

УДК 524.33

V404 Cyg/GS 2023+338: МОНИТОРИНГ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ТЕЛЕСКОПАХ-РОБОТАХ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МАСТЕР ВО ВРЕМЯ СУПЕРВСПЫШКИ 2015 г.[#]

© 2019 г. В. М. Липунов^{1,2*}, А. С. Кузнецов¹, Е. С. Горбовской¹, В. Г. Корнилов¹, Н. В. Тюрина¹, В. В. Владимиров¹, В. В. Крушинский³, И. С. Заложных³, Д. М. Власенко^{1,2}, Д. С. Зимнухов¹, П. В. Балануца¹, А. Габович^{1,4}, Н. И. Шакура¹, Ф. Джованелли⁵, Л. Г. Титарчук^{1,6}, Д. А. Х. Бакли⁷, О. Гресс^{1,8}, Н. Буднев⁸, Р. Реболо⁹, М. Сьерра-Рикарт⁸, А. Г. Тлатов¹⁰, В. А. Сеник¹, В. В. Юрков¹⁰, О. Ершова⁷, В. Г. Гриншпун², Ю. В. Ишмухаметова⁸

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва, Россия

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Коуровская
астрономическая обсерватория им. К.А. Бархатовой, Екатеринбург, Россия

⁴Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, Россия

⁵Institute Nazionale di astrofisica, Roma, Italy

⁶Ferrara University, Ferrara, Italy

⁷South African Astronomical Observatory (SAAO), South Africa

⁸Иркутский государственный университет, Институт прикладной физики, Иркутск, Россия

⁹Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife, Spain

¹⁰Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Кисловодская горная астрономическая станция, Кисловодск, Россия

Поступила в редакцию 15.02.2019 г.; после доработки 27.02.2019 г.; принята к публикации 28.02.2019 г.

В статье представлены 2070 уникальных однородных фотометрических и поляризационных данных наблюдений микроквара в двойной системе с черной дырой V404 Cyg/GS2023+338, полученные в 2015 г. Глобальной сетью телескопов-роботов МАСТЕР (16 роботизированных телескопов, расположенных в 8 точках земного шара в России, Испании, ЮАР, Аргентине). МАСТЕР был первым телескопом, который навелся и начал оптические наблюдения микроквара после его вспышки в гамма-диапазоне в 2015. Наблюдения проводились с 18h 34m 09s UT 15 июня 2015 г. до декабря 2015 г. в четырех поляризациях и в четырех стандартных фильтрах BVRI. В настоящей работе мы представляем результаты этих наблюдений и проводим сравнительный анализ оптических и рентгеновских данных. Наши наблюдения подтверждают обнаруженные ранее сверхдлинные задержки оптического излучения по отношению к вспышкам в рентгеновском диапазоне. Мы обсуждаем механизмы, вызывающие запаздывание вариаций оптического излучения относительно вариаций рентгеновского излучения. Мы подтверждаем обнаруженную и опубликованную нами ранее переменную поляризацию оптического излучения и сообщаем еще об одном аналогичном эпизоде.

DOI: 10.1134/S0004629919070053

1. ВВЕДЕНИЕ

В июне и декабре 2015 г. были зарегистрированы рентгеновские и оптические вспышки двойной системы с черной дырой V404 Cyg/GS2023+338 [1–4].

Рентгеновская Новая GS 2023+338 была от-

*E-mail: lipunov2007@gmail.com

[#]К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.1134/S0004629919070053.

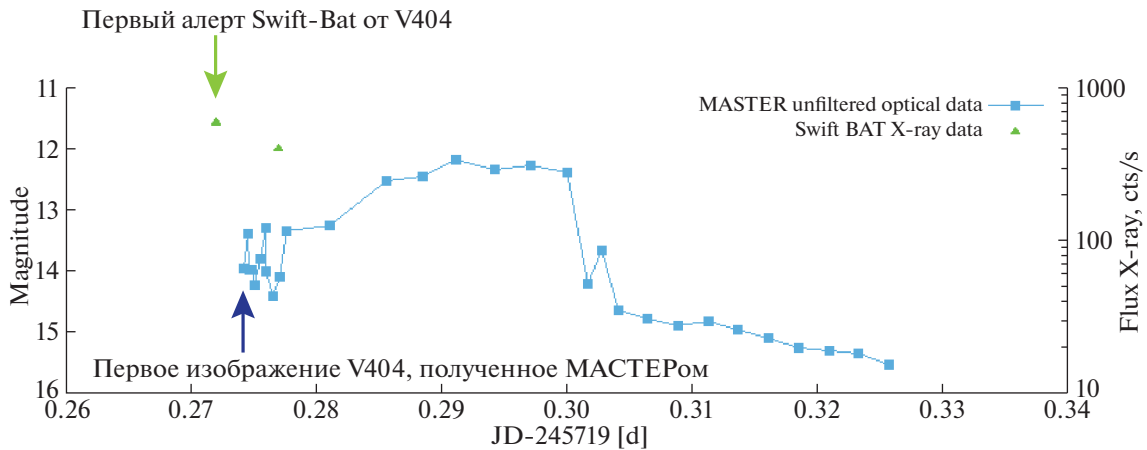


Рис. 1. Кривая блеска V404 Cyg, полученная в первые секунды после сообщения КА Swift о рентгеновской активности в автоматическом режиме телескопами-роботами MASTER-Ural и MASTER-Tunka в июне 2015 г. Точки Swift-BAT приведены для энергетического диапазона 15–50 кэВ (подробнее см. <https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/643949.swift> и [2]).

крыта 22 мая 1989 г. на рентгеновском спутнике Ginga [5]. Она была довольно быстро отождествлена с переменной звездой V404 Cyg, которая до этого вспыхивала на 7 звездных величин в оптическом диапазоне в 1938 г. [6, 7]. Сейчас надежно установлено [8], что двойная система состоит из звезды-гиганта старше Солнца, имеющей меньшую массу $0.7 \pm 0.25 M_{\odot}$ КЗ III, и кандидата в черные дыры. Предполагается, что раз в несколько десятков лет оптический компаньон сбрасывает на черную дыру часть вещества ($\approx 3 \times 10^{-8} M_{\odot}$ [9]), которое, разогреваясь в аккреционном диске до сотен миллионов градусов, производит рентгеновское излучение. Обнаружение нетеплового радио- и мягкого гамма-излучения [10], характерного для квазаров (в миллионы раз более мощных и более массивных черных дыр, расположенных в ядрах галактик) позволило назвать эту черную дыру микроквазаром, выбрасывающим релятивистские потоки частиц в виде джетов.

15 июня 2015 г. космическая обсерватория Swift обнаружила, что один из самых надежных кандидатов в черные дыры в нашей Галактике: система V404 Cyg, спустя 25 лет опять находится в активной фазе в рентгеновском диапазоне [2]. Оптические телескопы-роботы Глобальной сети MASTER [1], расположенные вблизи озера Байкал (MASTER-Tunka) и на Урале (MASTER-Ural), получили сигнал (alert) от космической обсерватории Swift и через 22 с первыми в мире приступили к наблюдениям за рентгеновской вспышкой [3, 4]. Это позволило нам всего через 150 с после детектирования (время срабатывания триггера Swift-BAT 2015-06-15 18:31:38 UT [2], время рассылки notice time 18:33:47 UT, время начала наблюдений телескопами MASTER 18:34:09 UT) на Swift-BAT

в жестком рентгеновском диапазоне зарегистрировать яркую оптическую вспышку 14 звездной величины [4] (рис. 1). Позже к наблюдениям в различных диапазонах приступили десятки телескопов (см., напр., [9, 11–19]). В последующие несколько недель телескопы-роботы MASTER-Tunka, -Урал, -Кисловодск, -IAC, -SAAO осуществили несколько десятков алертных наведений [3, 4].

Сообщение о новой вспышке V404 Cyg зимой 2015 г. было получено телескопами-роботами MASTER 2015-12-23 05:19:52 UT (Swift триггер 668097) [19]. MASTER-Амур и MASTER-Tunka автоматически начали наблюдения сразу после захода Солнца (в 2015-12-23 09:14:02 UT в Благовещенске [20], и в 2015-12-23 10:16:20 на Байкале [21]). Микроквазар V404 Cyg обнаружен в ярком состоянии $m \sim 17^m$ в белом свете (MASTER $W = 0.2B + 0.8R$ по USNO-B1 B2,R2/B1,R1). 24 декабря наблюдения микроквазара были проведены в Крыму на телескопе MASTER-Таврида.

31 декабря 2015 г. MASTER-Амур [22], MASTER-Tunka и MASTER-Кисловодск наводились и проводили наблюдения по триггерам Swift 668877 и 668879 [23, 24] (табл. 2, 4, 5 в электронном приложении к статье).

2. НАБЛЮДЕНИЯ V404 CYG НА ТЕЛЕСКОПАХ-РОБОТАХ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ MASTER И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Глобальная сеть телескопов-роботов MASTER¹ МГУ представляет собой распределенную по 4 континентам сеть идентичных 40 сантиметровых

¹<http://observ.pereplet.ru>

телескопов-роботов [1], оснащенных фотометрами [25–27], позволяющими проводить фотометрические W , B , V , R , I [28, 29] и поляризационные наблюдения [4]. Как правило, сеть МАСТЕР при получении алертов из сети GCN [30, 31] осуществляет поляризационные наблюдения гамма-всплесков [32, 33].

Каждая обсерватория сети МАСТЕР имеет два телескопа, установленных на одной монтировке, с двумя взаимно перпендикулярными поляроидами [1, 4, 27, 32]. Поляроиды в близлежащих по долготе обсерваториях повернуты на 45° друг относительно друга [4]. Регистрация разности потоков для одного и того же объекта между двумя телескопами на одной обсерватории дает нижний предел степени поляризации объекта, в то время как измерения с двух разных обсерваторий в 4-х углах поляризатора могут использоваться для определения параметров Стокса Q и U [4].

Следует подчеркнуть, что в направлении V404 Cyg имеется довольно сильная поляризация, которая возникает при рассеянии на галактической пыли, выстраивающейся поперек галактического магнитного поля. Как было упомянуто в самых первых телеграммах, сообщающих о наблюдениях новой активности микроквара, значение поляризации V404 Cyg составляет $\sim 8\%$ в оптическом диапазоне длин волн ($BVRI$ в [34], R -band в [35, 36]). В результате наших наблюдений (несколько тысяч фотометрических точек для кривой блеска) нам удалось обнаружить не только постоянную часть в самые ранние моменты оптических наблюдений, но и в ряде случаев получить свидетельства наличия переменной части поляризации в некоторые моменты [4].

Так как наблюдения проводились преимущественно в автоматическом режиме со стандартной для сети МАСТЕР экспозицией 180 с, то на части кадров объект пересвечен, такие данные были удалены из выборки. Для калибровок использовались кадры, полученные вечером перед началом наблюдений. Кадры плоского поля получались во время утренней зари. Калибровка и астрометрическая привязка осуществлялись на каждой из обсерваторий сети в автоматическом режиме. Для фотометрии использовалась область размером 15×15 угловых минут. Для фотометрической привязки использовалась 21 близлежащая опорная звезда.

2.1. Наблюдения декабря 2015 г.

Сообщение о новой вспышке V404 Cyg [23, 24] было распространено по GCN и получено телескопами Глобальной сети МАСТЕР 23 декабря 2015 г. в 05:19:52.40 UT — ближайšie по времени наступления ночи обсерватории МАСТЕР

в Благовещенске (закат в момент алерта) и в Тунке (день в момент алерта). Телескопы-роботы МАСТЕР-Амур и МАСТЕР-Тунка начали наблюдения V404 Cyg через 14 050 с после Swift триггера 668097 в 2015-12-23 09:14:02 UT в Благовещенске [20] и через 17787 с в 2015-12-23 10:16:20 в Тунке [21]. На каждой обсерватории наблюдения производились сразу после захода Солнца. Микрокварз V404 Cyg был обнаружен в ярком состоянии $\sim 17^m$ в белом свете (значения МАСТЕР $W = 0.2B + 0.8R$ откалиброваны по R2,B2/R1,B1 значениям USNO-B1).

23, 24 и 26 декабря алертные наблюдения прошли на обсерваториях МАСТЕР-Тунка (табл. 2 в электронном приложении к статье), МАСТЕР-Амур (табл. 5 в электронном приложении к статье) и МАСТЕР-Таврида (табл. 8 в электронном приложении к статье). Регулярные наблюдения были прерваны вторым гравитационно-волновым алертом LIGO G211117/GW151226 27 декабря [37–42], однако автоматически мы проводили наблюдения также 28 и 29 декабря (между инспектированием гравитационно-волновых полей ошибок).

30 и 31 декабря 2015 г. для V404 Cyg был вновь получен алерт с космической обсерватории Swift [23, 24]. МАСТЕР-Амур (сразу после захода солнца), МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-Кисловодск наводились по 668877 и 668879 триггерам Swift [23, 24], краткие результаты были опубликованы в циркуляре [22]. В результате обнаружено, что V404 Cyg находится в существенно более ярком состоянии: в течение первого часа наблюдения объект поярчал до 14.4 звездной величины. Фотометрия алертных наблюдений с телескопов МАСТЕР-Тунка (табл. 2), МАСТЕР-Кисловодск (табл. 4), МАСТЕР-Амур (табл. 5) приводится в электронном приложении. В связи с инспектированием больших полей ошибок гравитационно-волнового алерта LIGO G211117 [37–42] систематический алертный мониторинг V404 Cyg на телескопах Глобальной сети МАСТЕР был прекращен.

2.2. Фотометрия

Фотометрия объекта и близких звезд сравнения выполнялась в IRAF/apphot [4]. Использовалась апертура $\sim 0.8 \cdot FWHM$. Полученные для каждого фильтра данные корректировались в пакете Astrokitt [43], для минимизации стандартного отклонения ансамбля звезд сравнения.

Данные, полученные на разных телескопах сети МАСТЕР с использованием поляроидов, позволили отобрать среди звезд сравнения звезды с низким уровнем поляризации. Эти звезды были использованы в качестве опорных для определения поляризации V404 Cyg. Полученное нами значение

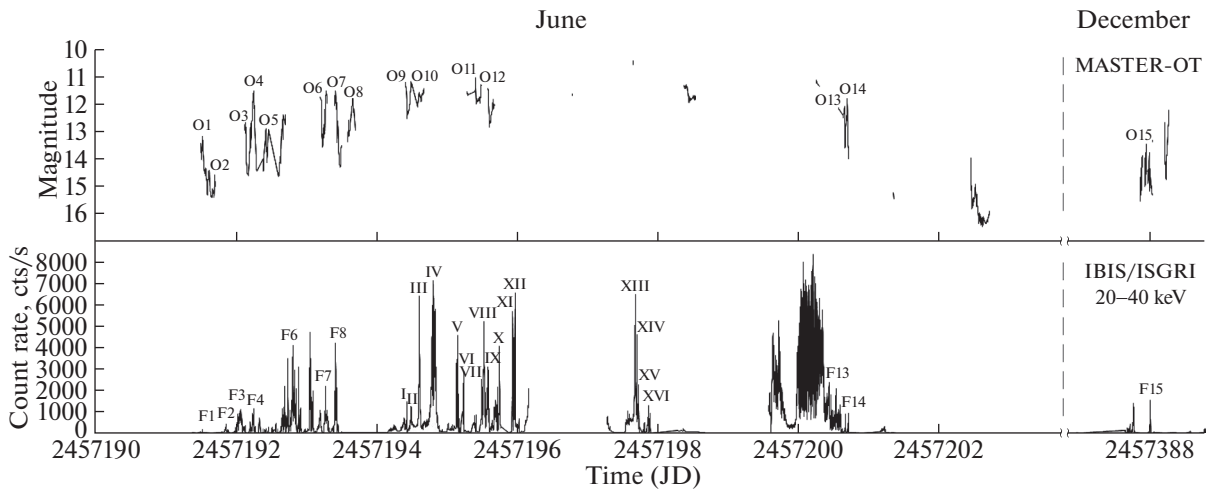


Рис. 2. Кривая блеска V404 Cyg по данным сети МАСТЕР и космической обсерватории INTEGRAL (IBIS/ISGR, INTEGRAL Science Data Centre [44, 45]). Наблюдения производились в две эпохи (июнь и декабрь 2015 г.). Результаты фотометрии сети МАСТЕР приведены в белом свете (W).

поляризации V404 $10 \pm 3\%$ согласуется с другими авторами [36]². На рис. 2 показаны 14 зарегистрированных нами оптических вспышек, которые обозначены как O1–O14. Также мы обнаружили 11 подобных вспышек в рентгеновских наблюдениях космической обсерватории INTEGRAL³ [44, 45], которые совпадают с оптическими вспышками. Однако три оптических вспышки, а именно O1, O2 и O9, не имеют рентгеновских аналогов.

Для коррелированных (между оптикой и рентгеном) вспышек нами были изучены временные задержки. Стоит отметить, что в [46] уже обнаруживали задержки в оптических вспышках O9, O10, O11 и O12 по сравнению с рентгеновскими вспышками, обозначенными I, II, VII и IX на рис. 2.

На рис. 3 изображены одиннадцать одновременных рентгеновских и оптических вспышек. Мы используем рентгеновские данные в диапазоне энергий 20–40 кэВ.

Кроме того, здесь стоит отметить, что очень близко ($\sim 1.4''$) к объекту V404 Cyg имеется слабая звезда поля ($V = 18.9$) [47]. Телескопы МАСТЕР имеют масштаб $1.79''/\text{пиксель}$, и эта звезда поля определенно попадает в нашу апертуру. Тем не менее, как видно из рис. 3, в течение периода наблюдения V404 Cyg никогда не становится слабее 15m. Это означает, что даже в самом слабом (за период наблюдения) состоянии объект V404 Cyg по крайней мере в 40 раз ярче этой звезды поля. Поэтому мы пренебрегаем ее влиянием на наши результаты.

²Тут мы добавляем 2% систематической ошибки, см. ниже.

³<http://www.isdc.unige.ch/integral/analysis#QLAsources>

2.3. Задержка между оптическим и рентгеновским излучением

Как видно из рис. 3, в определенные эпохи наблюдается задержка между оптической и рентгеновской кривой блеска. Изменения оптического потока следуют за изменениями потока рентгеновского излучения. Для изучения такого рода задержек удобно рассмотреть эпизоды со вспышками.

Мы используем только вспышки, для которых имеются синхронные рентгеновские (INTEGRAL) и оптические (сеть МАСТЕР) данные. В общей сложности мы определили одиннадцать эпизодов, для которых такие временные задержки могут быть измерены. Детали всех одиннадцати эпизодов (O3–O7 и O9–O14 на рис. 2), которые мы будем использовать, перечислены в табл. 1.

Чтобы оценить значение временной задержки между оптическим и рентгеновским потоками для каждого вспышечного эпизода, мы вычисляем корреляционные функции между рентгеновскими и оптическими данными. В последующих расчетах мы будем использовать линейную интерполяцию кривой блеска, поэтому будем рассматривать только те эпизоды, в которых имеются непрерывные рентгеновские и оптические данные во время вспышек. Мы будем использовать корреляционную функцию для взаимного анализа двух кривых блеска. Временная задержка, соответствующая максимуму корреляционной функции, будет наиболее вероятной временной задержкой между рентгеновскими и оптическими данными. Поскольку целью исследования является определение только задержки между рентгеновским и оптическим излучением, само значение корреляционной функции в максимуме не представляет особого интереса, поэтому

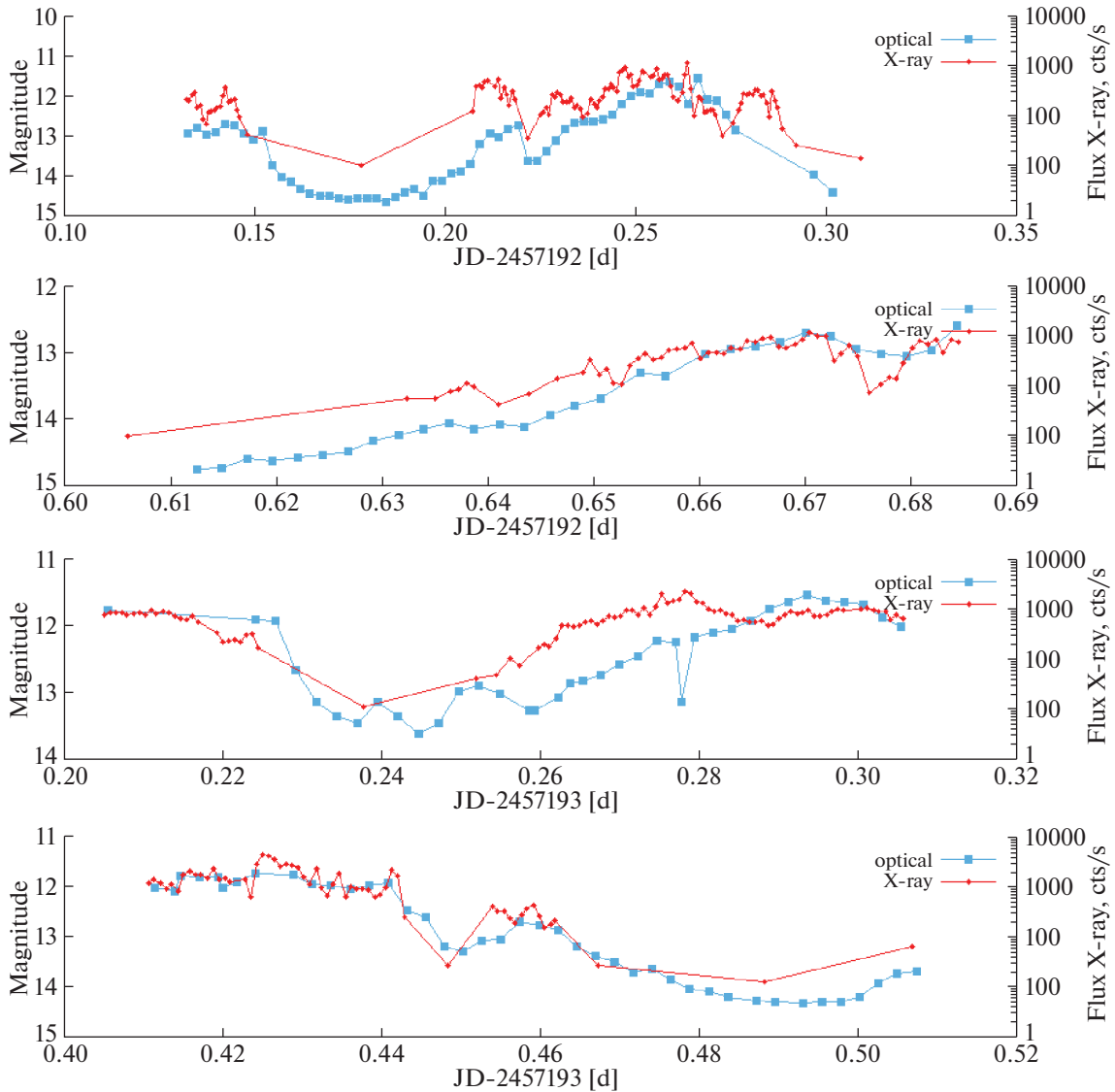


Рис. 3. Кривые блеска 11 синхронных вспышек рентгеновского и оптического излучения. Красные точки — рентгеновские данные INTEGRAL (20–40 кэВ), синие квадратики — оптические данные, полученные телескопами Глобальной сети МАСТЕР.

мы не будем принимать во внимание нормализацию корреляционной функции в целом.

Чтобы вычислить временную задержку, мы использовали следующую формулу для взаимной корреляции двух наборов данных:

$$K(\varepsilon) = \frac{1}{N} \int_{t_{\text{start}} - \varepsilon}^{t_{\text{finish}} - \varepsilon} y_1(t_x) y_2(t_x) dt_x, \quad (1)$$

где N — количество парных точек из разных массивов; ε — время запаздывания; $y_1(t)$, $y_2(t)$ — два массива данных, зависящих от времени; t_{start} и t_{finish} — соответственно времена начала и окончания вспышки. Так как в нашем случае за время одной экспозиции в оптическом диапазоне полу-

чены несколько значений (по времени) в гамма-диапазоне, то необходимо усреднить эти точки в одну:

$$y_2(t_x) = \left(\frac{\sum_{t=(t_x-90)}^{t_x+90} y_\gamma(t)}{n(t_x-90, t_x+90)} \right). \quad (2)$$

Также для увеличения точности каждую точку необходимо нормировать на нулевой уровень блеска в рентгене и в гамма. Как итог, все вспышки

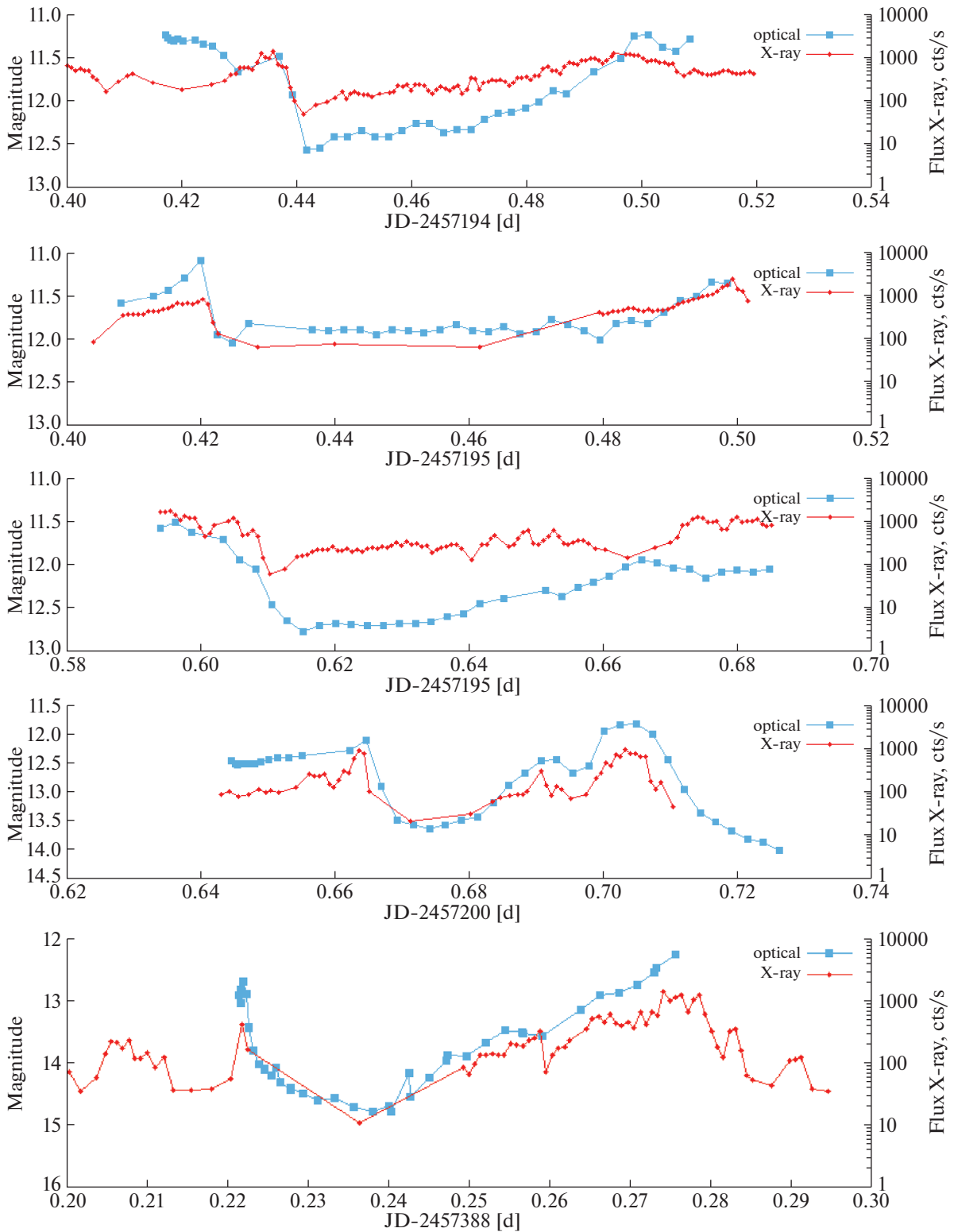


Рис. 3. Окончание.

обрабатывались по следующей формуле:

$$K(\varepsilon) = \frac{1}{N} \int_{t_{\text{start}} - \varepsilon}^{t_{\text{finish}} - \varepsilon} (y_0(t_x) - \bar{y}_0) \times \left(\frac{\sum_{t=(t_x-90)}^{t_x+90} (y_\gamma(t) - \bar{y}_\gamma)}{n(t_x - 90, t_x + 90)} \right) dt_x, \quad (3)$$

Таблица 1. Временная задержка между оптическим и рентгеновским событиями в июне 2015 г. и соответствующий ей орбитальный период V404 Cyg

Событие	Время начала, JD	Время окончания, JD	Временная задержка ^a , с	Ошибка задержки ^b , с	Орбитальная фаза
O3	2457192.20180	2457192.27582	463	90	0.68
O4	2457192.43367	2457192.44253	153	68	0.71
O5	2457192.61250	2457192.68402	-12	90	0.74
O6	2457193.23712	2457193.30505	1507	84	0.84
O7	2457193.41121	2457193.50707	34	87	0.86
O9	2457194.42741	2457194.44379	8	186	0.02
O10	2457194.46551	2457194.50805	263	90	0.02
O11	2457195.40562	2457195.50537	-61	66	0.18
O12	2457195.59382	2457195.61970	-35	139	0.20
O13	2457200.64412	2457200.66900	-33	59	0.98
O14	2457200.67877	2457200.72596	-83	90	0.98
O15	2457387.93431	2457388.04285	232	157	0.68

^a Задержка оптического излучения относительно рентгеновского в секундах.

^b Ошибки оцениваются с использованием полинома кросскорреляционной функции.

где $y_0(t)$ — поток оптического излучения в момент времени t ; $y_\gamma(t)$ — поток гамма излучения; $n(t_1, t_2)$ — количество точек гамма за время от t_1 до t_2 ; \bar{y}_0 и \bar{y}_γ — нулевые уровни блеска в рентгене и в гамма. Затем находилось ε , такое, чтобы $K(\varepsilon)$ было максимальным для обрабатываемой вспышки. Это значение и является измеренным временем запаздывания всплеска в оптике относительно рентгеновского.

Особый интерес представляет вспышка O6, для которой наблюдается очень большая 20-минутная задержка (рис. 4). О данной вспышке подробнее пойдет речь ниже, тут отметим, что поляризация (в фильтрах и углами 0.90°) была стабильной и составляла $\sim 8\%$.

2.4. Орбитальные эффекты

Орбитальный период V404 Cyg/GS2023+338 составляет 6.4714 дней [48–70]. Мы исследовали, зависят ли наблюдаемые эффекты от орбитальной фазы. Это должно быть важно для эффектов, которые зависят от взаимного расположения источника оптического и рентгеновского излучения относительно друг друга и наблюдателя. В качестве примера предположим, что в результате эффекта нагревания рентгеновскими лучами от внутренних областей аккреционного диска вокруг черной дыры появляется оптическое излучение в активной фазе на компаньоне черной дыры. В этом случае

можно ожидать корреляции между оптическим и рентгеновским потоками. С другой стороны, если оптическое излучение, в основном, появляется во внешних областях аккреционного диска, то из-за симметрии такая зависимость может отсутствовать. Конечно, такие эффекты в значительной степени размываются изменчивостью аккреционного потока и движением рентгеновской тени от внешних краев аккреционного диска вдоль оптической звезды.

Мы выделили 11 случаев, когда наблюдается корреляция между вариациями оптического и рентгеновского потоков. Все эти события представлены на рис. 5. Временная задержка выражена в секундах и вычислена с использованием полиномиальной аппроксимации функции взаимной корреляции. Погрешности временной задержки рассчитываются на основе аппроксимации полиномом по алгоритму Левенберга-Маквардта-Аркварда [50]. Ошибки невелики и никогда не превышают размер точки данных на наших графиках.

На рис. 6 представлено отношение оптического потока (по данным сети МАСТЕР) к потоку рентгеновского излучения (по данным INTEGRAL в диапазоне 20–40 кэВ) в зависимости от орбитальной фазы двойной системы, которая схематически представлена сверху рисунка.

Для корректного учета поглощения мы перенормировали наблюдения в белом свете на фильтр I.

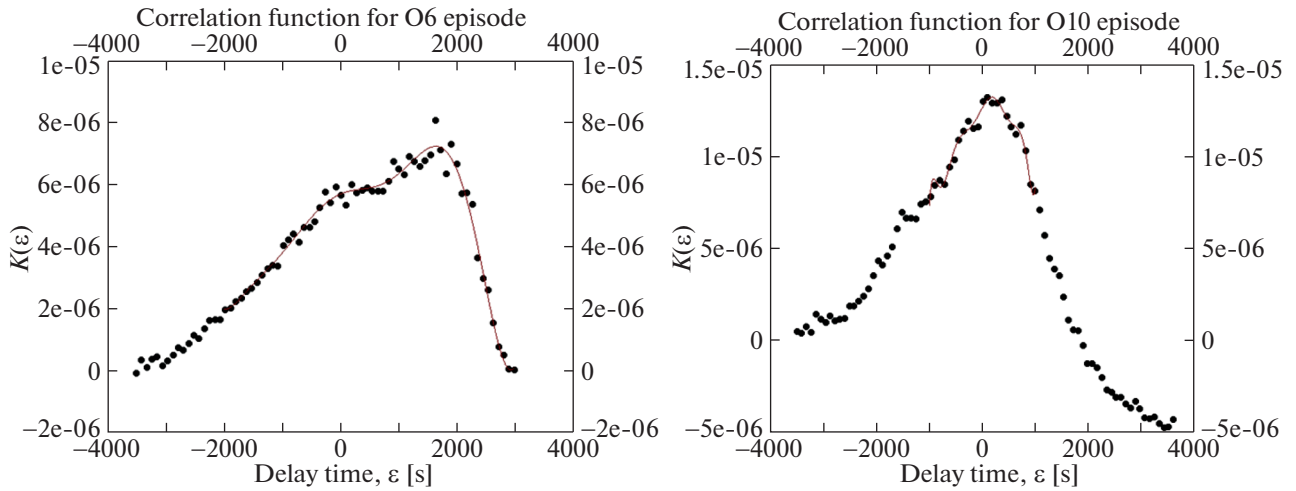


Рис. 4. Временные задержки, полученные из взаимной корреляции для вспышек O6 (задержка 1418 с) и O10. Черные точки — значение корреляционной функции $K(\varepsilon)$ для заданной временной задержки (Σ), рассчитанной по формуле (3). Соединительная (красная) линия — полиномиальная аппроксимация корреляционной функции. Мы используем эту аппроксимацию для определения максимума корреляционной функции $K(\varepsilon)$, чтобы в итоге получить временную задержку, которая соответствует максимуму. Это значение мы и будем использовать как временную задержку между оптическим и рентгеновским излучением. Функция корреляции для всех 11 вспышек доступна по адресу <http://master.sai.msu.ru/static/V404/corfunc.html>.

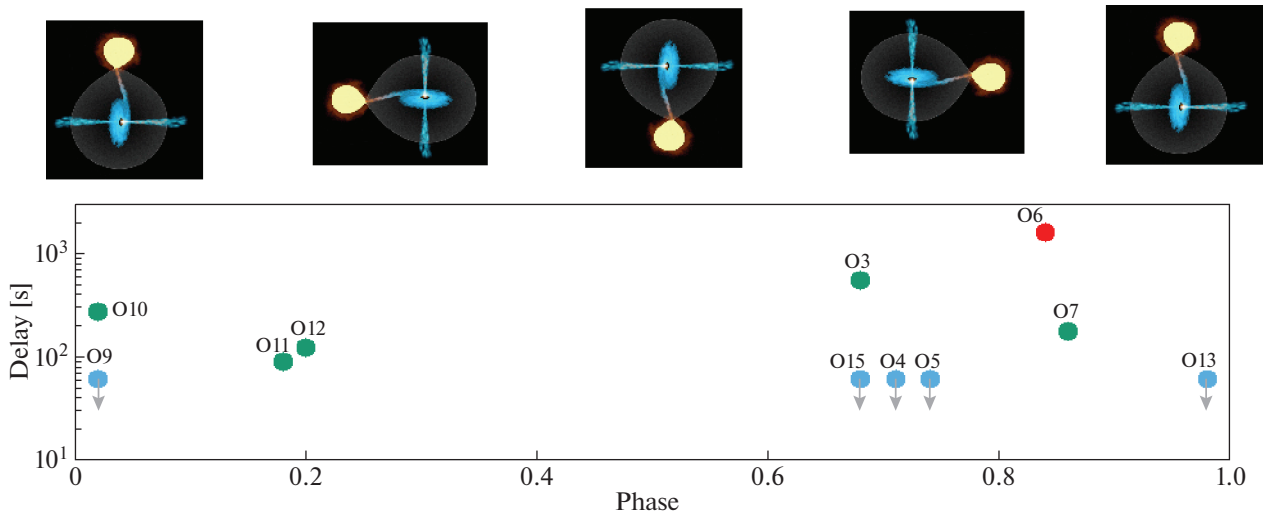


Рис. 5. Временная задержка между оптическим и рентгеновским (20–40 кэВ) потоком как функция конфигурации системы. Для расчета орбитальной фазы на рис. 4 и 5, а также в табл. 1 мы используем параметры Cyg V404 (период и T_0) из работы [49]. На расположенной сверху развертке наблюдатель смотрит снизу.

Для этого мы использовали полученную [51] кривую блеска в фильтре I из AAVSO и сопоставили ее с нашей кривой блеска в моменты синхронных наблюдений. Затем по стандартным законам [52] мы скорректировали наши данные на оптическое поглощение A_V [35, 36]. Жесткий рентген имеет слабое поглощение вдоль луча зрения. На рис. 6 мы сравниваем оптическую и рентгеновскую интенсивность в единицах F_{ν} . При построении дан-

ного рисунка мы учли временные задержки между оптическим и рентгеновским излучением.

Отметим также, что принципиальная форма рис. 6а не меняется, если принять во внимание степенную зависимость $I_o \sim I_x^{\gamma}$ (большой разброс точек делает незаметной корректировку на степенной закон). На рис. 6в и 6б показано соотношение потоков $\log(X\text{-ray})/\log(\text{Optical})$ с коррекцией временной задержки и без нее.

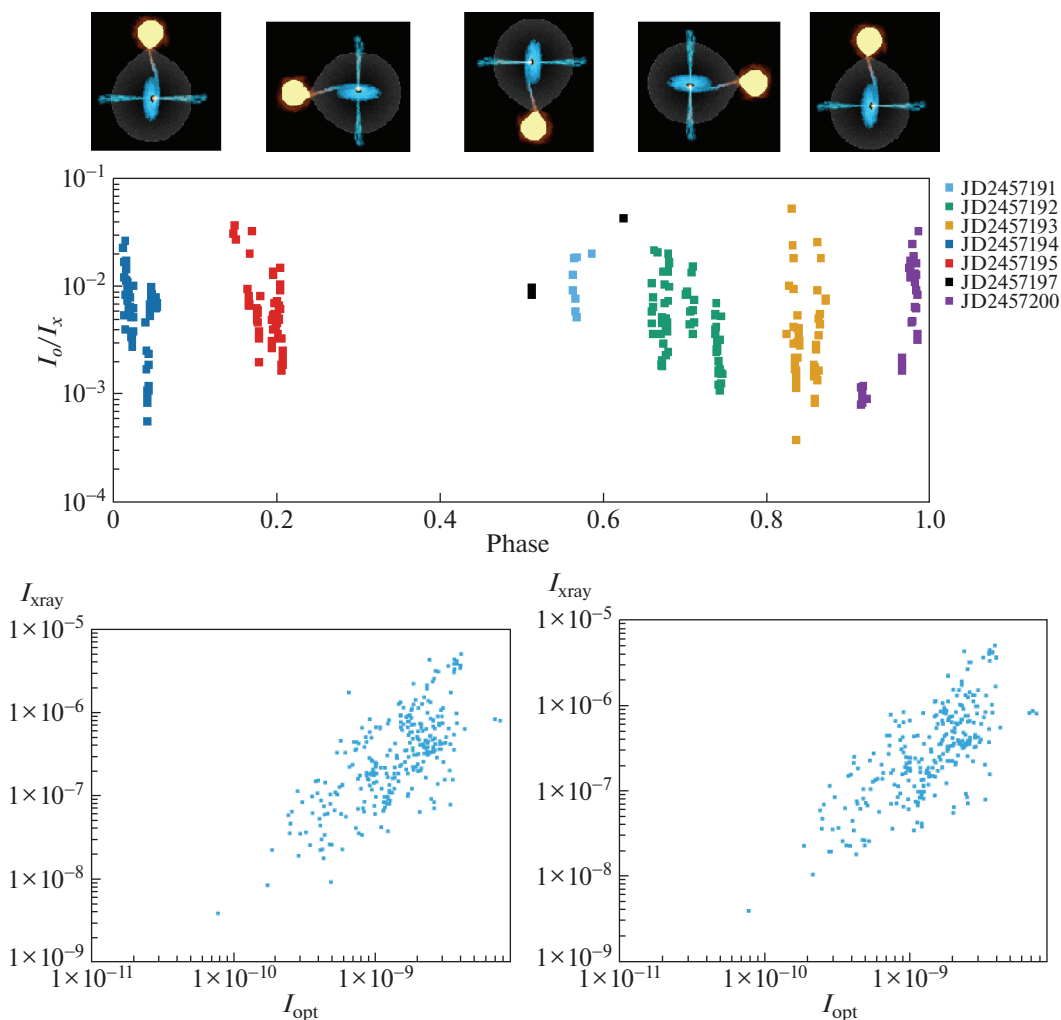


Рис. 6. Соотношение оптических и рентгеновских потоков и их связь с орбитальным периодом. (а) Фазовое распределение отношения I_o/I_x . (б) I_x в зависимости от I_o без учета временных задержек. (в) I_x в зависимости от I_o с учетом временных задержек. Орбитальная фазовая диаграмма (а) представляет собой логарифм отношения оптического потока к рентгеновскому излучению как функции орбитальной фазы (ориентация системы) $I = F_\nu \nu$ — оптический поток на частоте 3.75×10^{14} Гц, I_x — рентгеновский поток по данным INTEGRAL в диапазоне 20–40 кэВ.

Отношение $\log(X\text{-ray})/\log(Optical)$ для обоих случаев аппроксимируется одним законом $I_o \sim I_x^\gamma$, где $\gamma = 0.83 \pm 0.05$. Как и на предыдущем рисунке, на развертке вверх наблюдатель смотрит вниз.

Как следует из рисунка 6а, запаздывания и изменение отношения оптической к рентгеновской светимости не выявляют зависимости от орбитальной фазы. На рисунках 6в и 6б показана зависимость оптической от рентгеновской светимости с корректировкой временных задержек и без нее. На диаграммах видно, что отношение имеет довольно широкий, но заметный тренд, который в обоих случаях аппроксимируется законом $I_o \sim I_x^\gamma$, где $\gamma = 0.83 \pm 0.05$.

Во время предыдущего активного состояния V404 Cyg в 1989 г. было получено $\gamma = 0.56$. Более

крутой наклон в нашем случае может указывать на более сильный вклад джета в данные [12, 53, 54].

2.5. Поляризационные измерения

Измерения поляризации V404 Cyg были выполнены на пяти обсерваториях сети МАСТЕР [3, 4]. Подробная методика поляриметрических измерений на сети МАСТЕР представлена в работах [4, 26, 27, 32]. Метод в первую очередь предназначен для исследований собственного излучения гамма-всплесков. Те же методы могут использоваться для поляриметрии других объектов. Поляриметрические возможности телескопов МАСТЕР позволяют обнаруживать поляризацию оптического излучения на уровне 1–2% для объектов ярче 14 звездной величины и на уровне 4% до 15m [4]. Каждая обсерватория МАСТЕР состоит из двойного

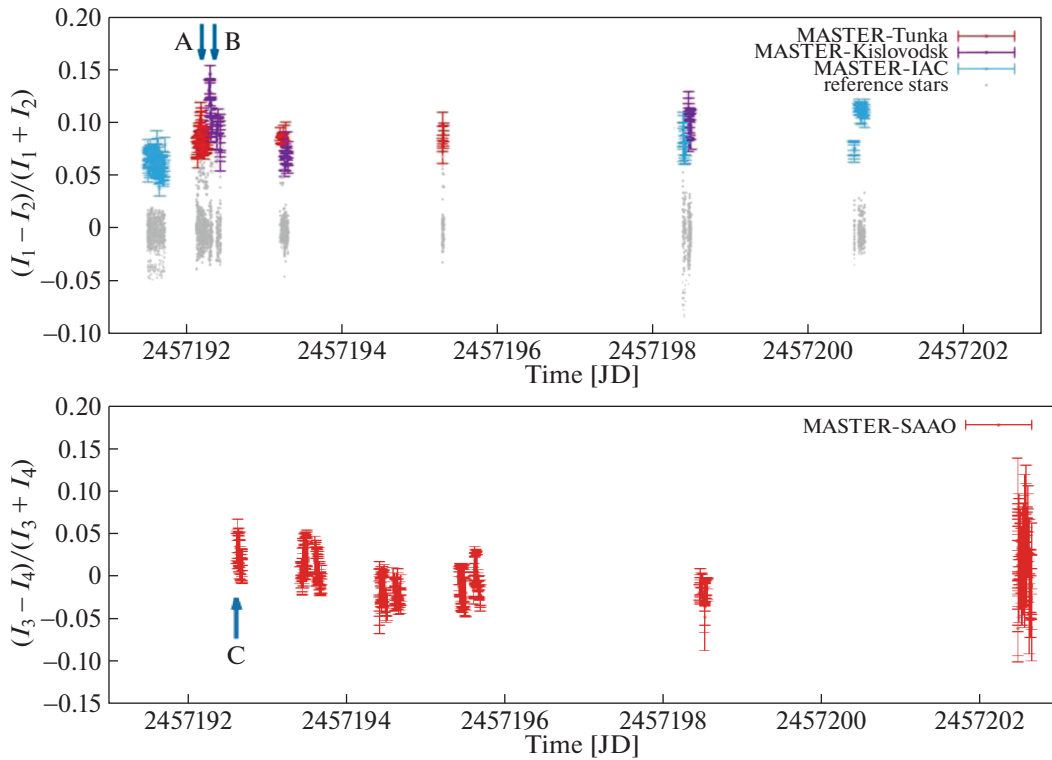


Рис. 7. (а) Изменение нижнего предела на степень линейной поляризации V404 Cyg со временем. В данном случае мы используем поляризационные фильтры, ориентированные под углами 0° и 90° . Стрелками обозначены два эпизода переменной поляризации, описанные в работе [4]. По оси Y отложен нижний предел степени линейной поляризации, полученный одной из обсерваторий сети МАСТЕР. Положительное и отрицательное значения этого предела обусловлены разным углом поляризации. Серые точки — нижний предел степени линейной поляризации каждой из 14 опорных звезд, используемых для измерения поляризации (показать отдельно каждую звезду сравнения в таком масштабе не представляется возможным). (б) Изменение нижнего предела на степень линейной поляризации V404 Cyg со временем при помощи фильтров, ориентированных под углом 45° и 135° . Один новый эпизод переменной поляризации показан стрелкой. Подробнее об эпизоде “С” см на рис. 8.

широкоугольного телескопа с полем зрения 2×4 квадратных градуса (8 квадратных градусов). Это дает нам возможность одновременно определять поляризацию для тысяч звезд сравнения в поле зрения от 12m до 16m. Чтобы оценить погрешность поляриметрического измерения объекта, мы выбираем несколько десятков звезд поля с одинаковой яркостью в одном кадре и вычисляем стандартное отклонение их поляризаций. Мы вычисляем погрешность измерений поляризации как случайные флуктуации фоновых звезд, предполагая, что они не имеют переменной поляризации.

В направлении V404 Cyg наблюдается сильная межзвездная поляризация из-за рассеяния галактической пылью, которая выровнена по галактическому магнитному полю. Естественно, что эта поляризация постоянна во времени.

Каждая из обсерваторий сети МАСТЕР имеет два широкопольных телескопа (на одной монтировке), что позволяет нам проводить наблюдения в поляризационных фильтрах, повернутых на 90° друг относительно друга. Обсерватории МАСТЕР

в Тунке, Кисловодске и Канарских островах (IAC) имеют поляризационные фильтры, ориентированные под позиционными углами 0° и 90° . На рис. 7а приведены измерения нижнего предела на степень линейной поляризации в данных фильтрах. Видно, что среднее значение нижнего предела на степень поляризации при использовании этих фильтров составило 7.4%. На телескопе MASTER-SAAO в ЮАР поляризационные фильтры ориентированы под 45° и 135° (см. рис. 7б). В данном случае значение нижнего предела степени поляризации было равно 0%.

Такая нормализация может привести к систематической ошибке при определении абсолютного значения степени поляризации. Действительно, опорные звезды могут находиться на разных физических расстояниях, поэтому они будут иметь диапазон уровней поляризации в зависимости от количества пыли, за которой они лежат. Это может привести к систематическому сдвигу нулевой точки на несколько процентов и, как следствие, к ошибке в абсолютном значении степени поляризации. Од-

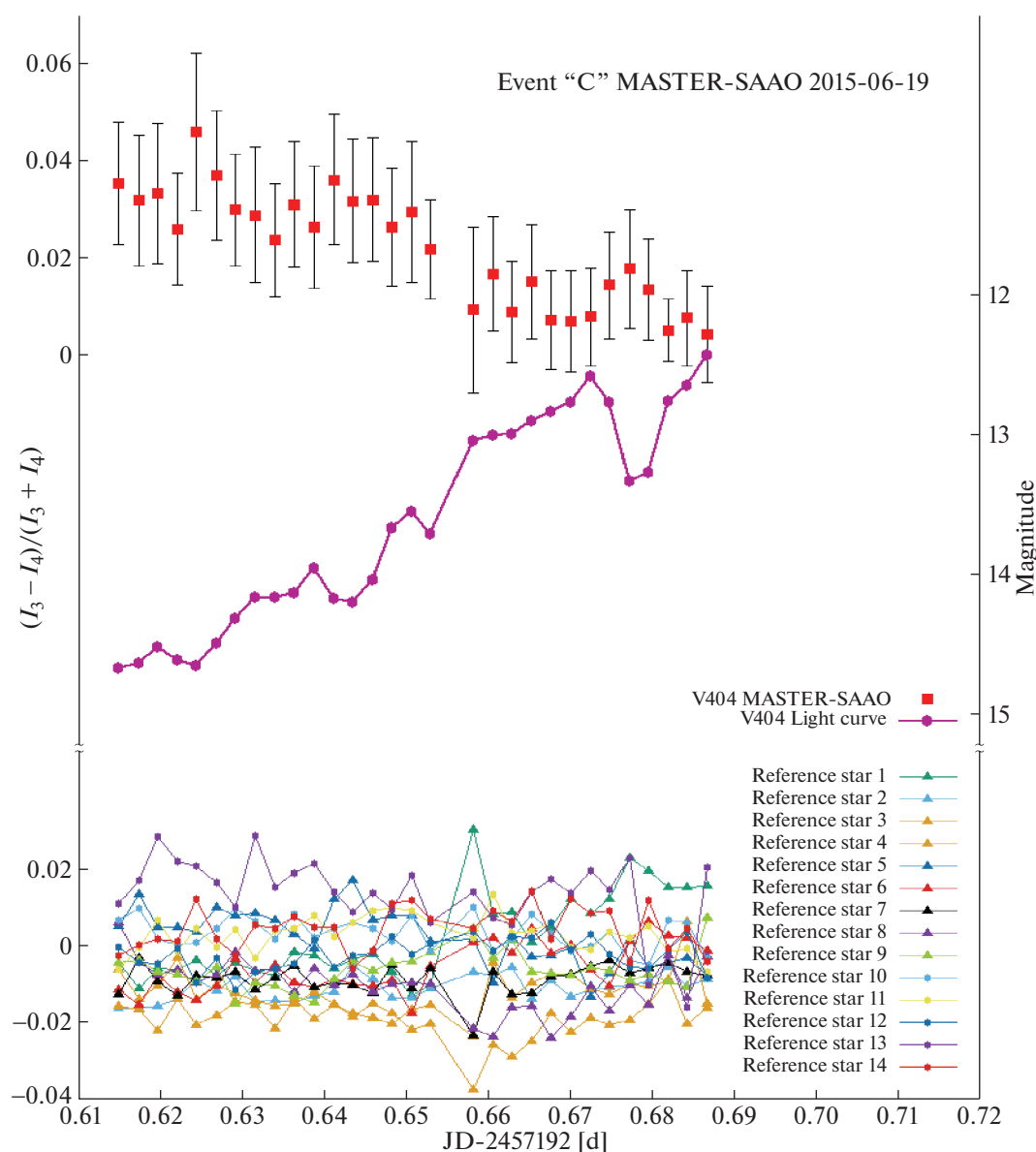


Рис. 8. Изменение нижнего предела степени линейной поляризации V404 Cyg (красные точки), полученной при помощи двух ортогональных поляроидов на обсерватории MASTER-SAAO. Фиолетовым цветом показана кривая блеска за этот период. (~1.4 часа в ходе наблюдений 19 июня 2015 г. (эпизод С на рис. 76)). Внизу представлены соответствующие графики для 12 опорных звезд.

нако основные результаты измерений поляризации в данной статье не относятся к измерению абсолютного значения степени поляризации. Поэтому мы можем измерить относительное изменение по сравнению с опорными звездами. Главным образом, мы будем говорить об относительном изменении, для которого достаточно, чтобы опорные звезды были постоянными во временных масштабах порядка нескольких часов. На рис. 9 показано, что это условие выполнено.

Для трех коротких (менее ~1 часа) эпизодов мы обнаружили переменную оптическую поляризацию, которая антикоррелирует с оптическим по-

током. Один из них впервые будет показан в этой работе (эпизод "С" на рис. 8). Этот эффект был обсужден более подробно в [4] на примере эпизодов А и В.

Относительная величина нижнего предела поляризации для эпизода "С" сравнима по модулю со звездами сравнения, поэтому требует дополнительных аргументов в подтверждение ее реального существования. На рис. 9 показано распределение стандартных отклонений для V404 Cyg и опорных звезд во время событий поляризации А, В⁴ и С. Мы

⁴Эпизоды А и В ранее были опубликованы в работе [4].

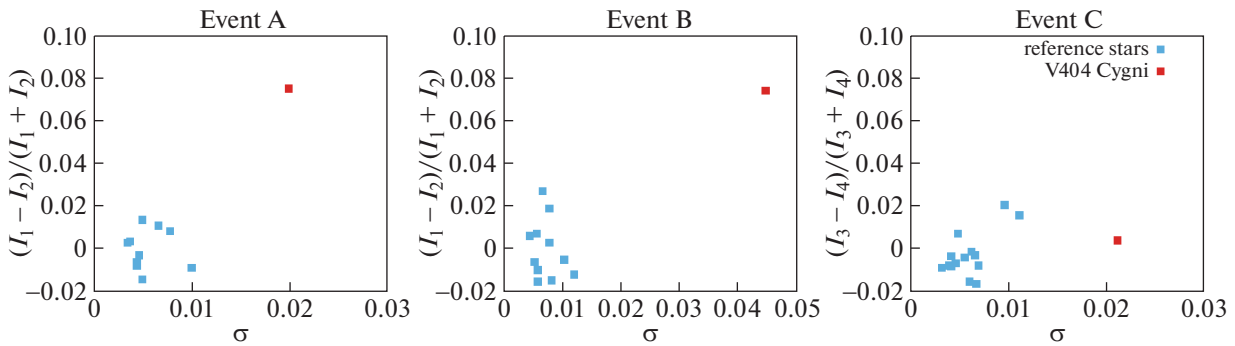


Рис. 9. Для каждого из событий переменной поляризации А, В и С представлен средний нижний предел степени линейной поляризации в зависимости от стандартного отклонения для V404 Cyg (красные точки) и опорных звезд (синие точки). Хорошо видно, что точка, соответствующая V404 Cyg, во всех трех случаях расположена отдельно и стандартное отклонение V404 Cyg в 2–4 раза больше, чем у опорных звезд.

видим, что ошибки звезд сравнения сгруппированы вокруг начала координат (в полном соответствии с выбранной калибровкой), в то время как точки, соответствующие V404 Cyg, имеют в 2–4 раза большее стандартное отклонение. Это доказывает, что объект имеет гораздо более сильные изменения в рассматриваемом периоде, чем опорные звезды. Кроме того, объект изменяется очень плавно во время событий, в отличие от редких стохастических отскоков в опорных звездах, см. рис. 8 и аналогичные рисунки в работе [4].

В работе [56] высказывается предположение, что инструментальная поляризация и поляризация в направлении на объект могут быть переменны по полю зрения, что делает невозможным точное измерение поляризации. Мы не согласны с этим. Действительно, телескопы сети МАСТЕР имеют широкое поле зрения (2×2 градуса), однако специально, чтобы избежать эффектов, зависящих от поля, мы используем только часть кадра размером 0.25×0.25 градуса с центрированием на объект анализа поляризации. Кроме того, в случае наличия значительных эффектов, зависящих от поля, у опорных звезд (или, по крайней мере, некоторых из них) произошли бы аналогичные или большие изменения плавной поляризации, которых ни одна из них не демонстрирует. Таким образом, принимая во внимание приведенные выше аргументы, мы уверены в достоверности рассматриваемых событий.

Как видно из рис. 7а и 7б, мы имеем огромный набор данных в двух перпендикулярных поляризациях. Кроме того, для JD в диапазоне от 2457198.45306 до 2457198.48482 данные с телескопов МАСТЕР-SAAO и МАСТЕР-Кисловодск получены одновременно. Это позволяет рассчитать суммарную степень поляризации $PD = 0.10 \pm 0.01^5$ и позиционный угол $PA = 6.7^\circ \pm 6.4^\circ$.

⁵Таким образом, поляризация составляет $10 \pm 1\%$.

Приведенные выше ошибки не включают возможную систематическую ошибку, связанную с калибровкой, которая обнуляет поляризацию набора опорных звезд. Диаграмма Q/U на рис. 10 иллюстрирует эти измерения. На ней четко видно, что V404 Cyg изолирован от звезд поля, что убеждает в его внутренней поляризации. Измерение угла положения ($PA = 6.7^\circ \pm 6.4^\circ$) аналогично тому, что было найдено в работе [57].

Наконец, отметим, что в наших данных могут быть признаки долговременного плавного изменения поляризации. Данные, полученные в поляризационных фильтрах, ориентированных под углом 0 и 90° (см. рис. 7а), показывают, что нижний предел на степень линейной поляризации имеет тенденцию к увеличению, в то время как для набора опорных звезд она (поляризация) остается постоянным. Напротив, данные в поляризационных фильтрах, ориентированных под углами 45° и 135° , имеют тенденцию к затуханию (см. рис. 7б). Это может указывать на наличие изменения степени поляризации и (или) угла поляризации на временных масштабах порядка недели.

3. ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ПОДСВЕТКИ ЗВЕЗДЫ-КОМПАЬОНА И ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕНТГЕНОВСКОГО

Оценим наблюдаемую задержку оптического излучения относительно рентгеновских фотонов. Отметим, что соотношения и связи между оптическим и рентгеновским потоками были ранее рассмотрены в работах: [12, 13, 53, 58]. Запишем уравнение гидростатического равновесия в звездной атмосфере оптического компаньона:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{GM\rho}{r^2}, \quad (4)$$

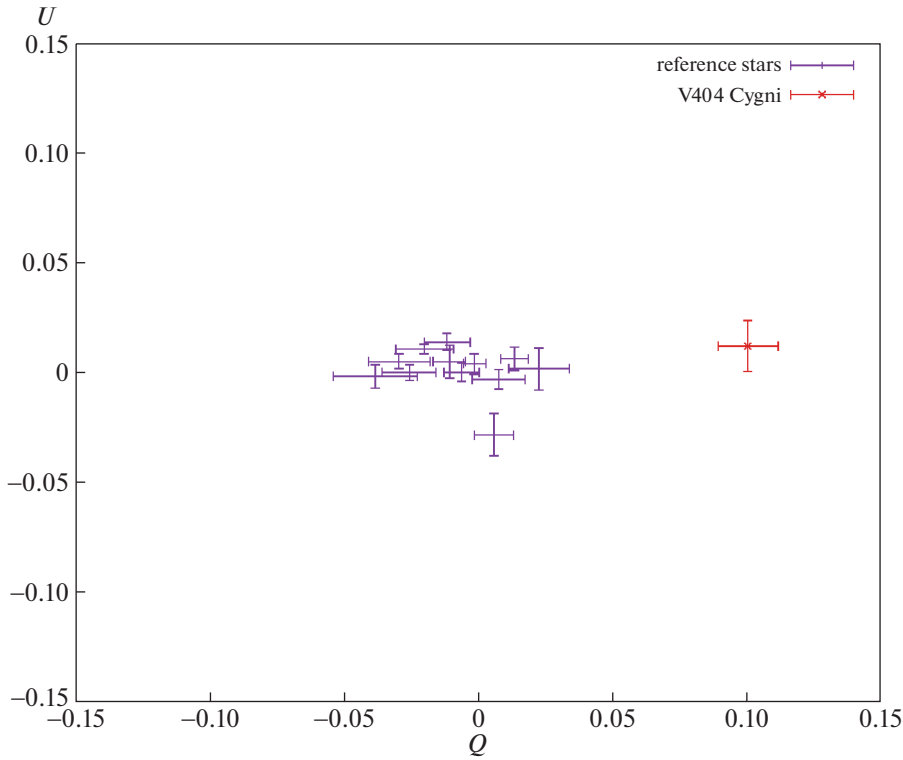


Рис. 10. Q/U диаграмма для V404 и опорных звезд по данным с телескопов МАСТЕР- SAAO и МАСТЕР-Кисловодск на эпоху наблюдений JD=2457198.45306. Степень линейной оптической поляризации V404 составляет $PD = 0.10 \pm 0.01$, а позиционный угол $PA = 6.7 \pm 6.4$ градуса.

где ρ , P — плотность и давление в фотосфере, r и M — радиус и масса звезды, а G — гравитационная постоянная. Решение этого уравнения дает экспоненциальный профиль плотности в предположении, что температура фотосферы T постоянна:

$$\rho = \rho_0 \exp(-h/h_{\text{ph}}), \quad (5)$$

где h — текущая высота в фотосфере, а h_{ph} — высота фотосферной шкалы в фотосфере

$$h_{\text{ph}} = \frac{kT}{gm_p}, \quad (6)$$

где k — постоянная Больцмана, m_p — масса протона, а $g = GM/r^2$ — ускорение свободного падения в фотосфере.

Вычисляем типичную высоту атмосферы в терминах типичной температуры фотосферы и типичного размера гиганта $r_{\text{ph}} = 3r_{\odot}$, где r_{\odot} — радиус Солнца. Таким образом, получим, что

$$h_{\text{ph}} = 0.77 \times 10^9 (T/10^4 \text{ K})(r_{\text{ph}}/3r_{\odot})^2 \text{ см}. \quad (7)$$

Скорость звука в фотосфере может быть получена по формуле:

$$v_s = 10^6 (T/10^4 \text{ K})^{1/2} \text{ см с}^{-1}. \quad (8)$$

Таким образом, характерный масштаб времени колебаний в фотосфере, вызванных освещением

рентгеновскими лучами, имеет следующий масштаб:

$$t_{\text{ох}} = \frac{h_{\text{ph}}}{v_s} \approx 13(T/10^4 \text{ K})^{1/2}(r_{\text{ph}}/3r_{\odot})^2 \text{ мин}. \quad (9)$$

Главными источниками оптического излучения микроквара V404 Cyg являются собственное излучение звезды-субгиганта (компаньона) с массой $0.7 \pm 0.25M_{\odot}$, КЗ III [48, 59, 60] и переработанное стороной субгиганта, обращенной к микроквару, его жесткое рентгеновское излучение. В анализируемый момент катастрофического увеличения мощности микроквара собственное излучение маломассивной звезды практически не существенно. Таким образом, повышение оптического блеска во время первой в XXI веке исторической вспышки V404 Cyg связано, в первую очередь, с эффектом прогрева маломассивной звезды и внешних слоев аккреционного диска. При этом нагрев внешних слоев аккреционного диска более вероятен. Об этом свидетельствует широкая линия $\text{H}\alpha$, наблюдавшаяся во время первой вспышки рентгеновского излучения [12, 13]. Аккреционный диск образуется в результате выброса вещества из гиганта в полость Роша черной дыры. Вещество, захваченное черной дырой, нагревается до нескольких сотен миллионов градусов и испускает рентгеновское излучение.

Однако, кроме этих двух возможных источников излучения есть еще один — релятивистский джет, генерируемый черной дырой и проявившийся до сих пор в радио и жестком рентгеновском нетепловом излучении. Мы полагаем, что именно этот джет (а точнее, два симметричных джета) ответственны за появление поляризованного оптического излучения.

Для расстояния 2.39 ± 0.14 кпк [69] получаем светимость в джете $\sim 4 \times 10^{34}$ эрг/с. Независимым доказательством существования мощного джета в течение последней вспышки является регистрация беспрецедентного мощного нетеплового радиоизлучения, достигающего в моменты вспышек 6 Ян [17]. Это вполне согласуется с полученными нами оптическими потоками джетов в рамках синхротронного механизма излучения.

Вклад переработанного на звезде-компаньоне рентгеновского излучения обычно слабее, чем во внешнем диске во время вспышек в маломассивных рентгеновских двойных системах (LMXB [55]). Другие механизмы нетеплового излучения в спокойном состоянии обсуждаются в работах [61–65].

В работах [46, 64] оптическая задержка порядка 1 мин объясняется переработкой рентгеновского излучения во внешнем диске.

Одним из результатов нашего исследования является обнаружение сверхдлинных задержек между рентгеновским и оптическим излучением, достигающие в некоторых случаях 20 мин, о которых сообщалось Родригесом и др. [46]. Мы можем предложить несколько механизмов, которые могут привести к этим длительным задержкам:

Оптическое излучение в джете. Если вещество под действием высокого давления излучения выбрасывается из аккреционного диска (см., например, [66]), то сначала мы можем ожидать возникновения рентгеновского излучения, исходящего от диска или от короны диска, а уже после возникновения оптического излучения [46]. Как показано в разделе 3 (уравнение 9), характерное время таких колебаний составляет десятки минут для характерных физических параметров системы, что согласуется с измеренным нами значением.

Периодическое затемнение оптического излучения спутника искривленными слоями аккреционного диска. Эта модель может объяснить тот наблюдаемый факт, что иногда оптическое излучение не растет, несмотря на повышение потока рентгеновского излучения. В этой связи отметим, что эти квазипериодические колебания диска могли быть объяснены релятивистским эффектом Лензе-Тирринга [71–74].

Для периода прецессии в этом случае мы используем известную формулу:

$$P_{LT} = [\pi c^3 R^3] / [(GM)^2 a_{ker}],$$

где c — скорость света, R — радиус в диске, G — гравитационная постоянная, а M — масса черной дыры, которую примем равной $10M_{\odot}$. Прецессия LT эффективно работает, когда характерное время распространения радиальной диффузии в диске становится больше, чем время прецессии LT. Для времени диффузии плазмы $t(D)$ имеем:

$$t(D) = R^2/D,$$

где $D = (v_t l_t)/3 = (\alpha v_s H)/3$ — коэффициент турбулентной диффузии, v_s — скорость звука в диске, H — половина толщины диска, α — альфа-параметр диска.

Далее мы можем переписать формулу относительно $t(D)$:

$$t(D) = (3\Pi/\alpha)(1/w)(R/H)^2,$$

где w — угловая скорость в диске, а $\Pi = 3^{1/2}$ — числовой коэффициент.

Используя уравнение $t(D) \sim P_{LT}$, мы получаем характеристический радиус, внутри которого работает эффект LT. Другими словами мы подставляем:

$$R < R_{LT} = a_{ker}^{2/3} (GM/c^2) [3\Pi/(\pi\alpha)]^{2/3} (R/H)^{4/3}.$$

Затем подставим эту формулу в P_{LT} и получим

$$P_{LT}(s) = 4 \times 10^{-4} (M_{bh}/10M_{\odot}) (1/\alpha)^2 (R/H)^4 a_{ker}.$$

Как видно из этой формулы, период прецессии диска пропорционален параметру Керра a_{ker} и еще сильнее зависит от степени отношения $(R/H)^4$. Например, для $H/R = 0.1$

$$P_{LT}(s) = 4a_{ker}/(\alpha)^2.$$

Однако для внутренней части диска $R/H \leq 1$. С другой стороны, $a_{ker} < 0.7$ и $\alpha \sim 0.5-0.7$. Эти значения параметров следуют из сравнения наблюдений низкочастотных квазипериодических осцилляций у кандидатов в черные дыры (см., например, [67]). Это означает, что для черных дыр с массой $\sim 10M_{\odot}$ период прецессии LT в лучшем случае составляет около 5 с. Таким образом, прецессия LT не способна объяснить наблюдаемые запаздывания между рентгеновским и оптическим излучением.

В работах [8, 46] обсуждается механизм, связанный с джетами. Но в результате работы этого конкретного механизма ожидаются заметные изменения спектра, длительные задержки оптического излучения и сильная поляризация. Однако такого эффекта поляризации не наблюдается [68]. Тем не менее мы наблюдали [4] два случая изменения поляризации, что может свидетельствовать о наличии оптической струи, этот эффект наблюдается при уменьшении оптической светимости, но не во время оптических вспышек.

Если оптическое излучение рождается в джетах на расстоянии 10–20 световых минут от черной дыры, то наблюдаемое запаздывание могло бы быть вполне объяснимо. Однако такое оптическое излучение должно было бы носить нетепловую природу и иметь совсем другой спектр и быть поляризованным. Однако нет свидетельств изменения оптического спектра во время вспышек [68], а обнаруженная нами поляризация [4], наоборот, присутствует в те моменты, когда оптическое излучение джета понижено.

Идея вклада синхротронного излучения джета в переменную поляризацию высказывалась и в других работах по V404 Cyg [4, 57, 68].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили 2070 уникальных однородных широкополосных и поляризационных фотометрических данных наблюдений микроквара V404 Cyg/GS2023+338, полученных на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ в июне и декабре 2015 г. МАСТЕР был первым телескопом, который навелся и начал оптические наблюдения микроквара после его вспышки в гамма-диапазоне 15 июня 2015 г. Наблюдения проводились с 18 ч 34 м 09 с UT 15 июня 2015 г. до 31 декабря 2015 г. в четырех поляризационных и BVRI фильтрах. Мы привели результаты этих наблюдений и провели сравнительный анализ активности микроквара в оптическом и рентгеновском диапазонах.

Наши наблюдения подтверждают обнаруженные ранее [46] сверхдлинные задержки оптического излучения по отношению к вспышкам в рентгеновском диапазоне. Мы обсуждаем механизмы, вызывающие запаздывание вариаций оптического излучения относительно вариаций рентгеновского излучения. Мы подтверждаем обнаруженную и опубликованную нами ранее [4] переменную поляризацию оптического излучения и сообщаем еще об одном аналогичном эпизоде.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения выполнены на оборудовании (телескопы-роботы Глобальной сети МАСТЕР), купленного при поддержке Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова. Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 17-52-80133. Оборудование МАСТЕР-Тунка поддержано Минобрнауки России (госзадания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ), с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Минобрнауки России (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy, N. Shatskij, et al., *Advances in Astronomy* 2010, 30 (2010).
2. S. D. Barthelmy, A. D’Ai, P. D’Avanzo, H. A. Krimm, et al., *GCN* 17929, 1 (2015).
3. V. M. Lipunov, R. Rebolo, E. S. Gorbovskoy, M. Serra-Ricart, et al., *Astron. Tel.* 7696, 1 (2015).
4. V. M. Lipunov, E. Gorbovskoy, V. Kornilov, V. Krushinskiy, et al., *Astrophys. J.* **833**, 198 (2016).
5. F. Makino, GINGA Team, *IAU Circ.* 4782, 1 (1989).
6. B. G. Marsden, *IAU Circ.* 4783, 1 (1989).
7. R. M. Wagner, T. J. Kreidl, S. B. Howell, G. W. Collins, and S. Starrfield, *IAU Circ.* 4797, 1 (1989).
8. J. Rodriguez, M. Cadolle Bel, J. Alfonso-Garzón, T. Siegert, et al., *Astron. and Astrophys.* **581** L9 (2015).
9. T. Muñoz-Darias, J. Casares, D. Mata Sánchez, R. P. Fender, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **465**, L124 (2017).
10. V. Rana, A. Loh, S. Corbel, J. A. Tomsick, et al., *Astrophys. J.* **821**, 103 (2016).
11. F. Bernardini, D. Russel, and F. Lewis, *Astron. Tel.* 7761, 1 (2015).
12. F. Bernardini, D. M. Russell, and K. I. Kolojonen, *Astrophys. J.* **826**, 149 (2016).
13. F. Bernardini, D. M. Russell, and A. W. Shaw, *Astrophys. J. Lett.* **818**, 5L (2016).
14. K. Mooley, R. Fender, G. Anderson, T. Staley, E. Kuulkers, and C. Rumsey, *Astron. Tel.* 7658, 1 (2015).
15. C. Ferrigno, S. Fotopoulou, A. Domingo, J. Alfonso-Garzón, et al., *Astron. Tel.* 7662, 1 (2015).
16. S. Motta, A. Beardmore, S. Oates, N. P. M. Kuin, A. Sanna, E. Kuulkers, J. Kajava, and C. Sanchez-Fernandez, *Astron. Tel.* 7666, 1 (2015).
17. A. Tetarenko, G. R. Sivakoff, M. A. Gurwell, G. Petitpas, J. G. A. Wouterloot, J. C. Miller-Jones, et al., *Astron. Tel.* 7661, 1 (2015).
18. K. Tsubono, T. Aoki, K. Asuma, T. Daishido, S. Kida, H. Nakajima, K. Niinuma, and K. Takefuji, *Astron. Tel.* 7701, 1 (2015).
19. S. D. Barthelmy, K. L. Page, D. M. Palmer, et al., *GCN* 18716, 1 (2015).
20. V. Yurkov, Yu. Sergienko, A. Gabovich, E. Sinyakov, et al., *GCN* 18717, 1 (2015).
21. O. Gress, K. Ivanov, N. M. Budnev, V. A. Poleshchuk, et al., *GCN* 18718, 1 (2015).
22. V. Yurkov, Yu. Sergienko, A. Gabovich, E. Sinyakov, et al., *GCN* 18783, 1 (2015).
23. S. D. Barthelmy, V. D’Elia, C. Gronwall, L. Izzo, et al., *GCN*, 18777, 1 (2015).
24. Barthelmy S.D., D’Elia A., L. Izzo, A. Y. Lien, et al., *GCN*, 18778, 1 (2015).
25. V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy, N. Tiurina, et al., *Rev. Mex. Astron. y Astrofis. Ser. Conf.* **48**, 42 (2016).
26. E. S. Gorbovskoy, V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, A. A. Belinski, et al., *Astronomy Reports* **57**, 233 (2013).

27. V. G. Kornilov, V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskey, A. A. Belinski, et al., *Exper. Astron.* **33**, 173 (2012).
28. V. M. Lipunov, J. Gorosabel, M. V. Pruzhinskaya, A. de Ugarte Postigo, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **455**, 712 (2016).
29. V. M. Lipunov, S. Blinnikov, E. Gorbovskey, A. Tutukov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **470**, 2339 (2017).
30. S. D. Barthelmy, T. L. Cline, P. Butterworth, R. M. Kippen, M. S. Briggs, V. Connaughton, G. N. Pendleton, *AIP Conf. Proc.* **526**, 731 (2000).
31. S. Barthelmy, *Astron. Nach.* **329**, 340 (2008).
32. E. S. Gorbovskey, V. M. Lipunov, D. A. H. Buckley, V. G. Kornilov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **455**, 3312 (2016).
33. E. S. Gorbovskey, G. V. Lipunova, V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **421**, 1874 (2012).
34. P. Blay, T. Munoz-Darias, J. Kajava, J. Casares, S. Motta, and J. Telting, *Astron. Tel.* 7678, 1 (2015).
35. R. Itoh, M. Watanabe, M. Imai, T. Nakaoka, K. Takaki, K. Shiki, Y. T. Tanaka, M. Uemura, K. S. Kawabata, et al., *Astron. Tel.* 7709, 1 (2015).
36. R. Itoh, Y. T. Tanaka, K. S. Kawabata, M. Uemura, et al., *Proc. Astron. Soc. Jap.* **69**, 25 (2017).
37. L. Singer, LIGO Scientific Collaboration, et al., *GCN* 18728, 1 (2015).
38. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, et al., *Phys. Rev. Lett.* 116x1103A (2016).
39. V. Lipunov, E. Gorbovskey, N. Tyurina, V. Kornilov, et al., *GCN* 18738, 1 (2015).
40. V. Lipunov, E. Gorbovskey, N. Tyurina, D. Buckley, et al., *GCN* 18835, 1 (2015).
41. V. Lipunov, E. Gorbovskey, N. Tyurina, D. Buckley, et al., *GCN* 18903, 1 (2015).
42. V. Lipunov, E. Gorbovskey, N. Tyurina, V. Kornilov, P. Balanutsa, A. Kuznetsov, O. Gress, and D. Buckley, *GCN* 18729, 1 (2015).
43. A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, A. A. Popov, *Astron. Bull.* **69**, 368 (2014).
44. E. Kuulkers, et al., *Astron. Tel.* 7758, 1 (2015).
45. E. Kuulkers and C. Ferrigno, *Astron. Tel.* 8512, 1 (2015).
46. J. Rodriguez, M. Cadolle Bel, J. Alfonso-Garzón, T. Siebert, et al., *Astron and Astrophys.* **581**, L9 (2016).
47. A. Udalski and J. Kaluzny, *Proc. Astron. Soc. Pacif.* **103**, 198 (1991).
48. J. Casares, P. A. Charles, and T. Naylor, *Nature* **355**, 614 (1992).
49. A. M. Cherepashchuk, N. V. Borisov, M. K. Abubekero, D. K. Klochkov, and É. A. Antokhina, *Astronomy Reports* **48**, 1019 (2004).
50. D. W. Maquardt, *J. Soc. Industrial and Applied Math.* **11**, 431 (1963).
51. M. Kimura, K. Isogai, T. Kato, Y. Ueda, et al., *Nature* **529**, 54 (2016).
52. A. N. Cox *Allen's astrophysical quantities* (New York: AIP Press; Springer, 2000).
53. J. van Paradijs, *ASP Conf. Ser.* **56**, 165 (1994).
54. S. Heinz and R. A. Sunyaev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **343**, L59 (2003).
55. J. I. González Hernández, J. Casares, and R. Rebolo, *Astrophys. J.* **738**, 95 (2011).
56. I. A. Kosenkov, A. V. Berdyugin, V. Pirola, S. S. Tsygankov, E. Pallé, P. A. Miles-Páez, and J. Poutanen, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **468**, 4362 (2017).
57. T. Shahbaz, D. M. Russell, S. Covino, K. Mooley, R. P. Fender, C. Rumsey, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **463**, 1822 (2016).
58. D. M. Russell, R. P. Fender, R. I. Hynes, C. Brocksopp, J. Homan, P. G. Jonker, and M. M. Buxton, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **371**, 1334 (2006).
59. T. Shahbaz, F. A. Ringwald, J. C. Bunn, T. Naylor, P. A. Charles, and J. Casares, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **271**, L10 (1994).
60. J. Khargharia, C. S. Froning, and E. L. Robinson, *Astrophys. J.* **716**, 1105 (2010).
61. A. Merloni, A. C. Fabian, and R. R. Ross, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **313**, 193 (2010).
62. P. Casella, T. J. Maccarone, K. O'Brien, and R. P. Fender, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **404**, L21 (2010).
63. P. Gandhi, A. Shaw, M. Pahari, S. Littlefair, et al., *Astron. Tel.* 7727, 1 (2015).
64. P. Gandhi, S. P. Littlefair, and L. K. Hardy, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 554 (2016).
65. P. Gandhi, M. Bachetti, V. S. Dhillon, R. P. Fender, et al., *Nature Astronomy* **1**, 859 (2017).
66. L. Titarchuk, I. Lapidus, and A. Muslimov, *Astrophys. J.* **499**, 315 (1998).
67. N. Shaposhnikov and L. Titarchuk, *Astrophys. J.* **699**, 453 (2009).
68. Y. T. Tanaka, R. Itoh, M. Uemura, Y. Inoue, et al., *Astrophys. J.* **823**, 35 (2016).
69. J. C. A. Miller-Jones, P. G. Jonker, V. Dhawan, W. Briskin, et al., *Astrophys. J.* **706**, L230 (2009).
70. É. A. Antokhina, E. P. Pavlenko, A. M. Cherepashchuk, and S. Yu. Shugarov, *Astronomy Reports* **37**, 407 (1993).
71. V. F. Suleimanov, G. V. Lipunova, and N. I. Shakura, *Astronomy Reports* **51**, 549 (2007).
72. G. V. Lipunova and N. I. Shakura, *Astron. and Astrophys.* **356**, 363 (2000).
73. Н. И Шакура (ред.) *Аккреционные процессы в астрофизике* (Москва, ФизМатЛит, 2016).
74. K. S. Thorne, R. H. Price, and D. A. MacDonald *Black Holes. The membrane paradigm* (New Haven, CT, Yale University Press, 1986).