.03	2.35 ± 0.07	1.24 ± 0.11	2.12 ± 0.20
9	$F148W$	1.70 ± 0.09	0.53 ± 0.06	2.34 ± 0.07	1.11 ± 0.11	2.11 ± 0.24
10	$F148W$	1.68 ± 0.09	0.52 ± 0.05	2.34 ± 0.07	1.06 ± 0.11	2.04 ± 0.23

$R_{\text{ph}} = 7.2 \pm 0.7 R_{\odot}$ ($\chi^2/\text{dof} \approx 2.7$) для более яркой (st1) и более слабой (st2) звезд соответственно. Полученные параметры и абсолютные звездные величины $M_V = -4.7 \pm 0.04$ и $M_V = -3.8 \pm 0.05$ соответствуют звездам спектральных классов В0–О9 и В0–В1 IV–V (например, Straizys and Kuriliene 1981).

Спектральное распределение энергии скопления было аппроксимировано модельными спектрами, рассчитанными в программе Starburst99 в предположении металличности $0.1 Z_{\odot}$ для диапазона возрастов 2.5–5 млн. лет. Межзвездное поглощение варьировалось от значения $A_V = 0.09$ в Галактике до значения $A_V = 0.23$, измеренного по линиям туманности. Минимальное значение $\chi^2/\text{dof} = 2.8$ было достигнуто для скопления с возрастом 2.9 млн. лет и $A_V = 0.22 \pm 0.02$, что неплохо согласуется с результатами Stewart et al. (2000). Помимо спектра самих звезд, программа Starburst99 выводит континуальный спектр окружающей туманности. В качестве оптимальной мы приняли модель SED с коэффициентом 0.5 для компонента туманности (звезды + 0.5 * туманность).

В качестве модели туманности вокруг Но II X-1 был использован табличный спектр⁶ планетарной туманности, свернутый с кривой поглощения с $A_V = 0.23$. Такой выбор обусловлен схожестью спектров фотоионизованных туманностей вокруг многих ULX (в частности, Но II X-1), в которых наблюдается множество ярких линий высокого возбуждения (см., например, Abolmasov et al. 2007), со спектрами планетарных туманностей, что указывает на близкую степень ионизации газа. Использование табличного спектра оставляет свободным только один параметр — нормировку, которая определялась по измеренному выше потоку туманности.

Для получения потока каждого из четырех источников в апертуре $1''.23$ их SED умножался на соответствующий коэффициент w , определенный выше, а затем сворачивался с кривыми пропускания фильтров UVIT. Суммарный поток четырех источников в апертуре $1''.23$, а также скорректированный за вклад этих источников поток Но II X-1 в той же апертуре для каждого наблюдения AstroSat представлены в таблице А.2. В итоге оказалось, что поток сторонних источников слабо зависит от размера PSF, поскольку вклад двух звезд и туманности, уменьшающийся по мере ухудшения разрешения, частично компенсируется растущим вкладом скопления.

Апертурные поправки и пересчет потоков в разных фильтрах

Заключительный этап обработки FUV-данных включал исправление полученных «чистых» потоков Но II X-1 за апертурную поправку и пересчет потоков в фильтр $F148W$ для исследования переменности источника. Пересчет потребовался для двух наблюдений 2016 года, выполненных в фильтре $F154W$. Для этого, как и в предыдущем разделе, мы промоделировали полученное по данным HST спектральное распределение энергии объекта.

Апертурные поправки для изображений AstroSat рассчитывались посредством измерения потоков четырех ярких изолированных звезд в апертурах радиусом 3 ($1''.23$) и 50 (приблизительно $20''$) пикселей.

⁶FITS-файл `pn_nebula_only_smooth.fits`, взятый из библиотеки MAST по адресу <https://archive.stsci.edu/hlsp/reference-atlases/cdbs/etc/source/>.

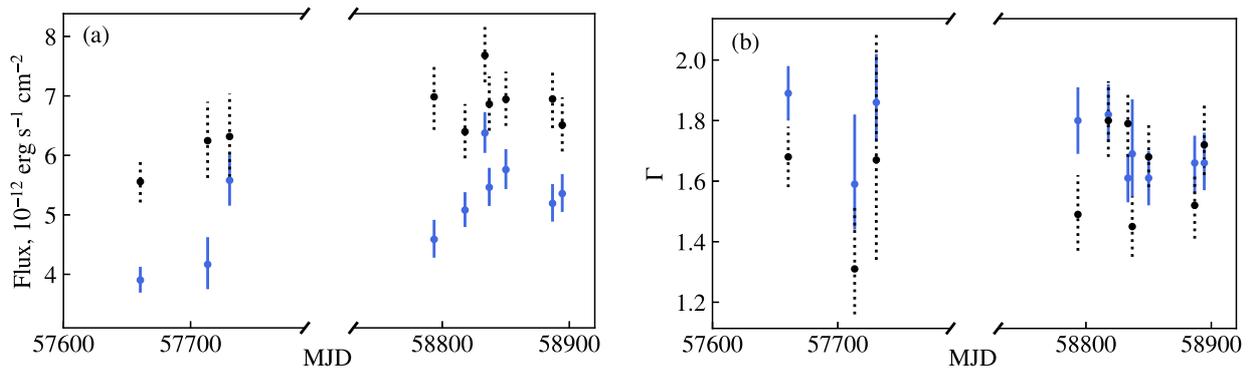


Рис. А.1. Чистые рентгеновские потоки (а) и спектральные индексы Γ (б). Цвета — те же, что на рис. 3 — обозначают два варианта анализа (см. текст): синий — метод I ($5'$ апертура), черный — метод II ($16'$).

Уровень фона оценивался в кольцах с внутренним радиусом и шириной 75 и 25 пикселей соответственно. Полученные значения в виде «доли потока в апертуре» и их 1σ -погрешности приведены в таблице А.2.

Фотометрия Но II X-1 проводилась по тем же данным HST и теми же методами, что использованы и описаны выше для двух соседних звезд. Полученные звездные величины приведены в таблице А.1.

Но II X-1 является подтвержденным переменным в оптическом диапазоне источником, что потенциально может вызывать проблемы двух видов. Первая связана с тем, что имеющиеся измерения потока по данным HST в разных фильтрах не синхронны и, следовательно, могут не описываться одной моделью. Во-вторых, SED, полученный по данным HST, может быть неприменим к моменту наших наблюдений, если состояние источника изменилось. По счастливой случайности это оказалось не так. Оптическая переменность Но II X-1 невелика ($\Delta m_V \approx 0.07$ в наблюдениях HST 2006–2007 гг., Tao et al. (2011)), что позволило ряду авторов успешно аппроксимировать SED этого объекта (Tao et al. 2012, Vinokurov et al. 2017). Применяв при аппроксимации наблюдаемых потоков, указанных в таблице А.1, модель чернотельного излучения⁷, мы получили оценку эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 35.5 \pm 2.9$ кК с $\chi^2/\text{dof} = 3.6$, что близко к результатам Tao et al. (2012). После свертки модельного SED с кривыми пропускания фильтров были получены потоки $M_{F148W} = (2.49 \pm 0.08) \times 10^{-16}$ и $M_{F154W} = (2.39 \pm 0.08) \times 10^{-16}$ эрг с⁻¹ см⁻² Å⁻¹. Данные модельные значения, основанные на фотометрии HST, близки к полученным на AstroSat величинам (таблица А.2), поэтому можно сделать вывод, что состояние источника существенно не изменилось. Более того, поскольку фильтры $F148W$ и $F154W$ очень близки (их полосы пропускания пересекаются приблизительно на 80%, таблица 2), небольшие изменения формы SED могут привести лишь к незначительной ошибке при пересчете потоков. Преобразование было выполнено путем умножения потоков в полосе $F154W$ на коэффициент $M_{F148W}/M_{F154W} = 1.040 \pm 0.010$. Итоговые скорректированные за апертурную поправку потоки в фильтре $F148W$ представлены в последнем столбце таблицы А.2. Приведенные ошибки соответствуют доверительным интервалам 1σ и рассчитывались как квадратный корень из суммы квадратов следующих составляющих: статистических погрешностей измерений потоков в апертуре $1''.23$, неопределенностей, связанных с вычитанием соседних источников, и ошибок определения апертурных поправок.

Для проверки полученных результатов, в частности, для решения проблемы вычитания вклада соседних источников в поток в апертуре $1''.23$, меняющегося в зависимости от размера PSF, мы повторили обработку другим способом. Перед выполнением фотометрии мы уменьшили пространственное разрешение каждого изображения AstroSat до наихудшего (около $1''.8$, наблюдение #6), что должно сделать равными апертурные поправки и вклады сторонних источников во всех наблюдениях. Изображения были сглажены с помощью двумерного фильтра Гаусса, ширина которого в каждом направлении была выбрана таким образом, чтобы апертурные поправки и $FWHM$ одиночных звезд в пределах погрешности были такими же, что и в наблюдениях #6. Затем мы измерили чистые потоки Но II X-1, предполагая, что вклад соседних источников равен вкладу, определенному в разделе «Вклад окружающих источников в полный поток в апертуре объекта» данного Приложения для наблюдения #6. Потоки, полученные обоими методами, хорошо согласуются между собой.

⁷Самый красный фильтр $F814W$ был исключен из анализа, поскольку в предыдущих исследованиях Но II X-1 показал наибольшую переменность в ИК-диапазоне.

ОБРАБОТКА РЕНТГЕНОВСКИХ ДАННЫХ

Для стандартного анализа данных, получаемых с помощью SXT, разработчик прибора рекомендует³ учитывать только диапазон энергий 0.3–7.0 кэВ, отсчеты источника экстрагировать в круговой апертуре радиусом 16' (собирающей около 95% квантов), а для оценки уровня фона использовать спектр, полученный в рамках специальной калибровочной серии наблюдений⁸. Такая рекомендация связана с тем, что профиль PSF имеет широкие крылья, простирающиеся вплоть до 19' от центра PSF (диаметр поля зрения прибора составляет 40'), и поэтому «пользовательский» фон, измеряемый вдали от источника непосредственно по тем же кадрам (как это делается в большинстве других миссий), даже взятый на периферии поля зрения, все еще может быть загрязнен отсчетами самого источника, что приведет к завышенной оценке уровня фона. Однако в наших наблюдениях Но II X-1, поскольку источник является достаточно слабым, этот эффект оказался незначительным, и во всех случаях пользовательский фон, измеренный по тем же кадрам вдали от объекта, был ниже стандартного в пересчете на одну и ту же площадь. Более того, мы обнаружили, что фон варьируется от наблюдения к наблюдению в пределах 30%, а значит вычитание одного и того же стандартного уровня фона из всех наших наблюдений должно дать неверные значения чистых потоков объекта. В связи с этим мы решили представить наш анализ в двух вариантах. Первый (далее метод I) — назовем его «консервативным» — заключается в экстракции отсчетов объекта из апертуры 5' и использовании стандартного фона. В эту апертуру попадает 50% фотонов объекта, но при этом она захватывает гораздо меньше фона, чем апертура 16'. Мы обнаружили, что в этом варианте вклад фона в общий поток в апертуре составляет всего 20%, и значит проблема выбора фона не должна сказываться на конечном результате слишком сильно. Во втором варианте (метод II) мы использовали апертуру 16' и пользовательский фон, измеряемый в наборе областей (regions в ds9) по краям кадра. Эти области — прямоугольной и круглой формы — для каждого наблюдения размещались индивидуально таким образом, чтобы они покрывали как можно большую площадь, находились за пределами апертуры 16' объекта и в то же время были в стороне от калибровочных источников рентгеновских квантов, расположенных в углах чипа. В этом варианте вклады объекта и фона в полный поток в апертуре примерно равны. Кроме того, в каждом из вариантов мы исключили энергии ниже 0.7 кэВ, в которых вклад фона преобладал над вкладом объекта.

Для получения кривых блеска (рис. 3) мы отфильтровали таблицы событий (event-файлы) по номерам энергетических каналов, используя выражение $PI=70:700$, примерно соответствующее диапазону энергий 0.7–7.0 кэВ. Скорость счета стандартного фона в этом диапазоне энергий (0.0074 отсчетов s^{-1}) определена с помощью *xspec*. Отсчеты кривых блеска были усреднены таким образом, чтобы получить по одной точке на каждый непрерывный сегмент наблюдения продолжительностью 200 с и длиннее; более короткие сегменты отбрасывались.

Для получения потоков в физических единицах мы провели спектральный анализ. Из-за относительно небольшого количества накопленных отсчетов мы решили рассматривать лишь самые простые модели: только многоцветный диск или только степенной спектр, свернутые с кривой межзвездного поглощения. Для аппроксимации данных использовалась статистика Кэша (Cash 1979). Спектры были сгруппированы программой *grppha* так, чтобы иметь минимум по одному отсчет в каждом бине. Матрица отклика (RMF) была стандартной: *sxt_pc_mat_g0to12.rmf*, вспомогательные файлы отклика (ancillary responses, ARF) формировались индивидуально для каждого спектра с помощью скрипта *sxt_ARFModule_v02.py* с включенной коррекцией за виньетирование, что настоятельно рекомендуется делать в случаях, когда SXT не является основным инструментом, и источник смещен в сторону от оптической оси. В наших данных смещение составляло около 4' во всех случаях, кроме наблюдений #2 и #3, где смещение было 9' и 11' соответственно. Для этих двух наблюдений коррекция виньетирования изменила потоки примерно на 15% и 25% по сравнению с нескорректированными, в остальных случаях поправки составляли 6–9%. Межзвездное поглощение вводилось с помощью модели *tbabs*, колонковая плотность N_H была ограничена снизу значением $5.8 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, соответствующим поглощению в нашей Галактике, которое было оценено с помощью инструмента *nh* пакета *Heasoft*.

Как модель диска, так и степенная модель обеспечили приемлемую аппроксимацию данных со значением статистики C/dof от 0.8 до 1.2 ($T_{in} \sim 1.2$ кэВ, $\Gamma \sim 1.6$ и N_H вблизи нижнего предела). Тем не менее степенная модель почти во всех рядах дала значения статистики ниже (на 5%–15%), поэтому для оценки потоков мы применили ее. Потоки, скорректированные за поглощение, и их 1σ -ошибки

⁸Файл *SkyBkg_comb_EL3p_C1_Rd16p0_v01.pha*, далее мы будем его называть «стандартным фоном».

измерялись с помощью конволюционной модели *cflux*. Финальные потоки даны в таблице 1 и показаны на рис. А.1. Также на этом рисунке показаны полученные спектральные индексы.

На рис. А.1 видно, что чистые потоки в апертурах 5' и 16' оказались разными. Важно отметить, что вспомогательные файлы отклика (ARF), предназначенные для учета эффективной площади конкретного рентгеновского телескопа при пересчете наблюдаемой скорости счета в физические потоки, будучи генерируемыми индивидуально для каждого спектра и используемой апертуры, по сути учитывают и апертурную поправку, в результате чего получаемые потоки не должны зависеть от размера апертуры, в которой они были измерены. Тем не менее потоки, полученные в апертуре 5', оказались систематически ниже (но не вдвое, как следовало бы ожидать, если бы апертурные поправки не были применены вообще). Это может означать, что скрипт, генерирующий ARF, будучи рассчитанным на стандартный анализ, для апертуры 5' генерирует заниженные поправки. С другой стороны, различие потоков на рисунке может быть связано также и с тем, что потоки в большей апертуре, наоборот, могут оказаться завышенными, поскольку в методе II мы использовали фон, измеренный в периферийных областях поля зрения, которые, вероятно, подвержены виньетированию. Также мы обратили внимание на то, что, хотя апертура меньшего размера должна собирать меньше фоновых отсчетов, измеренные в ней потоки показали более сильный разброс. Это может быть объяснено тем, что маленькая апертура более чувствительна к случайным колебаниям формы PSF, поэтому результаты измерения потоков в большей апертуре мы считаем более надежными. Спектральные индексы же, напротив, оказались более стабильны в апертуре радиусом 5', видимо, по той причине, что точность их измерений в большей степени зависит от относительного вклада фона на высоких энергиях, нежели от стабильности PSF.

Simultaneous X-ray/UV Observations of Ultraluminous X-ray Source Holmberg II X-1 with Indian Space Mission AstroSat

A. Vinokurov¹, K. Atapin¹, O. P. Bordoloi², A. Sarkisyan¹, U. Kashyap³, M. Chakraborty³, P. T. Rahna⁴,
A. Kostenkov¹, Y. Solovyeva¹, S. Fabrika¹, M. Safonova⁵, R. Gogoi⁶, F. Sutaria⁵, and J. Murthy⁵

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Tezpur University, Tezpur, Assam 784028, India

³Indian Institute of Technology Indore, Indore 453552, India

⁴Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China

⁵Indian Institute of Astrophysics, Bengaluru 560034, India

⁶Tezpur University, Tezpur, Assam 784028, India

We present the results of eight epochs of simultaneous UV and X-ray observations of the highly variable ultraluminous X-ray source (ULX) Holmberg II X-1 with AstroSat—Indian multiwavelength space satellite. During the entire observation period from late 2016 to early 2020, Holmberg II X-1 showed a moderate X-ray luminosity about of 8×10^{39} erg s⁻¹ and a hard power-law spectrum with $\Gamma \lesssim 1.9$. Due to low variability of the object in X-rays (by a factor 1.5) and insignificant variability in the UV range (upper limit approximately 25%) we could not find reliable correlation between flux changes in these ranges. Inside each particular observation, the X-ray variability amplitude is higher, reaching a factor of 2–3 respect to the mean level, however, it is observed in the form of relatively short stochastic bursts. We discussed our results in terms of three models of a heated donor star, a heated disk and a heated wind, and estimated the lower limit to the variability which would allow to reject at least part of them.

Keywords: *accretion, accretion disks—X-rays: binaries—X-rays: individual: Holmberg II X-1*