

Оптические исследования компаньона миллисекундного пульсара типа „redback“ J1908+2105

© Д.М. Бероня,¹ А.Ю. Кириченко,^{1,2} С.В. Жариков,² А.В. Карпова,¹ Д.А. Зюзин,¹ Ю.А. Шибанов¹

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

² Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México Apdo. Postal 877,
22800 Baja California, México
e-mail: daria.beronya@gmail.com

Поступило в Редакция 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 25 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Миллисекундный радио- и гамма-пульсар J1908+2105 в двойной системе предположительно относится к классу „redback“. Его возможный компаньон был обнаружен в каталоге Gaia. С целью подтверждения компаньона и определения параметров системы был проведен ряд фотометрических наблюдений источника в полосах B , V , R и I , разрешенных по орбитальной фазе, на 2.1-метровом телескопе OAN-SPM в Мексике. Обнаружена переменность блеска с периодом 3.5 h, согласующимся с орбитальным периодом пульсара, подтвердив тем самым ассоциацию. Амплитуды переменности блеска составили примерно 0.2–0.3^m, что типично для систем типа „redback“. Проведены оптические спектральные наблюдения на 10-метровом Большом Канарском телескопе. Полученные спектры соответствуют звезде спектрального класса К-М.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56826.f236-23

Введение

„Пульсары-пауки“ представляют собой подкласс миллисекундных пульсаров (МСП) в тесных двойных системах с орбитальным периодом менее дня и мало-массивным компаньоном. Сторона звезды-компаньона, обращенная к пульсару, нагревается и испаряется под действием пульсарного ветра, а испаренное вещество может приводить к затмениям радиосигнала от пульсара. „Пульсары-пауки“ делятся на „красноспинных пауков“ (redback, RB), компаньонами которых являются невырожденные звезды с массой $\approx 0.1–1M_{\odot}$, и „черных вдов“ (black widow, BW), компаньоны которых частично выродившиеся звездные остатки с очень малой массой, $< 0.05M_{\odot}$ [1].

МСП J1908+2105 (далее J1908) был открыт на радиотелескопе Arecibo в ходе поиска пульсаций неидентифицированных гамма-источников, обнаруженных обсерваторией Fermi [2]. Позднее пульсации были детектированы и в гамма-диапазоне [3]. Период вращения пульсара составляет 2.56 ms, а орбитальный период системы — 3.5 h. J1908 предположительно относится к системам RB. Мера дисперсии $DM = 62 \text{ pc/cm}^3$ соответствует расстоянию 2.6–3.2 kpc в зависимости от выбора модели распределения свободных электронов в Галактике — YMW16 [4] или NE2001 [5].

Компаньон пульсара был отождествлен с оптическим источником, содержащимся в каталоге Gaia [6]. Чтобы подтвердить компаньон и определить параметры системы, мы провели ряд фотометрических наблюдений источника на 2.1-метровом телескопе OAN-SPM в Мексике. Также по нашей заявке были проведены оптические спектральные наблюдения на 10-метровом Большом

Канарском телескопе. Ниже описаны предварительные результаты анализа этих данных.

1. Фотометрические данные

Наблюдения на 2.1-метровом телескопе OAN-SPM проводились в 2018–2022 гг. Полученные данные представляли собой серии изображений с экспозициями по 600 s в полосах B , V , R и I . Обработка была произведена стандартным образом средствами пакета программ IRAF. Для поиска периодичности мы использовали алгоритм Ломба–Скаргла, позволяющий анализировать неравномерные временные ряды [7,8], и данные в полосах R и V , где было сделано наибольшее число измерений. Периодограмма (спектр мощности), полученная по данным в полосе R представлена на рис. 1. Самый высокий пик на ней соответствует периоду $3.51 \pm 0.04 \text{ h}$, который согласуется с орбитальным периодом J1908. Положения самых высоких пиков по

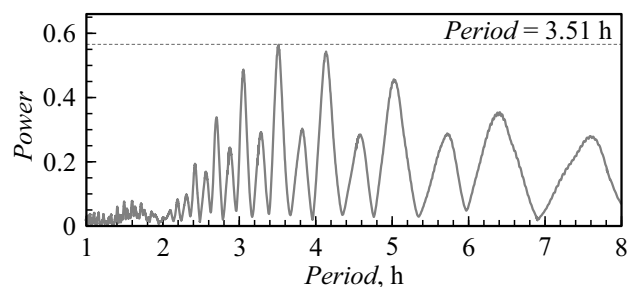


Рис. 1. Периодограмма Ломба–Скаргла, полученная для данных в полосе R . Самый высокий пик спектра мощности соответствует орбитальному периоду системы.

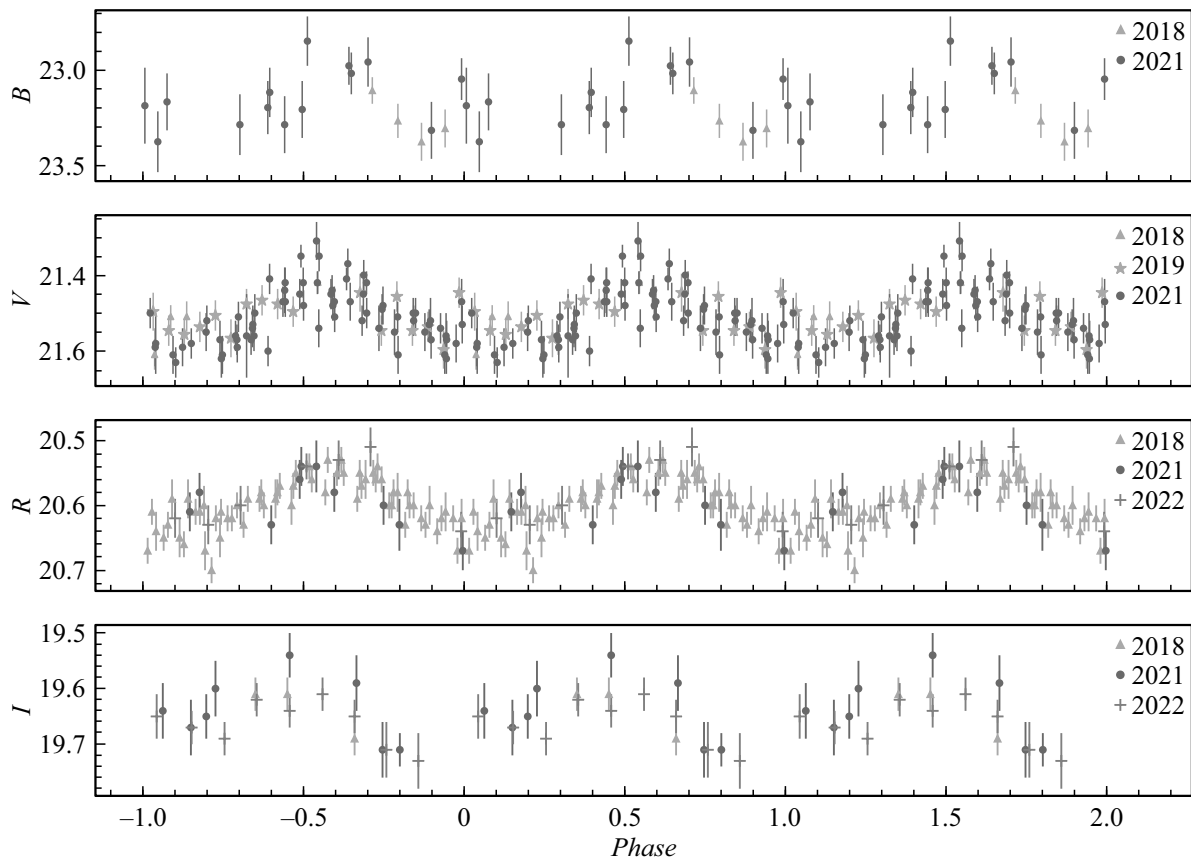


Рис. 2. Кривые блеска компаньона J1908 в полосах *BVRI* свернутые с орбитальным периодом системы по данным наблюдений 2018–2022 гг.

данным в разных полосах также согласуются в пределах ошибок с этим периодом. Кривые блеска, свернутые с данным периодом, показаны на рис. 2. Средние значения составили $B = 23.2^m$, $V = 21.5^m$, $R = 20.6^m$ и $I = 19.6^m$, а амплитуда переменности $\approx 0.2\text{--}0.3^m$.

2. Параметры распределения энергии по спектру

Учитывая малую амплитуду переменности, в качестве предварительного шага по звездной классификации компаньона уместно построить усредненное по времени спектральное распределение излучения по энергии. Чтобы покрыть максимально широкий спектральный диапазон мы дополнительно использовали для этого данные широкополосных наблюдений из каталогов Pan-STARRS [9] и Gaia [10], и провели их моделирование с помощью пакета ARIADNE [11]. Поскольку, как известно, оценка расстояния по мере дисперсии является неточной и может отличаться от истинного значения как в большую, так и меньшую сторону, мы решили использовать более широкий разброс расстояний D и определили параметры источника для 2 и 5 крс. Оценка межзвездного поглощения $E(B-V)$ была произведена с помощью

карты [12], при этом при моделировании $E(B-V)$ полагалось фиксированным для данного расстояния. Для $D = 2$ крс и $E(B-V) = 0.5^m$ мы получили эффективную температуру поверхности звезды $T_{\text{eff}} = 4600 \pm 250$ К, что соответствует звезде спектральных классов K3–K6, и радиус $R = 0.36 \pm 0.06 R_{\odot}$. Для $D = 5$ крс и $E(B-V) = 0.64^m$ получили $T_{\text{eff}} = 4900 \pm 300$ К (класс K1–K4) и $R = 0.9 \pm 0.1 R_{\odot}$.

3. Спектральные данные

Спектральные наблюдения компаньона J1908 были проведены на Большом Канарском телескопе в мае 2020 г. с использованием инструмента OSIRIS. Было получено 15 спектров с экспозициями по 815 s. Обработка была произведена стандартным образом средствами пакета программ IRAF. Усредненный по времени и нормированный на плотность спектрального потока в континууме спектр показан на рис. 3. Сравнение с эмпирическими моделями спектров карликов классов K5 и M1 [13] указывает на принадлежность объекта к звездам спектрального класса K–M, что согласуется с результатами моделирования распределения энергии по спектру. В спектрах мы обнаружили линии триплета Ca II и Mg I и дублета Na I, которые отмечены на рис. 3.

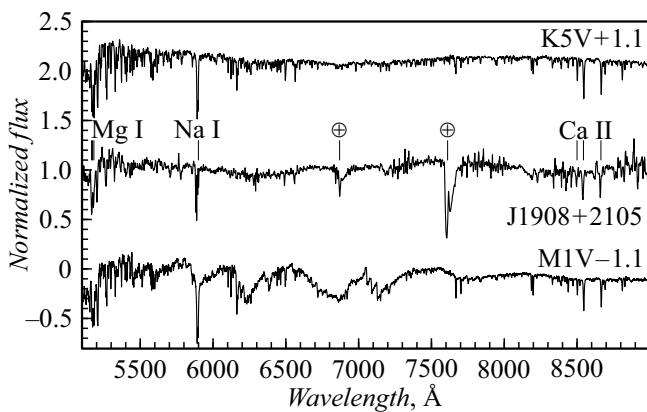


Рис. 3. Нормированный спектр компаньона J1908 и звезд спектральных классов K5V и M1V. Вертикальные линии показывают положение триплетов Mg I (5167, 5173 и 5183 Å) и Ca II (8498, 8542 и 8662 Å) и дублета Na I (~ 5900 Å).

4. Обсуждение

Совпадение установленного периода кривой блеска рассматриваемого оптического источника с орбитальным периодом J1908 подтверждает правильность взаимного отождествления этих объектов.

Оптические кривые блеска J1908 имеют форму, близкую к синусоидальной, с одним пиком на период. Максимум блеска соответствует моменту, когда компаньон обращен к наблюдателю стороной, нагретой пульсарным ветром, а минимум соответственно — более холодной обратной стороне (например, [14]). Амплитуды переменности в разных полосах составили примерно 0.2–0.3^m, что типично для систем типа RB, тогда как у BW амплитуды сильно больше, обычно 2–4^m [15].

Измеренное значение радиуса 0.3–1R_☉ также характерно для звезд-компаньонов в системах RB, в случае BW типичные радиусы ≈ 0.1R_☉ [16].

Обнаружение в спектре компаньона линий поглощения важно для измерения амплитуды его лучевых скоростей при движении по орбите. С учетом параметров, полученных в результате хронометрирования пульсара в радио- и гамма-диапазонах, это позволит оценить отношение масс пульсара и компаньона. Совместно с моделированием полученных кривых блеска мы сможем ограничить параметры системы, такие как наклонение орбиты, массы компонент, распределение температуры по поверхности компаньона, эффективность облучения пульсарным ветром, а также независимо оценить расстояние (см., например, [15,16]). Это, однако, выходит за рамки настоящей работы и будет вскоре опубликовано в отдельной статье.

Заключение

Мы провели фотометрические и спектральные наблюдения МСП в двойной системе J1908, предполагаемый

оптический компаньон которого был обнаружен в каталоге Gaia. Временной анализ данных показал, что период изменения блеска источника совпадает с орбитальным периодом пульсара, что доказывает его связь с пульсаром. Амплитуда переменности кривых блеска типична для систем типа RB. Оптические спектры источника и усредненное по времени распределение энергии излучения по спектру указывают на его принадлежность к спектральному классу K–M. Полученные данные будут использованы для детального моделирования кривых блеска и лучевых скоростей компаньона и ограничения параметров системы J1908.

Финансирование работы

Исследования Д.М. Берони, А.В. Карповой и Д.А. Зюзина выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00921, <https://rscf.ru/project/22-22-00921/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.S.E. Roberts. Proceedings of the International Astronomical Union, **8(S291)**, 127 (2013). DOI: 10.1017/S174392131202337X
- [2] H.T. Cromartie, F. Camilo, M. Kerr, J.S. Deneva, S.M. Ransom, P.S. Ray, E.C. Ferrara, P.F. Michelson, K.S. Wood. ApJ, **819**, 34 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/819/1/34
- [3] J.S. Deneva, P.S. Ray, F. Camilo, P.C.C. Freire, H.T. Cromartie, S.M. Ransom, E. Ferrara, M. Kerr, T.H. Bumett, P.M. Saz Parkinson. ApJ, **909**, 6 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/abd7a1
- [4] J.M. Yao, R.N. Manchester, N. Wang. ApJ, **835**, 29 (2017). DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/29
- [5] J.M. Cordes, T.J.W. Lazio. Preprint, arXiv:astro-ph/0207156 (2002). DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0207156
- [6] J. Strader, S. Swihart, L. Chomiuk, A. Bahramian, C. Britt, Ch. Britton, C.C. Cheung, K. Dage, J. Hapern, 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
- [7] N.R. Lomb. Ap&SS, **39**, 447 (1976). DOI: 10.1007/BF00648343
- [8] J.D. Scargle, ApJ, **263**, 835 (1982). DOI: 10.1086/160554
- [9] H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, J.N. Heasley, C. Holmberg et al. ApJS, **251**, 7 (2020). DOI: 10.3847/1538-4365/abb82d
- [10] G. 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
- [11] J.I. Vines, J.S. Jenkins. MNRAS, **513**, 2719 (2022). DOI: 10.1093/mnras/stac956
- [12] G.M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J.S. Speagle, D. Finkbeiner. ApJ, **887**, 93 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab5362

- [13] A.Y. Kesseli, A.A. West, M. Veyette, B. Harrison, D. Feldman, J.J. Bochanski. *ApJS*, **230**, 16 (2017).
DOI: 10.3847/1538-4365/aa656d
- [14] 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
- [15] 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
- [16] S. Zharikov, A. Kirichenko, D. Zyuzin, Yu. Shibanov, J.S. Deneva. *MNRAS*, **489**, 5547 (2019).
DOI: 10.1093/mnras/stz2475