

ЗВЕЗДЫ ТИПА γ CAS: ПЕРЕМЕННОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Холтыгин А.Ф.¹, Рыспаева Е.Б.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Республика Крым, Россия

γ CAS TYPE STARS: OPTICAL AND X-RAY VARIABILITY

Kholtygin A.F.¹, Ryspaeva E.B.²

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory RAS, Republic of Crimea, Russia

The γ Cas type stars are a small group of Be stars with unusually hard X-ray emission and high X-ray luminosity $L_X \sim 10^{31} - 10^{33}$ erg/s, which is 2–3 orders higher than that for typical Be stars, but lower than that for massive X-ray binaries with Be components. These stars are also characterized by an unusually hard spectrum compared to ordinary Be stars. The paper presents the results of the spectral and photometric variability analysis of γ Cas stars in both the optical and X-ray ranges. The periods of the regular components of the optical and X-ray variability are close. This allows us to conclude that the X-rays formed significantly as a result of the interaction of the local magnetic fields of Be stars with the magnetic field of their decretion disk. X-ray emission resulting from magnetic field line reconnection has a flare character. Thousands flare events were identified for BZ Cru and π Aqr stars in their XMM's X-ray light curves. Regular variations in X-ray brightness with periods of 50–90 seconds have been detected for γ Cas, HD 45314, HD 45995, NGC 6649 9 and V558 Lyr stars may be identified with the rotation periods of white dwarfs in Be+WD binaries. It is suggested that the hard part of the X-rays from γ Cas type stars is generated in result the accretion of disk matter onto a rapidly rotating white dwarf.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-335-338>

1. Введение

Звезды типа γ Cas являются выделенной группой Be звезд с рентгеновской светимостью на 2–3 порядка выше, чем у обычных Be звезд, и аномально высокой с $kT \sim 10 - 20$ кэВ и выше температурой плазмы, излучающей в рентгеновской области спектра. Оптические спектры звезд этого типа γ Cas не отличаются от спектров других Be звезд. Звезды типа γ Cas обладают декреционными кеплеровскими дисками, в которых формируются линии излучения в их оптических спектрах [1].

Есть несколько гипотез о формировании рентгеновского излучения звезд этой группы звезд. Postnov et al. [2] предположили, что рентгеновское излучение – результат аккреции вещества Be звезды на нейтронную звезду в режиме пропеллера, или происходит на магнитный белый карлик согласно Nagauchi et al. [3]. Аккреция на белый карлик как причина формирования рентгеновского излучения звезд типа γ Cas рассматривается Gies et al. [4].

Возможный вклад нетеплового рентгеновского излучения в спектры звезд типа γ Cas рассмотрен в статье [5]. Согласно Robinson et al. [6], генерация рентгеновского излучения может также происходить при взаимодействии локальных магнитных полей Ве звезды с диском, а Smith et al. [7] считал этот механизм основным процессом формирования рентгеновского излучения звезд типа γ Cas. Сравнение переменности оптических и рентгеновских спектров звезд типа γ Cas позволяет пролить свет на природу их рентгеновского излучения.

2. Переменность профилей линий видимого спектра

Для исследования переменности профилей линий были проанализированы разностные профили

$$d(V, t_i) = F_i(V) - \overline{F}_i(V), \quad (1)$$

где $F_i(V)$ – нормированный на континуум поток в линии в спектре с номером i , соответствующий доплеровскому смещению V , а $\overline{F}_i(V)$ – средний по всем наблюдениям поток в линии. Зависимость разностных профилей линий в спектре звезды типа γ Cas V558 Lyr, полученных 18 апреля 2024 г. на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ, представлена на рис. 1 (слева).

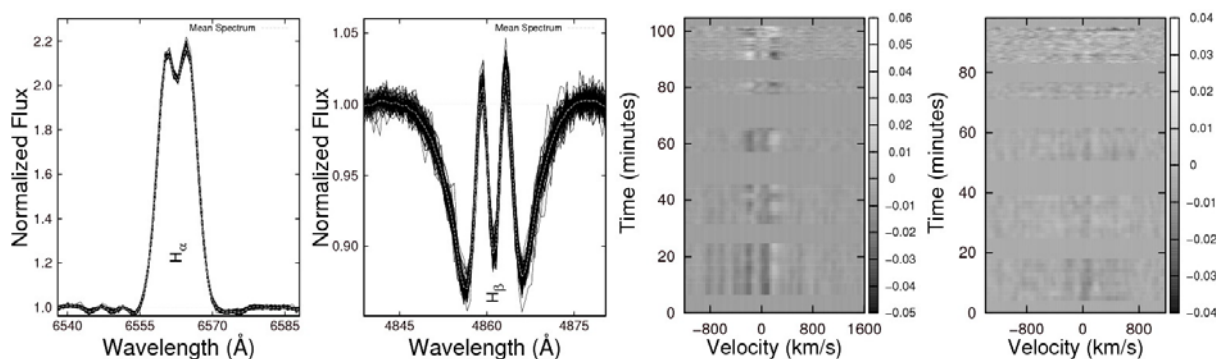


Рис. 1. Слева: Профили линий H α и H β в спектре V558 Lyr. Пунктир – средние профили. Справа: Динамические спектры вариаций данных профилей линий.

Фурье-анализ методом CLEAN [8] временных рядов этих разностных профилей линии, соответствующих всем моментам наблюдений t_i , показал присутствие регулярных компонентов вариаций профилей линий в спектре звезды с периодами от 1 до 22 минут. В таблице приведены периоды найденных регулярных компонент вариаций профилей. В последней строке таблицы приведены соответствующие уровни значимости α .

Таблица. Регулярные компоненты вариаций профилей линий в спектре V558 Lyr.

Номер Комп.	1	2	3	4
P, минут	1.22 ± 0.02	1.77 ± 0.03	5.00 ± 0.25	21.2 ± 4.6
α	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-4}

Подобные вариации профилей с периодами от 2 до 90 минут и амплитудами в 0.5–2% от уровня континуума были обнаружены нами и у других звезд типа γ Cas: самой γ Cas [9], π Aqr [10], HD 45995 [11] и SAO 49725 [12].

4. Рентгеновская переменность

Анализ рентгеновских спектров и рентгеновских кривых блеска звезд типа γ Cas позволяют выяснить связь их оптической и рентгеновской переменности. К настоящему времени получено несколько десятков рентгеновских кривых блеска звезд типа γ Cas по наблюдениям на XMM, Chandra и других рентгеновских спутниках.

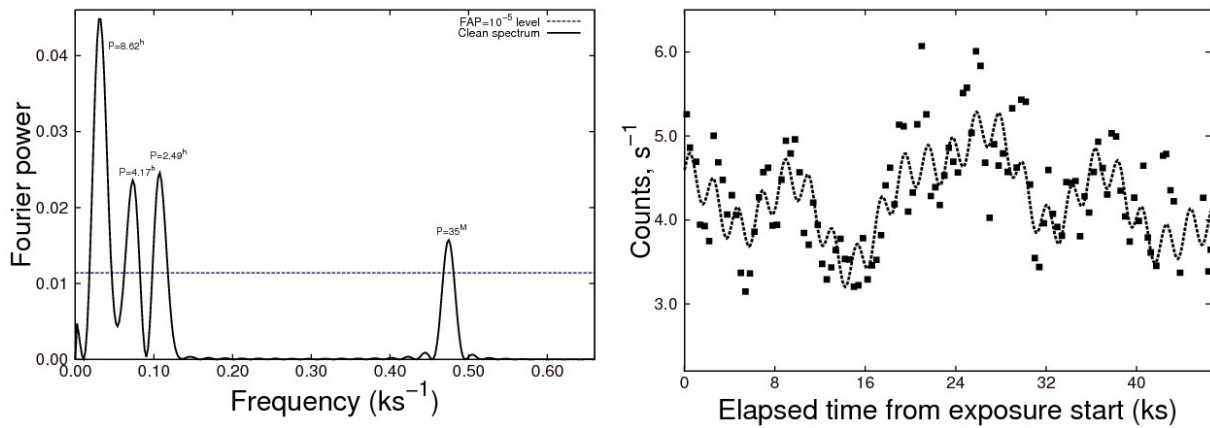


Рис. 2. Слева: Фурье-спектр рентгеновских кривых блеска π Aqr по наблюдениям на спутнике XMM 17.11.2013 (ID 0720390701). Пунктирная кривая соответствует уровню значимости $\alpha = 10^{-5}$. Справа: аппроксимация рентгеновской кривой блеска π Aqr (квадраты) периодическими компонентами, показанными на левой панели (пунктир).

Нами выполнен анализ рентгеновских кривых блеска этих звезд методом CLEAN Фурье-анализа. Для иллюстрации приведем на рис. 2 (слева) Фурье-спектр рентгеновских кривых блеска π Aqr, по наблюдениям на XMM 17.11.2013. Анализ этого наблюдения методом CLEAN дает 4 регулярных компонент с периодами от 8 ч 37 минут до 35 минут, как показано на рис. 2 (слева). Анализ рентгеновских кривых блеска других звезд типа γ Cas показывает присутствие регулярных компонентов с близкими к найденным для π Aqr периодами [13].

Рентгеновские потоки всех анализируемых нами звезд типа γ Cas переменны на шкалах времени от нескольких минут до 5–6 часов и соответствуют характерным временам переменности в оптическом спектре [10–14] и типичным периодам нерадиальных пульсаций Be звезд [15]. Соответствие периодов оптической и рентгеновской переменности звезд типа γ Cas показывает, что рентгеновское и оптическое излучение генерируются, по крайней мере, частично, в одной пространственной области. Так как оптическое излучение образуется либо на самой Be звезде, либо в околозвезд-

ном декреционном диске, то рентгеновское излучение звезд данного типа формируется либо там же, либо в области между диском и фотосферой звезды.

Из сравнения периодов переменности оптического и рентгеновского излучения звезд типа γ Cas можно сделать вывод о значимом вкладе предложенного в статье [8] механизма генерации рентгеновского излучения звезд типа γ Cas при взаимодействии локальных магнитных полей Ве звезды с декреционным диском в полное рентгеновское излучение этих звезд.

В обзоре Naze et al. (2022) показано, что большая часть звезд типа γ Cas являются широкими двойными системами с массой спутника порядка одной массы Солнца. Этот факт свидетельствует в пользу предположения Gies et al. (2023), что все звезды этого типа являются Ве+WD двойными системами. При этом аккреция вещества декреционного диска на белый карлик приводит к генерации жесткой части рентгеновского излучения звезд типа γ Cas.

Настоящее исследование поддержано грантом РНФ 23-22-00090.

Литература

1. Naze Y., C. Motch, G. Rauw, et al. // MNRAS, 2020, **493**, 2511.
2. Postnov K., L. Oskinova, J.M. Torreon // MNRAS, 2017, **465**, L119.
3. Hamaguchi K., L. Oskinova, C.M.P. Russell, et al. // ApJ, 2016, **832**, 140.
4. Gies D.R., L. Wang, R. Klement // ApJ, 2023, **942**, L6.
5. Ryspaeva E., Kholtygin A. // Open Astronomy, 2021, **30**, 132.
6. Robinson R.D., M.A. Smith, G.W. Henry // ApJ, 2002, **575**, 435.
6. Smith M.A., R. Lopes de Oliveira, C. Motch // Adv. Space Res., 2016, **58**, 782.
8. Roberts D.H., J. Lehar, J.W. Dreher // Astron. J., 1987, **93**, 968.
9. Kholtygin A.F., M.A. Burlak, O.A. Tsiopa // Astron. Tsirk., 2021, No. 1649.
10. Kholtygin A.F., M.A. Burlak, Yu.V. Milanova et al. // Astron. Tsirk., 2022, No. 1652.
12. Холтыгин А.Ф., И.А. Якунин, М.А. Бурлак и др. // Астроф. Бюлл., 2023, **78**, 586.
13. Холтыгин А.Ф., И.А. Якунин, В.С. Бухаринов, и др. // Астроф. Бюлл., 2024, **79**, 452.
14. Холтыгин А.Ф., Е.Б. Рыспаева, И.А. Якунин и др. // Научн. труды ИНАСАН, 2023, **8**, 86.
15. Rivinius Th., D. Baade, S. Stefl // A&A, 2003, **411**, 229.
16. Naze Y., G. Rauw, S. Czesla, et al. // MNRAS, 2022, **510**, 2286.
17. Gies D.R., L. Wang, R. Klement // ApJ, 2023, **942**, L6.