

# ЭВОЛЮЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ВСПЫШКИ MAXI J1535-571

© 2018 г. Коллектив ИКИ РАН<sup>\*1</sup>,

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 01.12.2017 г.

*Ключевые слова:*

## ВВЕДЕНИЕ

Третьего сентября 2017 года Негоро и др. (2017) было объявлено об обнаружении телескопом MAXI (Матцуока и др., 2009; Негоро и др., 2016) нового яркого рентгеновского источника, получившего обозначение MAXI J1535-571. Уже через несколько часов, основываясь на данных телескопов *XRT* и *UVOT* обсерватории *Swift*, Кеннеа и др. (2017b) локализовали источник с точностью до 1.5", что позволило быстро найти оптический компаньон (Скаринги и др., 2017). Источник был также зарегистрирован в радио- (Рассел и др., 2017) и ближнем-ИК диапазонах (Динсер и др., 2017), а также на миллиметровых волнах (Тетаренко и др., 2017). Дополнительным подтверждением того, что оптический источник действительно является компаньоном рентгеновского, является наличие в ИК-спектре источника линии  $Br_{\gamma}$ , которую связывают с аккрецией (Бандиопадхуай и др., 1997). Примерно через неделю после открытия Накахира и др. (2017) и Кеннеа и др. (2017a) сообщили о начале уменьшения жесткости рентгеновского спектра.

Подобное поведение является характерным для маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами. Общепринято описывать ход вспышки в терминах смены "состояний", причем каждое состояние имеет свои уникальные спектральные и тайминговые характеристики (подробнее см. Танака и др., 1996; Гребенев и др., 1997; Ремиллард и др., 2006; Беллони и др., 2010, и многие другие). Все подобные вспышки начинаются в низком жестком со-

стоянии, в котором доминирующую роль в излучении играет горячая, оптически тонкая корона. После недолгого роста жесткое состояние сменяется промежуточным-жестким, затем промежуточным-мягким и, наконец, высоким мягким состоянием, в котором большая часть энерговыделения происходит во внутренних частях аккреционного диска.

Особенный интерес вызывает вопрос о том, на каком расстоянии от компактного объекта происходит разрушение диска во время низкого жесткого состояния и как изменяется это расстояние - называемое радиусом обрезания - в течение вспышки. Результаты имеющихся исследований зачастую противоречивы - в спектрах некоторых систем обнаруживаются холодные аккреционные диски (с температурой в 0.1..0.5 кэВ: Миллер и др., 2006a,b; Рейс и др., 2011), практически достигающие крайней устойчивой орбиты вокруг черной дыры, в то время как ограничения, получающиеся по измерению отраженной компоненты (в частности уширенной линии нейтрального железа на 6.4 кэВ) демонстрируют как большие радиусы обрезания - Фюрст и др. (2015) -, так и малые - Миллер и др. (2015).

Как уже было сказано, различные состояния отличаются не только формой спектра, но и характером быстрой переменности (Беллони и др., 2010). В низком жестком состоянии спектр мощности обычно представляет собой широкополосный шум, на который накладывается один или несколько узких Лоренцианов с частотами от 0.1 до десятков Гц - т.н. низкочастотные квазипериодические осцилляции (НЧ КПО). Известно, что

<sup>\*</sup>Электронный адрес: i.a.mereminskiy@gmail.com

частота слома, выше которой амплитуда широкополосного шума начинает быстро спадать, связана линейным соотношением с фундаментальной частотой КПО (Виньяндс и др., 1999), причем это соотношение выполняется и для систем с черными дырами и с нейтронными звездами, а коэффициент пропорциональности остается единым на протяжении почти трех порядков по частоте. Природа этих НЧ КПО, называемых также КПО типа-С (Каселла и др., 2005), по-прежнему неизвестна, однако важно то, что в некоторых моделях происхождения КПО - в моделях релятивистской прецессии (Стелла и др., 1998) - частота КПО зависит от радиуса обрезания аккреционного диска. Это предоставляет нам возможность исследовать изменения радиуса обрезания в ходе вспышки, при условии что КПО будет наблюдаться.

Именно такие НЧ КПО были обнаружены нами (Мереминский и др., 2017) 11 сентября, через восемь дней после открытия MAXI J1535-571 и именно им будет посвящена дальнейшая работа.

## MAXI J1535-571

### Обработка данных

Сразу же после обнаружения источника были инициированы интенсивные наблюдательные программы на практически всех работающих в данный момент рентгеновских телескопах. Мы будем использовать данные обсерваторий *Swift* (в частности инструментов *BAT* (Бартелми и др., 2005) и *XRT* (Барроус и др., 2000)) и *INTEGRAL* (Винклер и др., 2003), а так же данные монитора *MAXI* общедоступные наблюдения телескопа *NuSTAR* (Харрисон и др., 2013).

В первую очередь нас интересовали данные о переменности источника. Данные телескопа *Swift-XRT* были пропущены через стандартный конвейер *xrtpipeline*, затем барицентрированы. Несмотря на то, что фотоприемник *Swift-XRT* в большей части наблюдений работал в режиме “перегрузки” из-за очень большого темпа счета событий, для анализа временной переменности мы не стали прибегать к стандартному приему - исключению столбцов детектора со слишком большим темпом счета - поскольку “перегрузка” в первую очередь влияет на измеряемый спектр, и не оказывает существенного влияния на положение центроиды КПО, которое нас интересует. Мы проверили это на нескольких наблюдениях, исключая по пять наиболее засвеченных столбцов детектора. Для анализа использовались кривые блеска с разрешением в 20 мс, в диапазоне

0.8–10 кэВ.

Данные телескопов *JEM-X* (Лунд и др., 2003) и *IBIS* (Убертини и др., 2003) обсерватории *INTEGRAL* были обработаны стандартным ПО и барицентрированы. Были извлечены кривые блеска с разрешением в 0.05 с в диапазонах 3–20 и 20–200 кэВ, соответственно. К сожалению, в начале 1861 орбиты спутника произошла мощная солнечная вспышка, из-за чего наблюдения были отменены.

Для анализа данных (наблюдение: 90301013002) телескопа *NuSTAR* был применен стандартный конвейер *nuproducts*. Для построения кривой блеска в диапазоне 3–78 кэВ использовался круговой регион вокруг источника радиусом в 2', разрешение кривой блеска составило 10 мс.

### Профиль вспышки и переход в мягкое состояние

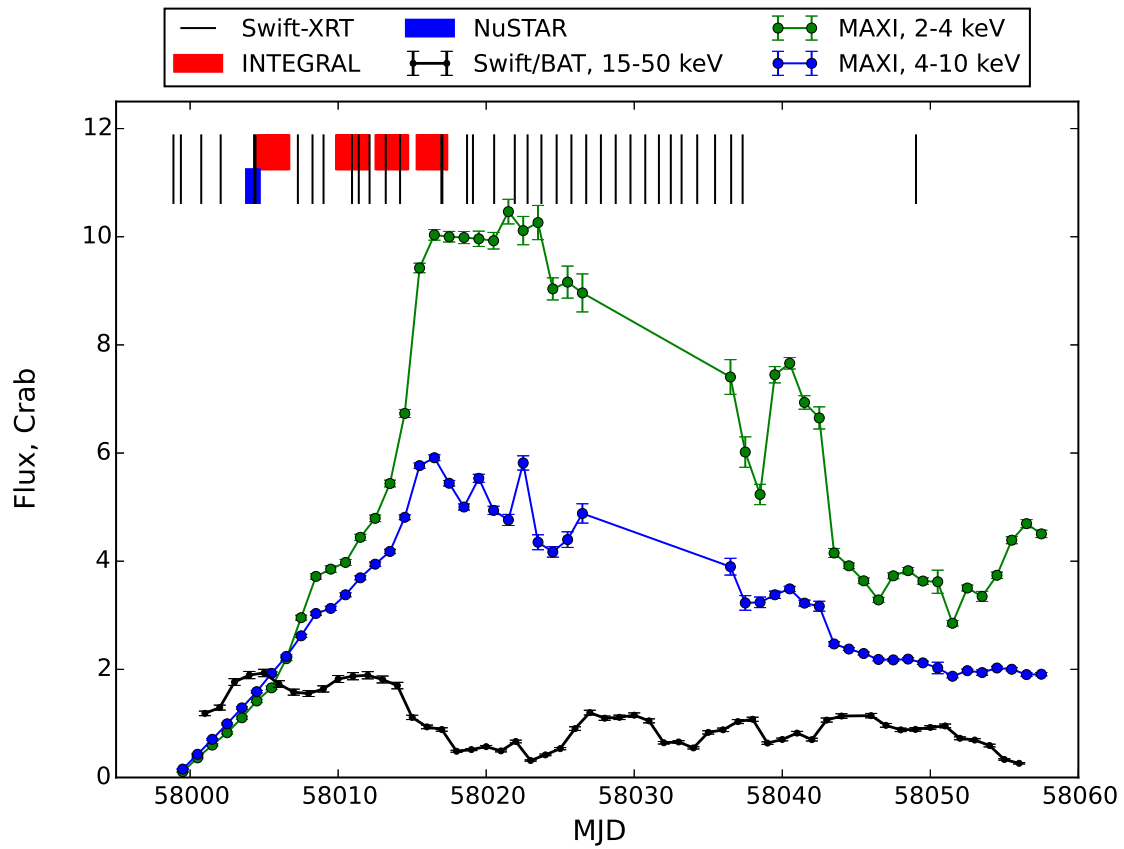
Общий профиль вспышки в мягком рентгеновском диапазоне (2–4 и 4–10 кэВ по данным *MAXI* и в жестком (15–50 кэВ, по данным *Swift-BAT*) приведены на Рис. 1. Хорошо видно, что фаза роста вспышки продолжалась в мягком диапазоне вплоть до MJD 58015 (примерно 16 дней), тогда как рост в жестком диапазоне был гораздо более быстрым и занял всего около пяти дней. Переход из жесткого состояния в мягкое произошел около MJD 58015. В этом легко убедиться исходя из спектров мощности, наблюдений *Swift-XRT* от MJD 58014 и MJD 58017 (ObsID 00010264010 и 00088245002, соответственно). На Рис. 2 хорошо заметно, что спектр мощности, характерный для жесткого состояния, с ярковыраженным низкочастотным шумом и КПО, сменяется плоским спектром мощности без каких-либо особенностей, характерным для мягкого состояния. Таким образом, вся фаза роста вспышки заняла примерно 16 дней. Поскольку нас интересуют именно НЧ КПО С-типа, то мы не будем рассматривать дальнейшие данные.

### НЧ КПО

Мы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

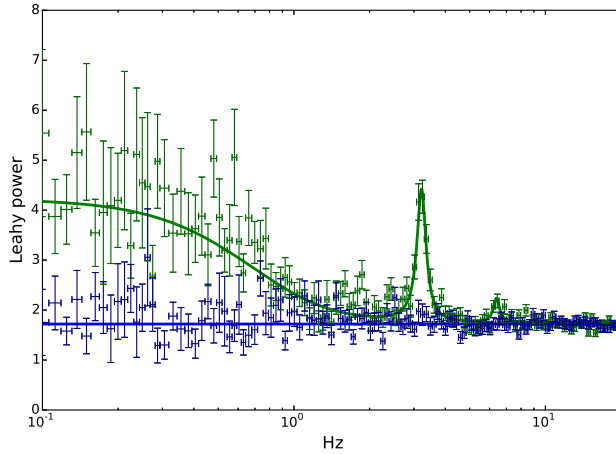
1. Бандиопадхуай и др. (R. Bandyopadhyay, T. Shahbaz, P. A. Charles, M. H. van Kerkwijk, and T. Naylor), MNRAS. **285**, 718 (1997).



**Рис. 1.** Кривая блеска MAXI J1535-571. Черными точками показан поток в диапазоне 15–50 кэВ по данным *Swift-BAT*, зелеными и синими - данные *MAXI* в диапазонах 2–4 и 4–10 кэВ, соответственно. Красными линиями указаны наблюдения обсерватории *INTEGRAL*, черными и синими наблюдения телескопов *Swift-XRT* и *NuSTAR*.

Таблица. НЧ КПО в MAXI J1535-571,

Instrument	ObsId	observation start MJD	observation end MJD	QPO frequency Hz
<i>Swift-XRT</i>	00010264003	58004.28	58004.36	$0.42 \pm 0.02$
<i>IBIS</i>	1860/02..06	58004.53	58004.75	$0.23 \pm 0.01$
<i>IBIS</i>	1860/07..11	58004.75	58004.96	$0.24 \pm 0.01$
<i>IBIS</i>	1860/12..16	58004.96	58005.18	$0.28 \pm 0.02$
<i>IBIS</i>	1860/17..21	58005.18	58005.39	$0.37 \pm 0.01$
<i>IBIS</i>	1860/22..26	58005.39	58005.63	$0.45 \pm 0.01$
<i>IBIS</i>	1860/27..31	58005.63	58005.88	$0.53 \pm 0.01$
<i>IBIS</i>	1860/32..37	58005.89	58006.14	$0.68 \pm 0.02$
<i>IBIS</i>	1860/38..42	58006.14	58006.36	$0.89 \pm 0.02$
<i>IBIS</i>	1860/43..47	58006.36	58006.57	$1.03 \pm 0.01$
<i>Swift-XRT</i>	00010264004	58007.27	58007.29	$1.87 \pm 0.03$
<i>Swift-XRT</i>	00010264005	58008.26	58008.27	$2.15 \pm 0.02$
<i>Swift-XRT</i>	00010264007	58009.01	58009.02	$2.67 \pm 0.03$
<i>Swift-XRT</i>	00010264006	58010.93	58010.94	$2.22 \pm 0.03$
<i>Swift-XRT</i>	00010264008	58011.39	58011.40	$2.32 \pm 0.03$
<i>Swift-XRT</i>	00010264009	58012.12	58012.13	$2.29 \pm 0.02$
<i>Swift-XRT</i>	00088245001	58013.18	58013.20	$2.59 \pm 0.02$
<i>Swift-XRT</i>	00088245001	58013.24	58013.25	$2.89 \pm 0.06$
<i>Swift-XRT</i>	00010264010	58014.18	58014.19	$3.22 \pm 0.04$



**Рис. 2.** Спектры мощности MAXI J1535-571 по данным *Swift-XRT*. Зеленые точки и кривая - наблюдение от MJD 58014, до перехода в мягкое состояние, синие - от MJD 58017, после. На спектре мощно до перехода хорошо виден низкочастотный широкополосный шум и два пика КПО, соответствующих фундаментальной частоте и второй гармонике.

2. Барроус и др. (D. N. Burrows, J. E. Hill, J. A. Nousek, A. A. Wells, A. D. Short, R. Willingale, et al.), in K. A. Flanagan and O. H. Siegmund (eds.), X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy XI, Vol. 4140 of Proc. of the SPIE, pp 64–75 (2000).
3. Бартелми и др. (S. D. Barthelmy, L. M. Barbier, J. R. Cummings, E. E. Fenimore, N. Gehrels, D. Hullinger, et al.), Space Science Reviews **120**, 143 (2005).
4. Беллони и др. (T. M. Belloni), in T. Belloni (ed.), Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag, Vol. 794 of Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag, p. 53 (2010).
5. Винклер и др. (C. Winkler, T. J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Giménez, S. Grebenev, et al.), Astron. Astrophys. **411**, L1 (2003).
6. Виньяндс и др. (R. Wijnands and M. van der Klis), Astrophys. J. **514**, 939 (1999).
7. Гребенев и др. (S. A. Grebenev, R. A. Sunyaev, and M. N. Pavlinsky), Advances in Space Research **19**, 15 (1997).
8. Динсер и др. (T. Dincer), The Astronomer's Telegram 10716 (2017).
9. Каселла и др. (P. Casella, T. Belloni, and L. Stella), Astrophys. J. **629**, 403 (2005).
10. Кеннеа и др. (J. A. Kennea), The Astronomer's Telegram 10731 (2017a).

11. Кеннеа и др. (J. A. Kennea, P. A. Evans, A. P. Beardmore, H. A. Krimm, P. Romano, K. Yamaoka, et al.), *The Astronomer's Telegram* 10700 (2017b).
12. Лунд и др. (N. Lund, C. Budtz-Jørgensen, N. J. Westergaard, S. Brandt, I. L. Rasmussen, A. Hornstrup, et al.), *A&A* **411**, L231 (2003).
13. Матсуока и др. (M. Matsuoka, K. Kawasaki, S. Ueno, H. Tomida, M. Kohama, M. Suzuki, et al.), *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61**, 999 (2009).
14. Мереминский и др. (I. A. Mereminskiy and S. A. Grebenev), *The Astronomer's Telegram* 10734 (2017).
15. Миллер и др. (J. M. Miller, J. Homan, and G. Miniutti), *The Astrophysical Journal Letters* **652(2)**, L113 (2006a).
16. Миллер и др. (J. M. Miller, J. Homan, D. Steeghs, M. Rupen, R. Hunstead, R. Wijnands, et al.), *The Astrophysical Journal* **653(1)**, 525 (2006b).
17. Миллер и др. (J. M. Miller, J. A. Tomsick, M. Bachetti, D. Wilkins, S. E. Boggs, F. E. Christensen, et al.), *Astrophys. J. (Letters)* **799**, L6 (2015).
18. Накахира и др. (S. Nakahira, H. Negoro, T. Mihara, W. Iwakiri, M. Sugizaki, M. Shidatsu, et al.), *The Astronomer's Telegram* 10729 (2017).
19. Негоро и др. (H. Negoro, M. Kohama, M. Serino, H. Saito, T. Takahashi, S. Miyoshi, et al.), *Publications of the Astronomical Society of Japan* **68**, S1 (2016).
20. Негоро и др. (H. Negoro, M. Ishikawa, S. Ueno, H. Tomida, Y. Sugawara, N. Isobe, et al.), *The Astronomer's Telegram* 10699 (2017).
21. Рассел и др. (T. D. Russell, J. C. A. Miller-Jones, G. R. Sivakoff, A. J. Tetarenko, and Japcot Xrb Collaboration), *The Astronomer's Telegram* 10711 (2017).
22. Рейс и др. (R. C. Reis, J. M. Miller, A. C. Fabian, E. M. Cackett, D. Maitra, C. S. Reynolds, et al.), *MNRAS* **410**, 2497 (2011).
23. Ремиллард и др. (R. A. Remillard and J. E. McClintock), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **44**, 49 (2006).
24. Скаринги и др. (S. Scaringi and ASTR211 Students), *The Astronomer's Telegram* 10702 (2017).
25. Стелла и др. (L. Stella and M. Vietri), *Astrophys. J. (Letters)* **492**, L59 (1998).
26. Танака и др. (Y. Tanaka and N. Shibasaki), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **34**, 607 (1996).
27. Тетаренко и др. (A. J. Tetarenko, T. D. Russell, J. C. A. Miller-Jones, G. R. Sivakoff, and Japcot Xrb Collaboration), *The Astronomer's Telegram* 10745 (2017).
28. Убертини и др. (P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A. J. Bird, K. Broenstad, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L131 (2003).
29. Фюрст и др. (F. Fürst, M. A. Nowak, J. A. Tomsick, J. M. Miller, S. Corbel, M. Bachetti, et al.), *Astrophys. J.* **808(2)**, 122 (2015).
30. Харрисон и др. (F. A. Harrison, W. W. Craig, F. E. Christensen, C. J. Hailey, W. W. Zhang, S. E. Boggs, et al.), *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).