

УДК 524.38–735:520.82

ПЕРЕМЕННОСТЬ УЛЬТРАЯРКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА М 74 X-1 В РЕНТГЕНОВСКОМ И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ

© 2024 А. С. Винокуров^{1*}, К. Е. Атапин², Ю. Н. Соловьева¹, А. Н. Саркисян¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 3 мая 2024 года; после доработки 16 июля 2024 года; принята к публикации 23 июля 2024 года

Используя наблюдения объекта М 74 X-1, полученные с помощью рентгеновской обсерватории Chandra и космического телескопа им. Хаббла, мы провели отождествление этого рентгеновского источника в оптическом диапазоне. Анализ других имеющихся в архивах космических телескопов данных позволил нам проследить эволюцию состояния М 74 X-1 на протяжении двух десятилетий наблюдений, а также провести поиск корреляции переменности объекта в рентгеновском и оптическом диапазонах по данным нескольких квазисовременных наблюдений. В результате обнаружено нетипичное для большинства ультраярких рентгеновских источников близкое к линейному падению блеска приблизительно на $1^{m}9$ в полосе V в период 2005–2021 гг., которое, по-видимому, не имеет прямой связи с изменением рентгеновского потока объекта. В то же время выявлено изменение характера короткопериодичной переменности рентгеновского потока М 74 X-1: к 2021 г. снизилась стохастическая переменность объекта и пропали квазипериодические осцилляции на временах около 1.5 часов, обнаруженные ранее по данным наблюдений 2001–2002 гг.

Ключевые слова: звезды: фундаментальные параметры — рентгеновское излучение: двойные

1. ВВЕДЕНИЕ

К ультраярким рентгеновским источникам (ultraluminous X-ray sources, ULX) относят внегалактические аккрецирующие системы с наблюдаемыми рентгеновскими светимостями выше, чем эддингтоновский предел для черных дыр звездных масс (примерно равный 3×10^{39} эрг с⁻¹ в предположении изотропности излучения), но при этом не связанные с активностью сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Поскольку эддингтоновская светимость зависит от массы аккретора, первое десятилетие с момента открытия данных объектов доминировала идея, что темп поступления вещества в их аккреционные диски все же ниже эддингтоновского, но аккреторами являются более массивные черные дыры с массами 10^2 – $10^4 M_{\odot}$ (Colbert and Mushotzky, 1999). Это позволяло ожидать, что наблюдательные свойства данных объектов будут в целом аналогичны таковым у галактических двойных с черными дырами (Black hole binaries, БНВ). Однако появление хорошо накопленных рентгеновских спектров продемонстрировало явные отличия ULX от БНВ (Gladstone et al., 2009), и постепенно в научном сообществе

все большую популярность стала набирать модель сверх-эддингтоновской (сверхкритической) аккреции на компактный объект звездной массы (см. обзоры Fabrika et al. 2021; King et al. 2023). Убедительным доказательством реализации режима сверхкритической аккреции по крайней мере у части ULX стало обнаружение нейтронных звезд в ряде систем благодаря детектированию когерентных пульсаций их рентгеновского излучения (Bachetti et al., 2014; Fürst et al., 2016; Israel et al., 2017; Carpano et al., 2018; Rodríguez Castillo et al., 2020 и другие).

Практически все ULX являются переменными источниками, рентгеновский поток которых может меняться от двух до нескольких сотен раз на временном масштабе дни–годы (Earnshaw et al., 2019; Song et al., 2020; Tranin et al., 2023). Рентгеновские спектры также демонстрируют изменчивость. В ярком состоянии они имеют искривленную форму, которая формально может быть хорошо описана моделью многоцветного диска (diskbb) с температурой порядка 1–2.5 кэВ («broadened disc», Sutton et al. 2013) или степенным законом с экспоненциальным завалом примерно на тех же энергиях (cutoffpl). По мере снижения светимости спектр становится более плоским, и в некоторых случаях на энергиях около 2 кэВ появля-

*E-mail: vinokurov@sao.ru

ется небольшая особенность, приводящая к двугорбой форме спектра (Sutton et al., 2013; Pintore et al., 2014). Хотя наиболее наглядно эти закономерности спектральной эволюции были продемонстрированы на примере конкретных объектов (например, Holmberg IX X-1 — Luangtip et al., 2016, IC 342 X-1 — Shidatsu et al., 2017), они, по-видимому, являются общим свойством большинства ULX. На энергиях выше 10 кэВ во всех спектральных состояниях поток быстро падает, но по сравнению с простым виновским распределением энергии наблюдается некий избыток, который может быть описан дополнительной компонентой `cutoffpl` (Bachetti et al., 2013; Walton et al., 2014, 2018).

Несмотря на быстрый прогресс исследований ULX в рентгеновском диапазоне, их оптические свойства продолжают оставаться довольно слабо изученными. Из более 1000 источников, включенных в состав современных каталогов ULX-кандидатов (Earnshaw et al., 2019; Walton et al., 2022), однозначно в оптическом диапазоне отождествлены около 50 (Vinokurov et al., 2020b). Большинство таких отождествлений (оптических двойников) представляют собой слабые звездобразные источники с видимыми звездными величинами $m_V > 21^m$ (Tao et al., 2011; Gladstone et al., 2013; Vinokurov et al., 2020b) и располагаются в тесных звездных полях, требующих наблюдений с пространственным разрешением существенно лучше $1''$. Переменность блеска оптических двойников редко превышает нескольких десятых звездной величины (Tao et al., 2011) и лишь в случаях транзитных ULX может оказаться значительно больше (например, Soria et al. 2012; Atapin et al. 2020; Vinokurov et al. 2020a). Отдельные источники показывают периодические изменения блеска, которые связывают с орбитальным движением (Liu et al., 2009; Motch et al., 2014).

Вопрос о связи переменности ультраярких рентгеновских источников в рентгеновском и оптическом диапазонах, в частности о вероятной переработке высокоэнергетичных квантов в оптическое излучение, был затронут вскоре после первых отождествлений ULX в оптическом диапазоне (Feng and Kaaret, 2008; Kaaret and Corbel, 2009; Tao et al., 2012). Одним из наиболее эффективных способов решения этого вопроса является анализ одновременных или квазисовременных (с интервалом в несколько дней) наблюдений в рентгеновском и оптическом диапазонах. Однако первые попытки такого анализа натолкнулись на дефицит одновременных рядов, а также слабую наблюдаемую переменность ULX (в имеющихся на тот момент данных), не позволившую сделать однозначных выводов: была найдена лишь слабая корреляция на уровне ниже 3σ (Grisé et al., 2012).

В последние годы появились свидетельства в пользу скоррелированности изменений рентгеновского и оптического потоков еще нескольких объектов, например ультраяркого рентгеновского пульсара NGC 300 ULX-1 (Villar et al., 2016) и транзитного ULX в галактике UGC 6456 (Vinokurov et al., 2020a), хотя информации об ответственных за корреляцию процессах по-прежнему мало и требуются дополнительные исследования.

Сейчас задача поиска взаимосвязи между переменностью в рентгеновском и оптическом диапазонах становится проще выполнимой вследствие постоянного накопления наблюдательного материала. В архивах рентгеновских обсерваторий Chandra, XMM-Newton, Swift и космического телескопа им. Хаббла (HST) мы нашли подходящие для поиска скоррелированности переменности в двух диапазонах неопубликованные данные для нескольких ультраярких рентгеновских источников. Одним из них является M74 X-1, также известный как CXOU J013651.1+154547, его исследованию и посвящена данная работа.

Объект расположен в крупной области звездообразования спиральной галактики M74 (NGC 628), находящейся на расстоянии 8.7 Мпк (Sabbi et al., 2018). Интересной особенностью источника является наблюдавшаяся в 2001–2003 годах серия квазипериодических вспышек в рентгеновском диапазоне (Liu et al., 2005). Их период, составляющий около 4000–7000 с, слишком короткий, чтобы быть периодом орбитального движения компонентов системы, но в то же время он гораздо длиннее, чем периоды квазипериодических осцилляций (QPO) рентгеновских двойных нашей Галактики (см. обзор Belloni and Stella 2014) и ULX (Atapin et al., 2019). В пике вспышек светимость объекта достигала порядка 10^{40} эрг s^{-1} (Krauss et al., 2005), в среднем сохраняясь на уровне 5×10^{38} эрг s^{-1} . Мы провели оптическое отождествление источника, а также исследовали его поведение в оптическом и рентгеновском диапазонах.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

M74 X-1 (далее также используется более краткое обозначение — X-1) множество раз попадал в поле зрения космических телескопов, чаще всего не являясь при этом основной целью наблюдений. В архивах Chandra и XMM-Newton мы нашли 15 наблюдений данной области неба (таблица 1). Первые наблюдения были выполнены в 2001–2003 гг. Затем последовал длительный перерыв, пока в 2013 году по соседству с X-1 не вспыхнула сверхновая SN 2013ej, семь раз наблюдавшаяся обсерваторией Chandra с августа по декабрь этого года. Наконец, два наиболее поздних

Таблица 1. Анализируемые в работе наблюдения М74 X-1, полученные рентгеновскими обсерваториями Chandra и XMM-Newton, а также результаты их спектрального анализа: N_H — лучевая концентрация водорода, Γ и E_c — показатель и положение завала в модели степенного закона с экспоненциальным завалом, $F_{\text{апес}}$ — относительный вклад излучения горячей плазмы в светимость объекта, C_{stat} — достигнутое в результате минимизации значение статистики Кэша, dof — количество степеней свободы (degrees of freedom). Температура плазмы, за редким исключением, лежит между 0.7 и 1.2 кэВ. Скорректированные за поглощение светимости источника L_X в диапазоне 0.3–10 кэВ рассчитаны для расстояния $D = 8.7$ Мпк. Величина всех ошибок соответствует доверительному интервалу 1σ

Дата	Обсерватория, ObsID	T_{exp} , кс	N_H , 10^{21} см $^{-2}$	Γ	E_c , кэВ	$F_{\text{апес}}$, %	$C_{\text{stat}}/\text{dof}$	L_X , 10^{39} эрг с $^{-1}$
19.06.2001	Chandra, 2057	46.4	$0.5^{+0.7}_{-u}$	$1.92^{+0.16}_{-0.10}$	>10	14	123.65/144	$0.50^{+0.05}_{-0.03}$
19.10.2001	Chandra, 2058	46.2	$0.47^{+0.05}_{-u}$	$1.78^{+0.06}_{-0.06}$	>10	5	224.01/243	$1.57^{+0.07}_{-0.07}$
02.02.2002	XMM, 0154350101	33.1	$0.47^{+0.07}_{-u}$	$1.72^{+0.09}_{-0.09}$	>10	7	398.93/439	$1.31^{+0.09}_{-0.09}$
07.01.2003	XMM, 0154350201	24.4	$0.8^{+0.5}_{-u}$	$1.97^{+0.16}_{-0.4}$	>10	7	211.25/63	$0.91^{+0.08}_{-0.12}$
20.11.2003	Chandra, 4753	5.3	—	—	—	—	—	$0.13^{+0.05}_{-0.05}$
29.12.2003	Chandra, 4754	5.0	—	—	—	—	—	< 0.14
21.08.2013	Chandra, 14 801	9.8	$0.5^{+1.1}_{-u}$	$-0.5^{+0.6}_{-0.6}$	$1.21^{+0.5}_{-0.23}$	6	160.61/172	$2.93^{+1.5}_{-0.20}$
21.09.2013	Chandra, 16 000	39.6	$0.7^{+0.5}_{-u}$	$0.9^{+0.4}_{-0.3}$	$5.4^{+11}_{-2.0}$	3	298.33/323	$3.83^{+0.4}_{-0.18}$
07.10.2013	Chandra, 16 001	14.7	$0.5^{+1.0}_{-u}$	$0.1^{+0.8}_{-0.3}$	$1.8^{+1.6}_{-0.3}$	5	166.37/217	$3.34^{+0.6}_{-0.24}$
10.10.2013	Chandra, 16 484	14.7	$0.7^{+1.0}_{-u}$	$0.3^{+0.8}_{-0.4}$	$2.1^{+u}_{-0.5}$	6	190.29/223	$3.5^{+0.7}_{-0.3}$
11.10.2013	Chandra, 16 485	9.0	$0.5^{+0.6}_{-u}$	$0.8^{+0.5}_{-0.4}$	6^{+u}_{-3}	6	165.81/167	$4.1^{+0.8}_{-0.5}$
14.11.2013	Chandra, 16 002	37.6	$0.9^{+0.4}_{-u}$	$0.4^{+0.4}_{-0.3}$	$2.2^{+0.9}_{-0.4}$	0	256.7/304	$3.12^{+0.3}_{-0.16}$
15.12.2013	Chandra, 16 003	40.4	$1.1^{+0.3}_{-0.4}$	$1.77^{+0.12}_{-0.32}$	>10	3	233.3/262	$2.49^{+0.25}_{-0.24}$
30.09.2018	Chandra, 21 000	10.0	1.9^{+3}_{-u}	$1.2^{+0.7}_{-1.4}$	7^{+u}_{-6}	16	119.8/167	$3.2^{+0.8}_{-0.7}$
13.01.2021	XMM, 0864270101	88.4	$1.40^{+0.19}_{-0.3}$	$2.01^{+0.09}_{-0.29}$	>10	2	1040.96/1137	$2.45^{+0.4}_{-0.26}$

наблюдения приходится на 2018 и 2021 г. Кроме этого, с 2007 по 2023 г. галактика 55 раз наблюдалась телескопом Swift, однако более половины данных было получено в год вспышки сверхновой. Все наблюдения Chandra выполнены с использованием детектора ACIS-S. В случае XMM-Newton мы анализировали только данные с двух детекторов EPIC-MOS; данные камеры EPIC-pn не использовались, поскольку в части рядов объект попадал в промежуток между чипами. В случае Swift были задействованы только данные прибора XRT.

В архиве MAST¹ имеются 14 наблюдений М74 X-1 на космическом телескопе им. Хаббла с применением различных фильтров в период с 2003 по 2024 г. Мы провели анализ только тех из них (см. таблицу 2), которые требуются для астрометрии, поиска корреляции изменений рентгеновского и оптического потоков, построения долговременной кривой блеска и ее сравнения с поведением объекта в рентгеновском диапазоне

¹<https://archive.stsci.edu/>

за два десятилетия наблюдений. Для выполнения последней задачи были выбраны два наиболее длинных ряда наблюдений в близких фильтрах $F555W$ и $F547M$, а также в фильтре $F814W$ камер ACS/WFC и WFC3/UVIS. Как уже отмечалось во Введении, среди отобранных данных имеются два перекрывающихся по времени наблюдения объекта на Chandra и HST (20 ноября и 29 декабря 2003 года) и одно квазиодновременное наблюдение, проведенное на HST и Swift 16–17 октября 2013 года с разницей по времени около 30 часов.

3. АСТРОМЕТРИЯ

Отождествление М74 X-1 в оптическом диапазоне проводилось по данным обсерватории Chandra и космического телескопа им. Хаббла с использованием опорного источника, роль которого играла сверхновая SN 2013ej. Для проведения относительной астрометрии были выбраны два наиболее продолжительных наблюдения Chandra 2013 года (ObsID 16000 и 16002), астрометрическая привязка каждого из которых к данным

Таблица 2. Используемые в работе данные космического телескопа им. Хаббла. Наблюдаемые звездные величины даны в системе VEGAMAG; звездные величины в фильтрах HST не исправлялись за межзвездное поглощение, а величины в фильтре V и цвет $V - I_c$ корректировались за поглощение в Галактике $(A_V)_G = 0^m19$. Ошибки соответствуют доверительным интервалам 1σ и включают в себя статистические погрешности измерения потока и неопределенности апертурных поправок

Дата	Камера/фильтр	T_{exp} , с	m_{filter}	V	$V - I_c$
20.11.2003	ACS/WFC/F555W	4×550	24.809 ± 0.029	24.60 ± 0.03	0.57 ± 0.05
	ACS/WFC/F814W	4×390	24.14 ± 0.03		
29.12.2003	ACS/WFC/F555W	4×530	25.03 ± 0.03	24.82 ± 0.03	
16.06.2005	ACS/WFC/F555W	360	24.69 ± 0.07	24.49 ± 0.07	0.32 ± 0.09
	ACS/WFC/F814W	2×360	24.29 ± 0.05		
17.10.2013	WFC3/UVIS/F336W	3×373	25.09 ± 0.18		
	WFC3/UVIS/F555W	$373 + 373 + 219$	26.07 ± 0.09	25.83 ± 0.09	
14.10.2014	WFC3/UVIS/F547M	$351 + 200$	26.07 ± 0.25	25.88 ± 0.25	
04.10.2016	WFC3/UVIS/F555W	$390 + 320$	26.08 ± 0.09	25.83 ± 0.10	0.63 ± 0.14
	WFC3/UVIS/F814W	2×390	25.30 ± 0.11		
04.12.2017	WFC3/UVIS/F555W	$390 + 320$	26.19 ± 0.11	25.96 ± 0.11	0.47 ± 0.21
	WFC3/UVIS/F814W	2×390	25.60 ± 0.18		
19.08.2021	WFC3/UVIS/F555W	2×355	26.70 ± 0.20	26.45 ± 0.20	0.68 ± 0.27
	WFC3/UVIS/F814W	2×390	25.87 ± 0.19		
04.01.2024	WFC3/UVIS/F555W	2×580	26.17 ± 0.07	25.93 ± 0.07	

Таблица 3. Координаты опорного источника и M74 X-1 на двух выбранных для относительной астрометрии изображениях Chandra (даты наблюдений 21 сентября и 14 ноября 2013 г.) и изображении HST в фильтре F336W (17 октября 2013 г.). Положение SN 2013ej на изображении HST учитывает поправки за смещение сеток координат HST и Gaia DR3 (см. текст)

Chandra ObsID	Chandra		HST	
	R.A., hh mm ss.sss	Dec, dd mm ss.ss	R.A., hh mm ss.sss	Dec, dd mm ss.ss
Опорный источник SN 2013e				
16 000	01 36 48.227	+15 45 30.72	01 36 48.189	+15 45 30.82
16 002	01 36 48.183	+15 45 31.05		
M74 X-1*				
16 000	01 36 51.121	+15 45 46.85	01 36 51.083	+15 45 46.95
16 002	01 36 51.070	+15 45 47.31	01 36 51.076	+15 45 47.08

* Измеренные и скорректированные координаты.

HST выполнялась независимо. Оба источника в этих наблюдениях располагались на чипе ACIS-S3 в пределах $1'$ от оптической оси телескопа, а значимость их детектирования превышала 20σ , что обеспечивало статистическую точность измерения координат около $0''.1$ или лучше (для 90% вероятности). Значения прямого восхождения и

склонения источников, полученные с помощью утилиты `Wavdetect` пакета `CIAO v4.13`, приведены в таблице 3.

Наличие единственного опорного источника не позволяет устранить возможный поворот между сетками координат рентгеновских и оптических изображений, типичные величины которого составляют около $2'$ (Yang et al., 2011). Таким обра-

зом, при расстоянии между X-1 и сверхновой около $45''$ связанная с поворотом ошибка положения ультраяркого рентгеновского источника примерно равна $0''.04$.

Выбранные для анализа наблюдения HST на камере WFC3/UVIS были выполнены спустя два месяца после пика блеска сверхновой, 17 октября 2013 года. Поскольку центральные пиксели изображения SN 2013ej в фильтре $F555W$ оказались пересвечены, ее положение определялось по данным в фильтре $F336W$ (использовалась процедура `daofind` пакета `IRAF`). Точность абсолютной астрометрической привязки данных HST не всегда является высокой, поэтому мы выполнили астрометрическую коррекцию для изображения в фильтре $F336W$ по семи надежно детектируемым одиночным звездообразным источникам из каталога Gaia Data Release 3 (Brown et al., 2021). После устранения незначительного сдвига, составляющего около $0''.05$ по прямому восхождению и менее $0''.01$ по склонению, остаточные отклонения между скорректированным положением опорных звезд по данным HST и GAIA не превышают $0''.01$, что значительно меньше остальных ошибок астрометрии.

По результатам измерений мы обнаружили, что смещение сетки координат данных Chandra относительно HST не превышает $0''.6$, а итоговая точность определения положения ULX на оптических изображениях после компенсации этого смещения составила $0''.14$ и $0''.12$ (90% доверительный интервал) при измерениях по данным Chandra ObsID 16000 и ObsID 16002 соответственно. Указанные точности включают как статистические ошибки положений M74 X-1 и опорного источника, так и неопределенность поворота между сетками координат Chandra и HST, которые складывались квадратично. Полученные координаты X-1 на изображении в фильтре $F336W$ приведены в таблице 3. Совмещение сеток координат всех изображений HST 2013 года по десяти опорным звездам позволило определить положение ULX на изображении в фильтре $F555W$. В области пересечения обоих кружков ошибок на изображениях HST вне зависимости от фильтра виден единственный звездообразный оптический источник (см. рис. 1).

4. ФОТОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДВОЙНИКА

Измерения звездных величин оптического источника, с которым был отождествлен M74 X-1, выполнены методом апертурной фотометрии с помощью пакета `IRAF/APPHOT` на калиброванных суммарных изображениях в формате `fits`, скомбинированных из отдельных экспозиций. Радиус апертуры был выбран равным двум пикселям, что

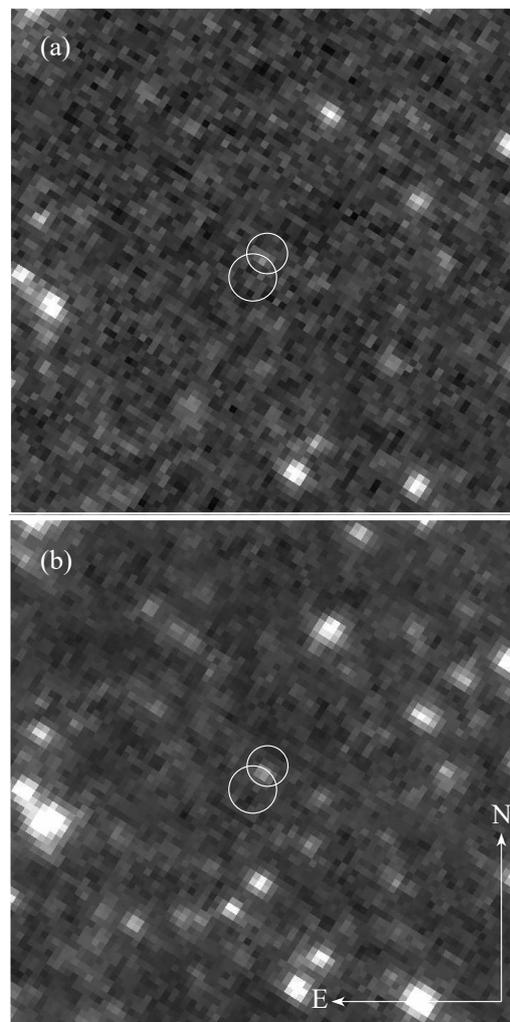


Рис. 1. Изображение области $3'' \times 3''$ вокруг M74 X-1, полученное космическим телескопом им. Хаббла (HST) в фильтрах $F336W$ (a) и $F555W$ (b). Радиусы кружков соответствуют ошибкам астрометрии, полученным в результате независимой привязки двух снимков Chandra к данным HST, и равны $0''.14$ для ObsID 16000 и $0''.12$ для ObsID 16002.

соответствует $0''.08$ для WFC3/UVIS и $0''.10$ для ACS/WFC. Малый радиус апертуры, в пределах которого заключено около 50–70% потока, позволял нивелировать вклад соседних звезд и минимизировать влияние неоднородностей фона.

Вариации уровня фона, который оценивался в центрированных на объект кольцевых апертурах, по-видимому, связаны с неоднородностью плотности звездного поля: на расстояниях, превышающих $0''.5$ число слабых неразрешенных звезд значительно выше, чем в непосредственной близости от X-1. Анализ изменений потока объекта в разных фильтрах, в зависимости от размеров кольца фона, показал, что для всех имеющихся изображений в качестве оптимальных значений внутреннего и внешнего радиусов допустимо принять $0''.20$ и $0''.40$

соответственно. Выбор области значительно большего размера ведет к переоценке уровня фона, в кольце меньшего размера становится значимым вклад крыльев функции распределения яркости самого объекта.

Апертурные поправки рассчитывались в два этапа. Непосредственно на кадрах, используя 4–8 ярких изолированных звезд, мы провели измерение поправок к «стандартной» апертуре 10 пикселей (0.4 и 0.5 для WFC3/UVIS и ACS/WFC соответственно), а коррекцию к бесконечной апертуре выполнили на основе табличных значений долей потока, в зависимости от размера апертуры². Уровень фона для апертурных звезд определялся в кольцевых апертурах с внутренним радиусом и толщиной 1.0.

Результаты измерений представлены в таблице 2. Для сравнения звездных величин объекта в близких фильтрах разных камер HST мы пересчитали их в систему Джонсона–Казинса с помощью пакета PYSYNPHOT и одновременно скорректировали за величину межзвездного поглощения в Галактике $(A_V)_G = 0.19$ (Schlafly and Finkbeiner, 2011) при $R_V = 3.1$. В качестве модельного спектра для этого преобразования мы использовали степенной закон со спектральными индексами, полученными на основе потоков в двух соседних фильтрах. В случае если наблюдения проведены только в одном фильтре, использовалось среднее значение спектрального индекса для фильтров F555W и F814W. Рассчитанные звездные величины в фильтре V и цвет $V - I_c$ даны в двух последних колонках таблицы 2.

Кривая блеска объекта в полосе V, построенная по данным в фильтрах F555W и F547M, представлена на рис. 2а. Измерения по данным 2003–2021 гг. были аппроксимированы линейной функцией, которая показывает падение блеска со временем со скоростью $(9.6 \pm 1.4) \times 10^{-2}$ год⁻¹, а полная амплитуда переменности за все время наблюдений составляет $\Delta(m_V) = 1.85 \pm 0.20$. Линейный тренд ломается в январе 2024 года, когда был зафиксирован рост блеска объекта приблизительно на 0.5. Кроме того, наблюдавшиеся в 2003–2005 годах вариации блеска на 0.2–0.3 (с максимальным уровнем значимости 5.2σ) могут иметь связь со вспышечной активностью объекта в рентгеновском диапазоне, амплитуда которой в указанный период, по-видимому, оставалась еще достаточно высокой (см. раздел 5). Отметим, что при большом падении блеска объекта изменение

цвета $\Delta(V - I_c) = 0.36 \pm 0.28$ было незначимым, оставаясь в пределах ошибок измерений.

5. ПЕРЕМЕННОСТЬ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Для наблюдений, перечисленных в таблице 1, мы провели анализ индивидуальных спектров и временных рядов³; данные Swift использовались только для построения общей кривой блеска. Во всех случаях при обработке данных мы следовали стандартным рекомендациям для каждого прибора, используя следующее программное обеспечение: CIAO v4.13 (Chandra), XMM-SAS v18.0.0 (XMM-Newton), HEASoft v6.28 (Swift). Для наблюдений Chandra и XMM-Newton были повторно выполнены предобработка и фильтрация с использованием наиболее свежих калибровочных файлов, в случае Swift мы использовали уже предобработанные (level-2) файлы событий с сайта дата-центра Swift⁴. Фотоны объекта экстрагировались в круговой апертуре радиусом 3'' в случае Chandra и 30'' для XMM-Newton и Swift. Уровень фона оценивался в нескольких областях, свободных от других источников и расположенных на том же чипе, что и исследуемый объект. Для каждого спектра были рассчитаны индивидуальные матрицы отклика, спектры с двух идентичных детекторов EPIC-MOS XMM-Newton были объединены с помощью программы epicspeccombine. Спектральный анализ выполнялся в программе Xspec 12.11.1. Чтобы не терять спектральное разрешение, при аппроксимации спектров моделями использовалась статистика Кэша, поэтому энергетические каналы были сгруппированы таким образом, чтобы иметь как минимум 1 фотон на бин. Построение бинированных кривых блеска и спектров мощности осуществлялось с помощью программы из пакета Xronos в составе HEASoft.

Основной целью спектрального анализа было измерение потоков объекта для построения кривой блеска по данным разных космических миссий, поэтому изначально мы планировали ограничиться рассмотрением простых однокомпонентных моделей, таких как степенной закон, модифицированный с учетом межзвездного поглощения. Тем не менее в процессе работы мы выяснили, что степенная модель, дающая приемлемое описание данных 2001–2003 гг. (Krauss et al., 2005; Liu et al., 2005), оказывается непригодна для более поздних наблюдений. В 2013 году, когда объект стал ярче,

²Таблицы долей потока в разных апертурах (encircled energy) доступны в документации по соответствующим камерам на сайте <https://www.stsci.edu/>.

³За исключением двух коротких (примерно 5 кс) наблюдений Chandra 2003 года, в одном из которых объект не детектировался, а во втором находился лишь чуть выше порога обнаружения.

⁴<https://www.swift.ac.uk/>

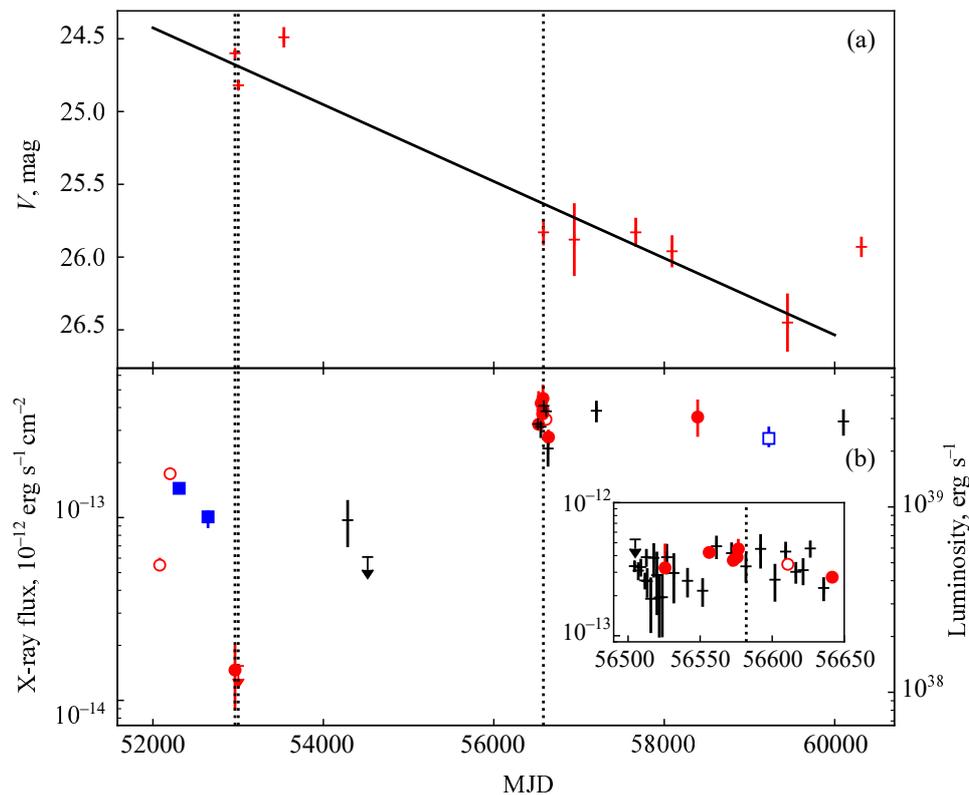


Рис. 2. Кривые блеска M74 X-1 в фильтре V вместе с аппроксимирующей ее линейной функцией (a) и в рентгеновском диапазоне 0.3–10.0 кэВ (b). Красными кружками показаны данные Chandra, синими квадратами — XMM-Newton, черными крестами — Swift (где было возможно, данные Swift бинировались с интервалом порядка 30 дней). Стрелками показаны наблюдения, для которых удалось оценить только верхний предел потока (уровень значимости 10%). Открытыми символами обозначены наблюдения, для которых на рис. 3 приведены энергетические спектры и спектры мощности. Все значения на графиках скорректированы за поглощение. Пунктирными линиями отмечены два одновременных наблюдения Chandra – HST и квазисовременное наблюдение Swift – HST, выполненное с разницей около 30 часов.

его спектры приобрели более выпуклую форму с завалом на энергиях выше 3 кэВ (см. рис. 3), хорошо описываемую моделью горячего многоцветного диска («broadened disk», Sutton et al. 2013). Поэтому в качестве компромисса было решено использовать степенную модель с экспоненциальным завалом `cutoffpl`, которая способна удовлетворительно аппроксимировать спектры обоих типов. Кроме того, мы обратили внимание, что многие спектры, особенно относящиеся к ранним наблюдениям, несмотря на приемлемое накопление, имеют сильные локальные отклонения от гладкого континуума, наиболее стабильным из которых является заметный избыток в районе 1 кэВ. Предполагая, что эти особенности могут иметь физическую природу, мы вслед за Krauss et al. (2005) добавили в модель компоненту `apex`⁵, описывающую излучение горячей плазмы, для которой варьировали только температуру, зафиксировав содержание металлов на солнечном уровне. Для учета межзвездного погло-

⁵В работе Krauss et al. (2005) использовалась сходная, но ныне устаревшая модель `mekal`.

щения применялась модель `tbabs`, лучевая концентрация водорода была ограничена снизу значением $N_{\text{H}} = 4.7 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, соответствующим поглощению в нашей Галактике (рассчитано с помощью утилиты `nh` в составе HEASoft). Таким образом, итоговая модель была `tbabs*(apex+cutoffpl)`. Для измерения непоглощенных потоков и относительного вклада компоненты `apex` использовалась конволюционная модель `cflux`.

Во всех случаях нам удалось достичь хорошего согласия данных с моделью. Наиболее важные параметры модели, статистика аппроксимации, а также измеренные рентгеновские светимости объекта приведены в таблице 1. Для выпуклых спектров яркого состояния мы получили показатель степенного закона $\Gamma \lesssim 1$ вместе с положением экспоненциального завала $E_c \simeq 2$ кэВ. Для более плоских спектров показатель оказался $\Gamma \simeq 2$, а завал вышел за границы доступного спектрального диапазона ($E_c > 10$ кэВ). Вклад излучения горячей плазмы в полный наблюдаемый поток составил от 0% до 15%, причем максимальное значение соот-

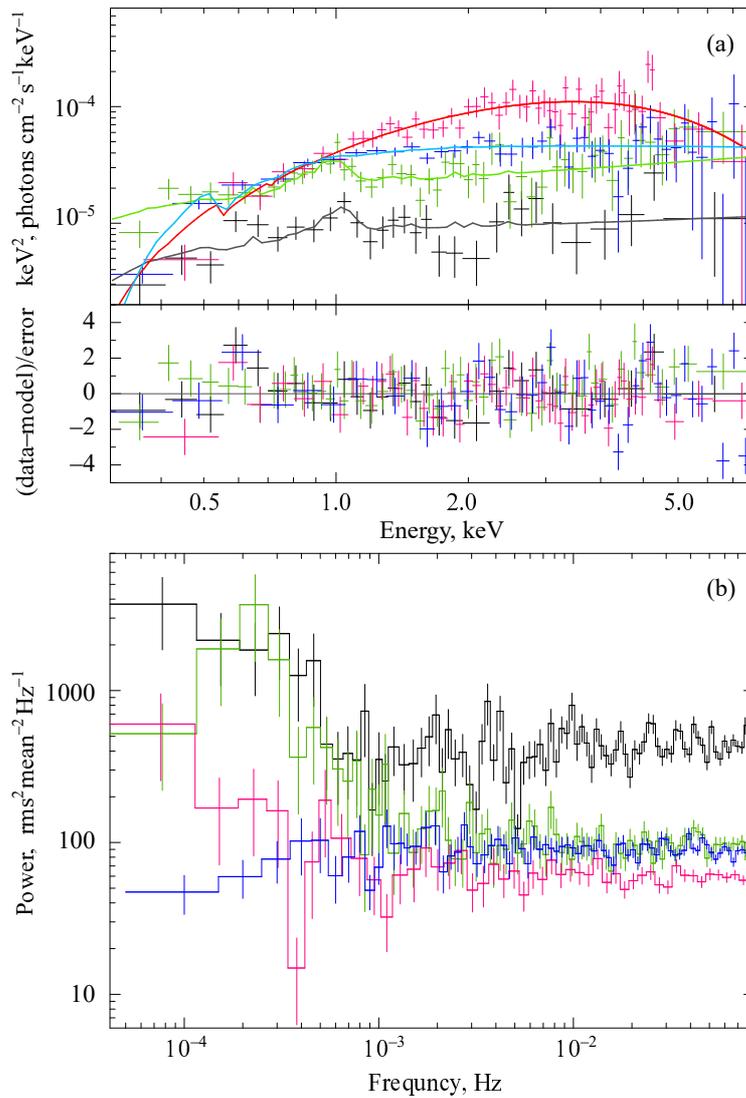


Рис. 3. Энергетические спектры (a) и спектры мощности в процентной нормировке (b) по данным рентгеновских наблюдений Chandra и XMM-Newton. Цветами показаны наблюдения: черный — ObsID 2057, зеленый — ObsID 2058, красный — ObsID 16002, синий — ObsID 0864270101 (см. таблицу 1). Спектры представлены с биннингом исключительно для наглядности, для анализа использовались исходные небинированные данные. Сплошными линиями показана аппроксимация данных моделью $tbabs*(apex+cutoffpl)$. Для построения спектров мощности использовалась программа `powspec` пакета `HEASoft`, реализующая алгоритм быстрого преобразования Фурье. Спектр мощности в процентной нормировке, будучи проинтегрированным по частотам, дает отношение стандартного отклонения скорости счета к ее среднему значению в данной области частот. Плоские участки на частотах выше 10^{-3} Гц не отражают переменность объекта, а связаны с вероятностной природой процесса регистрации квантов.

ветствует самому раннему наблюдению⁶, где спектр имел наиболее пекулярную форму (показан черным цветом на рис. 3). Температура плазмы, где вклад ее излучения был достаточно велик, чтобы это можно было измерить, оказалась близка к 1 кэВ.

⁶Используя тест отношения правдоподобия, мы оценили значимость (p-value) компоненты `apex` в наблюдениях ObsID 2057 и 2058, она составила 10% и 0.28% соответственно. Более высокая значимость, несмотря на меньший вклад компоненты во втором случае, вероятно, связана с большим числом накопленных фотонов.

Значение лучевой концентрации атомов водорода в большинстве случаев оставалось на нижней границе (поглощение в нашей Галактике), лишь в трех наблюдениях превысив его в 3–4 раза ($N_{H,max} = 1.9 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, ObsID 21000). Даже в этих случаях поправка потока за межзвездное поглощение составила не более 25%. Это говорит о том, что изменения наблюдаемого рентгеновского потока объекта не связаны с вариациями поглощения в системе.

Мы обнаружили, что изменение формы спек-

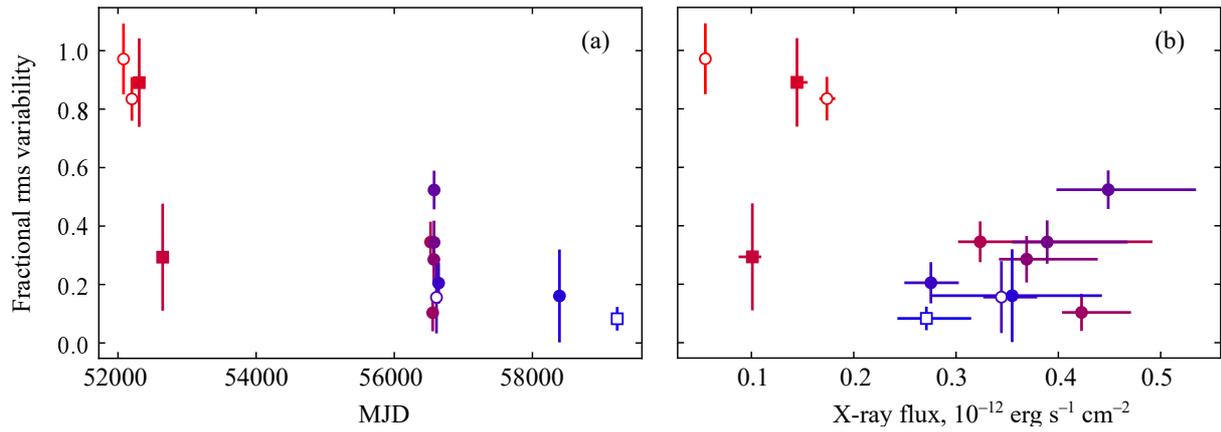


Рис. 4. Мера относительной переменности (F_{rms}) в зависимости от юлианской даты наблюдения (а) и рентгеновского потока, исправленного за поглощение (б). Кружками обозначены наблюдения Chandra, квадратами — XMM-Newton. Цвет меняется от красного к синему в соответствии с номером наблюдения в хронологическом порядке. Открытыми символами обозначены наблюдения, для которых на рис. 3 приведены спектры и спектры мощности.

тров объекта происходило согласованно с изменением характера его переменности. На рис. 4а показаны спектры двух самых ранних наблюдений (низкое состояние), один из спектров 2013 года (высокое состояние), а также спектр самого последнего наблюдения (промежуточное состояние); на рис. 4б показаны спектры мощности для тех же рядов наблюдений. Видно, что два ранних наблюдения показывают наибольшую переменность, а далее переменность ослабевает.

Для количественного сравнения мы рассчитали интегральную характеристику — меру относительной переменности F_{rms} (fractional rms variability, Vaughan et al., 2003), которая для каждого наблюдения дает отношение стандартного отклонения скорости счета к среднему значению в заданном диапазоне частот (в данном случае $[1 \times 10^{-4}; 1.6 \times 10^{-3}]$ Гц). Для этого кривые блеска перебиннировались до временного разрешения 300 с и разделялись на отрезки длиной 10 кс. Далее для каждого отрезка вычислялись индивидуальные значения F_{rms} , которые затем усреднялись. Если для данной кривой блеска получалось три или больше отрезков, вычислялась эмпирическая ошибка среднего, в противном случае рассчитывалась теоретическая ошибка F_{rms} (формула (11) в работе Vaughan et al., 2003).

Результаты анализа представлены на рис. 4, где показано, как F_{rms} менялась со временем, а также ее связь с рентгеновским потоком. На рисунке видно, что быстрая переменность была высокой только в первых трех наблюдениях, в которых и были обнаружены вспышки с периодом около 1.5 часов (Krauss et al., 2005; Liu et al., 2005). В четвертом наблюдении, проведенном примерно спустя год, переменность уже заметно ослабла, а период пропал. Эти четыре ранних наблюдения

имеют наименьшую светимость. В последующих наблюдениях источник стал ярче, но быстрая переменность так и не вернулась к прежнему уровню. В данных 2013 года и позднее светимость объекта от наблюдения к наблюдению колебалась с фактором примерно 2, в этих рядах можно заподозрить положительную корреляцию между наблюдаемым потоком и мерой относительной переменности (см. рис. 4б).

На рис. 2б показана кривая блеска M 74 X-1, построенная по всем имеющимся рентгеновским данным. Для наблюдения ObsID 4753 (таблица 1), в котором от объекта было зарегистрировано лишь 11 фотонов, мы использовали модель и параметры предыдущего наблюдения (ObsID 0154350201), подгоняя только нормировку. Для наблюдения ObsID 4753, в котором объект оказался еще слабее, мы оценили только верхний предел потока, используя коэффициент пересчета скорости счета в потоки 1.1×10^{-11} эрг с⁻¹ на 1 фотон с⁻¹, полученный из спектрального анализа наблюдений Chandra. Чтобы определить аналогичный коэффициент для данных Swift, экстрагировали единый спектр из всех наблюдений 2013 года и провели его спектральный анализ, используя ту же спектральную модель. Параметры получились типичными для спектров яркого состояния, полученный коэффициент 5.0×10^{-11} эрг с⁻¹ на 1 фотон с⁻¹.

На долговременной кривой блеска видно, что в интервале 2001–2010 г. светимость источника в среднем держалась на уровне чуть ниже 1.0×10^{39} эрг с⁻¹, за исключением двух наблюдений Chandra, выполненных в конце 2005 года с интервалом около месяца, в которых светимость оказалась $L_X \lesssim 10^{38}$ эрг с⁻¹. Экспозиции в этих

наблюдения составляли всего около 5 кс, поэтому нельзя исключать, что оба наблюдения случайным образом попали в интервалы между вспышками объекта, аналогичными тем, что наблюдал Liu et al. (2005), и не являются частью одного продолжительного минимума в кривой блеска. Данные 2013 г. и последующие наблюдения продемонстрировали переход объекта в более стабильное состояние со светимостями в диапазоне $L_X \approx (2-4) \times 10^{39}$ эрг с⁻¹.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Имеющиеся в архивах наблюдательные данные, а также проведенное нами однозначное оптическое отождествление M74 X-1 позволили нам проследить эволюцию этого ультраяркого рентгеновского источника в двух диапазонах энергий за более чем двадцатилетний период. Полученные результаты показывают, что объект является довольно нетипичным представителем популяции ULX. Мы не нашли в литературе упоминаний о других источниках с подобным длительным и близким к линейному падением блеска со временем, амплитуда которого составила почти две звездных величины в полосе V , что является, пожалуй, наиболее интересным результатом нашей работы. При этом в рентгеновском диапазоне похожего тренда нет: в ранних наблюдениях 2001–2003 годов объект имел сравнительно низкие усредненные по времени экспозиций светимости, около $L_X \lesssim 10^{39}$ эрг с⁻¹; в 2013 году светимость достигла максимума — $L_X \approx 4 \times 10^{39}$ эрг с⁻¹, а в последующих наблюдениях вновь снизилась до $L_X \approx 2.5 \times 10^{39}$ эрг с⁻¹.

Стоит упомянуть, что схожие квазилинейные участки наблюдаются в кривых блеска некоторых сверхновых спустя годы после вспышки (Leibundgut and Suntzeff, 2003, а также ссылки в ней). В то же время представляется маловероятным, что оптическая переменность X-1 может быть связана с недавней вспышкой сверхновой, которая, судя по текущему блеску объекта, должна была произойти на рубеже XX/XXI веков, но при этом была пропущена наблюдателями. Кроме того, поведение источника в рентгеновском диапазоне на протяжении двух десятилетий совершенно не характерно для сверхновых, следовательно высокие рентгеновские светимости должны обеспечиваться сверх- или околоэддингтоновской аккрецией на компактный объект в двойной системе.

Альтернативной причиной ослабления блеска может являться крупный выброс вещества из системы. Он мог произойти в 2003 году и привести к резкому ослаблению рентгеновского потока в этот период и, возможно, стал причиной уменьшения

стохастической переменности и исчезновения полурочасового квазипериода. По мере расширения сброшенной оболочки и ее удаления от системы в ней могла начаться конденсация пыли, что и привело бы к наблюдаемому изменению яркости источника в оптическом диапазоне. Однако против данной идеи свидетельствуют слабо меняющийся цвет объекта $V - I_c$ и относительно низкие значения лучевой концентрации водорода N_H (менее 2×10^{21} см⁻², что соответствует поглощению в оптическом диапазоне⁷ $A_V < 0.^m9$), не показывающие явные систематические изменения со временем.

Более правдоподобное объяснение поведения M74 X-1, на наш взгляд, связано с облучением поверхности звезды-донора жестким излучением прецессирующего аккреционного диска, в случае если прогретая звезда является основным источником излучения в оптическом диапазоне. Отметим, что угол между осью прецессирующего диска и нормалью к плоскости орбиты двойной системы может достигать достаточно больших значений, например, в случае известного Галактического сверхаккретора SS 433 он составляет $20^\circ \circ 9$ (Eikenberry et al., 2001). Если работает этот сценарий, то угол, под которым земной наблюдатель видит аккреционный диск, будет меняться в зависимости от прецессионной фазы, что приведет к изменению яркости объекта в рентгеновском диапазоне. В то же время с поверхности звезды-донора диск будет виден под совершенно другими углами при тех же прецессионных фазах, что приведет к соответствующему изменению эффективности нагрева, а следовательно, и оптической светимости системы. При этом в зависимости от геометрии системы такие изменения могут проходить и в противофазе: например, если диск наклоняется в сторону наблюдателя, отворачиваясь при этом от звезды, то будет регистрироваться увеличение рентгеновского потока и ослабление оптического. Возможно, именно с этим связана антикорреляция между рентгеновскими и оптическими потоками в имеющихся (квази-) одновременных наблюдениях M74 X-1 (отмечены вертикальными линиями на рис. 2). Подобный механизм предлагается рядом авторов для объяснения орбитальных кривых блеска и суперорбитальных вариаций яркости (с периодом более 1500 дней) ультраяркого рентгеновского пульсара NGC 7793 P13 (см. Motch et al., 2014; Fürst et al., 2018; Vinokurov et al., 2024).

С изменением наклона диска, а также истекающего с его поверхности ветра, в результате прецессионного движения может быть связано и

⁷Для конвертации использовано соотношение $A_V = 4.5 \times 10^{-22} N_H$ из работы Gorenstein (1975).

уменьшение амплитуды квазипериодической переменности с ростом светимости объекта (вплоть до ее полного исчезновения), обнаруженное нами по данным Chandra и XMM-Newton 2013–2021 гг. Согласно Middleton et al. (2011), при больших наклонах диска к лучу зрения и, соответственно, более низких наблюдаемых рентгеновских светимостях, переменность, похожая на вспышечную активность, может быть обусловлена экранированием центральных областей диска облаками ветра. Этот же механизм предсказывает увеличение жесткости спектра во вспышках, что также наблюдается в ранних наблюдениях M 74 X-1, в которых амплитуда вспышек максимальна (Krauss et al., 2005). Наконец, уменьшение вклада компоненты арес в ярком состоянии, по-видимому описывающей неразрешенные эмиссионные особенности в спектрах X-1, должно происходить при малых углах наклона диска (Pinto et al., 2017). Однако, несмотря на то, что предположение о прецессии аккреционного диска, а также о доминировании прогреваемого рентгеновским излучением донора в оптическом излучении двойной системы видится перспективным в случае M 74 X-1, его подтверждение, вероятно, потребует дальнейших наблюдений источника.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 21-72-10167 «Ультраяркие рентгеновские источники: ветер и доноры»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Atapin, S. Fabrika, and M. D. Caballero-García, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (2), 2766 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1027
2. K. Atapin, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, et al., arXiv e-prints arXiv:2011.00795 (2020). DOI:10.48550/arXiv.2011.00795
3. M. Bachetti, F. A. Harrison, D. J. Walton, et al., *Nature* **514** (7521), 202 (2014). DOI:10.1038/nature13791
4. M. Bachetti, V. Rana, D. J. Walton, et al., *Astrophys. J.* **778** (2), article id. 163 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/778/2/163
5. T. M. Belloni and L. Stella, *Space Science Reviews* **183** (1-4), 43 (2014). DOI:10.1007/s11214-014-0076-0
6. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657

7. S. Carpano, F. Haberl, C. Maitra, and G. Vasilopoulos, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), L45 (2018). DOI:10.1093/mnras/sly030
8. E. J. M. Colbert and R. F. Mushotzky, *Astrophys. J.* **519** (1), 89 (1999). DOI:10.1086/307356
9. H. P. Earnshaw, T. P. Roberts, M. J. Middleton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (4), 5554 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty3403
10. S. S. Eikenberry, P. B. Cameron, B. W. Fierce, et al., *Astrophys. J.* **561** (2), 1027 (2001). DOI:10.1086/323380
11. S. N. Fabrika, K. E. Atapin, A. S. Vinokurov, and O. N. Sholukhova, *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 6 (2021). DOI:10.1134/S1990341321010077
12. H. Feng and P. Kaaret, *Astrophys. J.* **675** (2), 1067 (2008). DOI:10.1086/527353
13. F. Fürst, D. J. Walton, F. A. Harrison, et al., *Astrophys. J.* **831** (2), article id. L14 (2016). DOI:10.3847/2041-8205/831/2/L14
14. F. Fürst, D. J. Walton, M. Heida, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A186 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833292
15. J. C. Gladstone, C. Copperwheat, C. O. Heinke, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **206** (2), article id. 14 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/206/2/14
16. J. C. Gladstone, T. P. Roberts, and C. Done, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **397** (4), 1836 (2009). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.15123.x
17. P. Gorenstein, *Astrophys. J.* **198**, 95 (1975). DOI:10.1086/153579
18. F. Grisé, P. Kaaret, S. Corbel, et al., *Astrophys. J.* **745** (2), article id. 123 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/745/2/123
19. G. L. Israel, A. Belfiore, L. Stella, et al., *Science* **355** (6327), 817 (2017). DOI:10.1126/science.aai8635
20. P. Kaaret and S. Corbel, *Astrophys. J.* **697** (1), 950 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/697/1/950
21. A. King, J.-P. Lasota, and M. Middleton, *New Astronomy Reviews* **96**, 101672 (2023). DOI:10.1016/j.newar.2022.101672
22. M. I. Krauss, R. E. Kilgard, M. R. Garcia, et al., *Astrophys. J.* **630** (1), 228 (2005). DOI:10.1086/431784
23. B. Leibundgut and N. B. Suntzeff, arXiv e-prints astro-ph/0304112 (2003). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0304112
24. J. Liu, J. N. Bregman, and J. E. McClintock, *Astrophys. J.* **690** (1), L39 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/690/1/L39
25. J.-F. Liu, J. N. Bregman, E. Lloyd-Davies, et al., *Astrophys. J.* **621** (1), L17 (2005). DOI:10.1086/428902
26. W. Luangtip, T. P. Roberts, and C. Done, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460** (4), 4417 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1282

27. M. J. Middleton, T. P. Roberts, C. Done, and F. E. Jackson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **411** (1), 644 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.17712.x
28. C. Motch, M. W. Pakull, R. Soria, et al., *Nature* **514** (7521), 198 (2014). DOI:10.1038/nature13730
29. C. Pinto, W. Alston, R. Soria, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468** (3), 2865 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx641
30. F. Pintore, L. Zampieri, A. Wolter, and T. Belloni, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (4), 3461 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu195
31. G. A. Rodríguez Castillo, G. L. Israel, A. Belfiore, et al., *Astrophys. J.* **895** (1), id. 60 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab8a44
32. E. Sabbi, D. Calzetti, L. Ubeda, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235** (1), article id. 23 (2018). DOI:10.3847/1538-4365/aaa8e5
33. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 103 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/103
34. M. Shidatsu, Y. Ueda, and S. Fabrika, *Astrophys. J.* **839** (1), article id. 46 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa67e7
35. X. Song, D. J. Walton, G. B. Lansbury, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (1), 1260 (2020). DOI:10.1093/mnras/stz3036
36. R. Soria, K. D. Kuntz, P. F. Winkler, et al., *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 152 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/750/2/152
37. A. D. Sutton, T. P. Roberts, and M. J. Middleton, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (2), 1758 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt1419
38. L. Tao, H. Feng, F. Grisé, and P. Kaaret, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 81 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/81
39. L. Tao, P. Kaaret, H. Feng, and F. Grisé, *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 110 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/750/2/110
40. H. Tranin, N. Webb, and O. Godet, *Astron. and Astrophys.* **681**, id. A16 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202244952
41. S. Vaughan, R. Edelson, R. S. Warwick, and P. Uttley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **345** (4), 1271 (2003). DOI:10.1046/j.1365-2966.2003.07042.x
42. V. A. Villar, E. Berger, R. Chornock, et al., *Astrophys. J.* **830** (1), article id. 11 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/830/1/11
43. A. Vinokurov, K. Atapin, and Y. Solovyeva, *Astrophys. J.* **893** (2), id. L28 (2020a). DOI:10.3847/2041-8213/ab8642
44. A. Vinokurov, K. Atapin, Y. Solovyeva, et al., 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. 95–99 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020). DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_95
45. A. Vinokurov, K. Atapin, and Yu. Solovyeva, *Astrophysical Bulletin* **79** (3), 399 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600558
46. D. J. Walton, F. Fürst, M. Heida, et al., *Astrophys. J.* **856** (2), article id. 128 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aab610
47. D. J. Walton, F. A. Harrison, B. W. Grefenstette, et al., *Astrophys. J.* **793** (1), article id. 21 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/793/1/21
48. D. J. Walton, A. D. A. Mackenzie, H. Gully, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **509** (2), 1587 (2022). DOI:10.1093/mnras/stab3001
49. L. Yang, H. Feng, and P. Kaaret, *Astrophys. J.* **733** (2), article id. 118 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/733/2/118

Variability of the Ultra-Luminous X-ray Source M 74 X-1 in X-ray and Optical Ranges

A. S. Vinokurov¹, K. E. Atapin², Yu. N. Solovyeva¹, and A. N. Sarkisyan¹

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

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

Using observations of M 74 X-1 obtained with the Chandra X-ray Observatory and the Hubble Space Telescope, we identified this source in the optical range. Analysis of other archival data allowed us to track the evolution of M 74 X-1 over two decades of observations, as well as to search for a correlation of the object's variability in the X-ray and optical ranges based on several available quasi-simultaneous observations. As a result, we revealed an approximately linear decrease of the object brightness by about 1^m9 in the V band in the time range 2005–2021, which is atypical for most ultra-luminous X-ray sources, and, presumably, is not caused by a change in the X-ray luminosity of the object. At the same time, we found changes in the nature of the short-term X-ray variability of M 74 X-1: by 2021, the stochastic variability of the object decreased and the quasi-periodic oscillations on a timescale of about 1.5 hours seen in observations of 2001–2002 disappeared.

Keywords: *stars: fundamental parameters—stars: mass-loss—stars: winds—outflows—X-rays: binaries*