

4FGL J2054.2+6904: пульсар в тесной двойной звездной системе типа „redback“

© Д.А. Зюзин,¹ А.В. Карпова,¹ Ю.А. Шибанов,¹ М.Р. Гильфанов^{2,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Россия

³ Max-Planck-Institut für Astrophysik,
D-85741 Garching, Germany
e-mail: da.zyuzin@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Гамма-источник 4FGL J2054.2+6904, открытый обсерваторией Fermi, был недавно классифицирован как кандидат в пульсары. С помощью обсерватории Swift была проведена его возможная рентгеновская и оптическая идентификация. В настоящей работе на основе данных обзора Zwicky нами показано, что кандидат на отождествление является переменным в оптическом диапазоне с периодом около 7.5 h. Форма кривых блеска близка к синусоидальной, с амплитудой $\approx 0.5^m$. Распределение энергии по спектру соответствует звездному спектру с эффективной температурой 5820 ± 410 K. Мы также уверенно детектировали рассматриваемый объект в данных рентгеновского обзора всего неба, полученного телескопом SRG/eROSITA. Его рентгеновский спектр может быть описан степенным законом с фотонным индексом около 1.0 и исправленным за межзвездное поглощение потоком $\approx 2 \cdot 10^{-13}$ erg/(s·cm²) в диапазоне 0.5–10 keV. Эти результаты показывают, что 4FGL J2054.2+6904 является перспективным кандидатом в миллисекундные пульсары в тесной двойной звездной системе типа „redback“.

Ключевые слова: нейтронные звезды, двойные звездные системы, миллисекундные пульсары.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56816.f227-23

Введение

Миллисекундные пульсары (МСП) — это подкласс пульсаров, имеющих периоды вращения менее 30 ms. Большой интерес представляют „пульсары–пауки“ — МСП в тесных двойных системах с орбитальным периодом менее дня и маломассивным компаньоном, у которого сторона, обращенная к пульсару, нагревается и испаряется под действием пульсарного ветра. Выделяют „черных вдов“ (black widow, BW) и „красноспинных пауков“ (redback, RB) [1]. В качестве компаньонов у RB выступают невырожденные звезды с массой $M_c \approx 0.1-1M_\odot$, а у BW — частично вырожденные звезды с массой $M_c < 0.05M_\odot$. Испаренное вещество в ряде таких систем приводит к регулярным затмениям сигнала от пульсара.

Гамма-источник 4FGL J2054.2+6904 (далее J2054), открытый обсерваторией Fermi, недавно был классифицирован как кандидат в пульсары [2]. С помощью обсерватории Swift была проведена его возможная рентгеновская и оптическая идентификация. В настоящей работе мы кратко описываем результаты анализа ранее не использованных архивных оптических и рентгеновских данных, проясняющих природу данного источника.

1. Анализ оптических данных

Мы обнаружили (подробности даны в работе [3]), что кандидат на отождествление J2054 присутствует в данных оптических каталогов Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) [4], Zwicky Transient Facility (ZTF) [5], Gaia [6] и Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) [7]. Его координаты R.A = 20:53:58.99298(7) и Dec. = +69:05:19.7063(5). Звездные величины, взятые из каталога Pan-STARRS, составляют $g = 20.8$, $r = 20.1$, $i = 19.7$, $z = 19.6$ и $y = 19.4$, а эффективная температура $T_{\text{eff}} = 5820 \pm 410$ K [7]. Согласно каталогу Gaia и работе [8], минимальное расстояние до объекта составляет 1.5 кpc, а максимальное — 5.3 кpc.

Каталог ZTF содержит достаточное количество оптических измерений для проведения временного анализа. Мы использовали данные в полосе r , где имеется наибольшее количество точек, и метод Ломба–Скаргла [9,10] для поиска периодичности. Наибольший пик в периодограмме соответствует периоду около 7.5 h (рис. 1). Кривые блеска в полосах g и r , свернутые с найденным периодом, представлены на рис. 2.

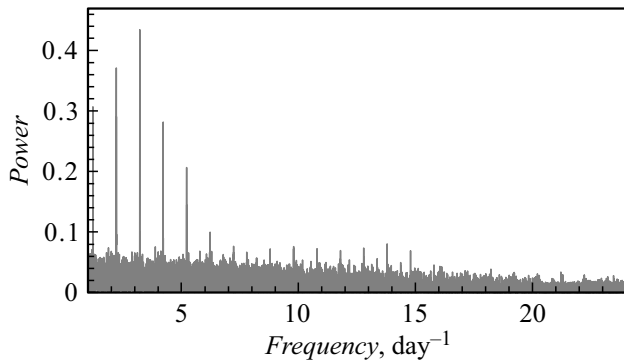


Рис. 1. Периодограмма Ломба–Скаргла кривой блеска J2054, полученная по данным ZTF в полосе r .

2. Анализ рентгеновских данных

Как уже было указано, кандидат на рентгеновское отождествление J2054 был детектирован в данных обсерватории Swift. Мы также обнаружили его в рентгеновском обзоре всего неба, проведенным телескопом SRG/eROSITA [11].

Для извлечения спектра из данных Swift мы использовали инструменты, доступные на сайте телескопа [12,13]. Полученный спектр содержал 32 отсчета от источника в диапазоне 0.3–10 keV и был сгруппирован так, чтобы содержать хотя бы один отсчет в спектральном канале. В случае eROSITA было получено 64 отсчета от источника, сгруппированных так, чтобы на спектральный канал приходилось не меньше трех отсчетов.

Мы аппроксимировали оба спектра одновременно, используя C -статистику [14] в диапазоне 0.3–10 keV. Для учета межзвездного поглощения была использована

модель tbabs с химическим составом wilm [15]. Мы использовали избыток цвета для J2054 $E(B-V) = 0.37$, полученный согласно карте поглощения [16], и соотношение из работы [17], чтобы получить величину лучевой концентрации поглощающего водорода N_{H} , составившей $3.3 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$. Это значение было зафиксировано во время процедуры аппроксимации. Мы обнаружили, что спектр может быть хорошо описан степенным законом с фотонным индексом $\Gamma = 1.0 \pm 0.3$ и исправленным за поглощение потоком в диапазоне 0.5–10 keV $F_X = 1.7_{-0.3}^{+0.5} \cdot 10^{-13} \text{ erg}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ (неопределенности соответствуют доверительному интервалу 68%).

3. Обсуждение

Как показали данные каталога ZTF, кандидат на оптическое отождествление J2054 является переменным с периодом около 7.5 h, который мы можем интерпретировать как орбитальный период двойной системы. Данное значение подходит для систем RB и BW [18,19].

Полученные оптические кривые блеска близки к синусоидальным, наблюдается один широкий пик за период. Кривые блеска „пульсаров-пауков“ могут показывать как один, так и два пика за период. Два пика объясняются деформацией звезды-компаньона под действием приливных сил, в результате чего она приобретает вытянутую форму. Изменение блеска происходит вследствие того, что при движении по орбите изменяется видимая площадь поверхности звезды. Один пик за период возникает тогда, когда эффект облучения компаньона пульсарным ветром оказывается более значимым, чем его деформация. Тогда максимум кривой блеска соответствует нагретой стороне компаньона, повернутой к пульсару, а минимум — более холодной противоположной

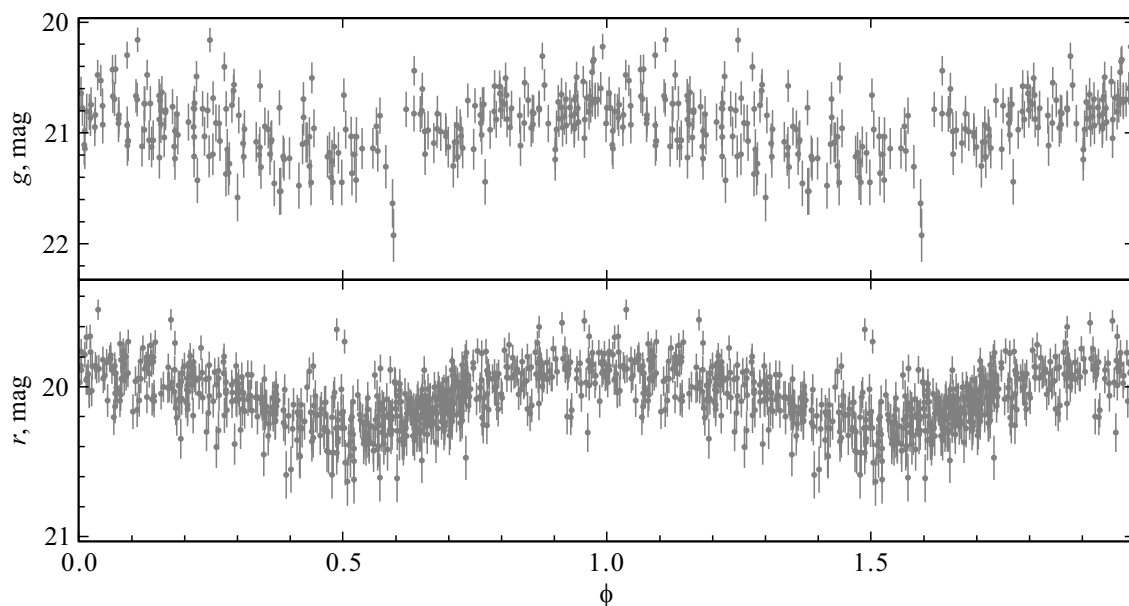


Рис. 2. Изменение блеска кандидата на оптическое отождествление J2054 в зависимости от орбитальной фазы ϕ по данным ZTF в полосах g и r .

стороне (например, [19]). Вариации блеска кандидата на отождествление J2054 составляют примерно 0.5^m . Такая амплитуда переменности более типична для RB, у которых амплитуда обычно $< 1^m$, тогда как для BW — $2-4^m$ [20].

Температура оптического источника, согласно каталогу Gaia, $T_{\text{eff}} = 5820 \pm 410$ K, что соответствует примерно спектральному классу G1. Такие температуры наблюдаются у звезд-компаньонов в системах RB и BW [18,20].

Рентгеновский спектр кандидата на отождествление J2054 может быть описан степенным законом, что типично для „пульсаров–пауков“ [18,19]. Это нетепловое излучение объясняется ускорением частиц ударной волной, возникающей при взаимодействии пульсарного ветра и звездного ветра компаньона. Может наблюдаться орбитальная модуляция рентгеновского излучения, однако малое число отсчетов в случае J2054 не позволяет это проверить. Измеренный поток в диапазоне 0.5–10 keV для имеющейся оценки расстояния 1.5–5.3 кpc соответствует светимости $L_X = (0.4-7.4) \cdot 10^{32}$ erg/s. Подобные значения более типичны для систем RB, чем BW, также как и полученный фотонный индекс $\Gamma = 1.0 \pm 0.3$ [19].

Заключение

Мы обнаружили возможное оптическое отождествление гамма-источника J2054. Согласно оптическим и рентгеновским свойствам источника, J2054 является многообещающим кандидатом в двойные звездные системы типа „redback“. Для подтверждения этого необходимо получить более качественные кривые блеска в нескольких полосах и провести их моделирование для определения параметров системы: масс компонент, наклона орбиты, степени заполнения полости Роша компаньоном и эффективность облучения пульсарным ветром.

Финансирование работы

Исследование Д.А. Зюзина и А.В. Карповой выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00048, <https://rscf.ru/project/22-12-00048/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.S.E. Roberts. *Proceed. Intern.l Astronom. Union*, **8(S291)**, 127 (2013). DOI: 10.1017/S174392131202337X
- [2] S. Kerby, A. Kaur, A.D. Falcone, R. Eskenasy, F. Hancock, M.C. Stroh, E.C. Ferrara, P.S. Ray, J.A. Kennea, E. Grove. *ApJ*, **923**, 75 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/ac2e91
- [3] A.V. Karpova, D.A. Zyuzin, Yu.A. Shibanov, M.R. Gilfanov. *MNRAS*, **524**, 3020 (2023). DOI: 10.1093/mnras/stad1992
- [4] H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, J.N. Heasley, C. Holmberg, M.E. Huber, W. Sweeney, C.Z. Waters, A. Calamida, S. Casertano, X. Chen, D. Farrow, G. Hasinger, R. Henderson, K.S. Long, N. Metcalfe, G. Narayan, M.A. Neto-Santisteban, P. Norberg, A. Rest, R.P. Sagla, A. Szalay, A.R. Thakar, J.L. Tonry, J. Valenti, S. Werner, R. White, L. Denneau, P.W. Draper, K.W. Hodapp, R. Jedicke, N. Kaiser. *ApJS*, **251**, 7 (2020). DOI: 10.3847/1538-4365/abb82d
- [5] F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkewta, R. Beck, D. Flynn, S. Terek, W. Landry, E. Hacopian, V. Desai, J. Howell, T.-Brooke, D. Imel, S. Wachter, Q.-Z. Ye, H.-W. Lin, S.B. Cenko, V. Cunningham, U. Rebbapragada, B. Bue, A.A. Miller, A. Mahabal, E.C. Bellm, M.T. Patterson, M. Juri c, V.Z. Golkhou, E.O. Ofek, R. Walters, M. Graham, M.M. Kaslwal, R.G. Dekany, T. Kuper, K. Burdge, Ch.B. Cannella, T. Barlow, A. Van Sistine, M. Giomi, Ch. Fremling, N. Blagorodnova, D. Levitan, R. Riddle, R.M. Smith, G. Helou, Th.A. Prince, Sh.R. Kulkarni. *PASP*, **131**, 018003 (2019). DOI: 10.1088/1538-3873/aae8ac
- [6] Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne et al. *A&A* (2022) DOI: 10.1051/0004-6361/202243940
- [7] M. Paegert, K.G. Stassun, K.A. Collins, J. Pepper, G. Torres et al. Preprint, arXiv:2108.04778 (2021). DOI: 10.48550/arXiv.2108.04778
- [8] C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, R. Andrae. *AJ*, **161**, 147 (2021). DOI: 10.3847/1538-3881/abd806
- [9] N.R. Lomb. *Ap&SS*, **39**, 447 (1976). DOI: 10.1007/BF00648343
- [10] J.D. Scargle. *ApJ*, **263**, 835 (1982). DOI: 10.1086/160554
- [11] R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babushkin, A. Bogomolov, K. Borisov. *A&A*, **656**, A132 (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202141179
- [12] P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, O. Godet, L. Vetere, J. Racusin, M.R. Goad, K. Wiersema, L. Angelini, M. Capaldi, G. Chincarini, N. Gehrels, J.A. Kennea, R. Margutti, D.C. Morris, C.J. Mountford, C. Pagani, M. Perri, P. Romano, N. Tanvir. *MNRAS*, **397**, 1177 (2009). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.14913.x
- [13] *Build Swift-XRT products* [Электронный ресурс]. URL: https://www.swift.ac.uk/user_objects/
- [14] W. Cash. *ApJ*, **228**, 939 (1979) DOI: 10.1086/156922
- [15] J. Wilms, A. Allen, R. McCray. *ApJ*, **542**, 914 (2000) DOI: 10.1086/317016
- [16] G.M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, D. Finkbeiner. *ApJ*, **887**, 93 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab5362
- [17] D.R. Foight, T. Güver, F. Özel, P.O. Slane. *ApJ*, **826**, 66 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/826/1/66
- [18] J. Strader, S. Swihart, L. Chomiuk, A. Bahramian, C. Britt, Ch. Britt, C.C. Cheung, K. Dage, J. Halpern, K.-L. Li, R.P. Mignani, J.A. Orosz, M. Peacock, R. Salinas, L. Shishkovsky, E. Tremou. *ApJ*, **872**, 42 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/aafbaa
- [19] S.J. Swihart, J. Strader, L. Chomiuk, E. Aydi, K.V. Sokolovsky, P.S. Ray, M. Kerr. *ApJ*, **941**, 199 (2022). DOI: 10.3847/1538-4357/aca2ac
- [20] P. Draghis, R.W. Romani, A.V. Filippenko, T.G. Brink, W. Zheng, J.P. Halpern, F. Camilo. *ApJ*, **883**, 108 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab378b