

УДК 524.3

О температуре звездных пятен*И.Ю. Алексеев, Р.Е. Гершберг*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
ilya-alekseev@mail.ru

Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.

Аннотация. По многочисленным моделям зональной запятненности звезд с активностью солнечного типа получено аналитическое выражение для оценки температур звездных пятен по температурам невозмущенных фотосфер.**Ключевые слова:** Звезды: звездные пятна

Никакие неоднородности звездных поверхностей с Земли не видны. И само существование звездных пятен и их физические параметры удастся выяснить только с помощью тех или иных косвенных исследований. В первой количественной модели звездной запятненности по кривой блеска двойной системы красных карликов FF And Krzemiński (1969) “собрал” все неоднородности в одно пятно, поместил его в центр диска звезды и, постулируя температуру пятна на 350 К ниже температуры спокойной фотосферы, оценил его размер. В последующие годы были выполнены многочисленные работы с определением четырех параметров для звезд с предполагаемым одним пятном: координаты пятен, их размеры и температуры. Затем широкое применение нашли двухпятенные модели, когда после вычитания из кривой блеска эффекта первого пятна отыскивались параметры второго, и были попытки нащупать третье пятно. Однако это направление исследований оказалось тупиковым. Дело в том, что после установления физической идентичности активности вспыхивающих красных карликов и Солнца (Gershberg, Pikel’ner, 1972) следовало ожидать какое-то сходство и в характере запятненности этих объектов, тогда как указанные модели с главным и вторичным пятнами к картине солнечной запятненности ни в коей мере не приближались.

Первые уверенные статистические характеристики параметров пятен вспыхивающих красных карликов были получены в рамках предложенной и развитой в Крыму зональной модели запятненности звезд (Алексеев, Гершберг, 1996а, б, с, 1997). В этой модели предполагается, что – по аналогии с Солнцем – пятна располагаются на звездах вдоль двух полос, параллельных экватору, а вращение звезды с неравномерным распределением пятен по долготе дает фотометрический эффект, идентичный эффекту непрерывных полос запятненности с переменной шириной. И задача сводится к отысканию четырех параметров этих полос: их расстоянию от экватора, их ширине, параметру неоднородности по долготе и температуре. Из результатов первых расчетов зональных моделей, в частности, следовало, что запятненные области имеют температуры от 4000 К у звезд солнечного типа и 2500–3000 К у самых холодных М-карликов, а разности температур невозмущенных фотосфер и пятен достигают 2000 К у горячих и 300 К у холодных звезд (Алексеев, 2001).

На рис. 1 красными точками представлены результаты расчетов зональных моделей звезд с активностью солнечного типа на сегодняшний день (Алексеев, Кожевникова, 2017, 2018), они охватывают 26 объектов; слева на рисунке даны температуры пятен для разных фотосферных температур, справа – разности температур спокойных фотосфер и пятен для разных фотосферных температур. Красная линия – ближайшая кривая второго порядка

$$T_{\text{пятн}} = (-8.69 \cdot 10^{-5})(T_{\text{фот}})^2 + 1.252 T_{\text{фот}} - 409.2, \quad (1)$$

проведенная по этим точкам. Их среднеквадратичное отклонение от кривой составляет 280 К. При проведении ближайшей к этим точкам кривой третьего порядка величина их среднеквадратичного отклонения несколько уменьшилась – до 230 К, но резкая немонотонность этой кривой делает нецелесообразным замену ею (1).

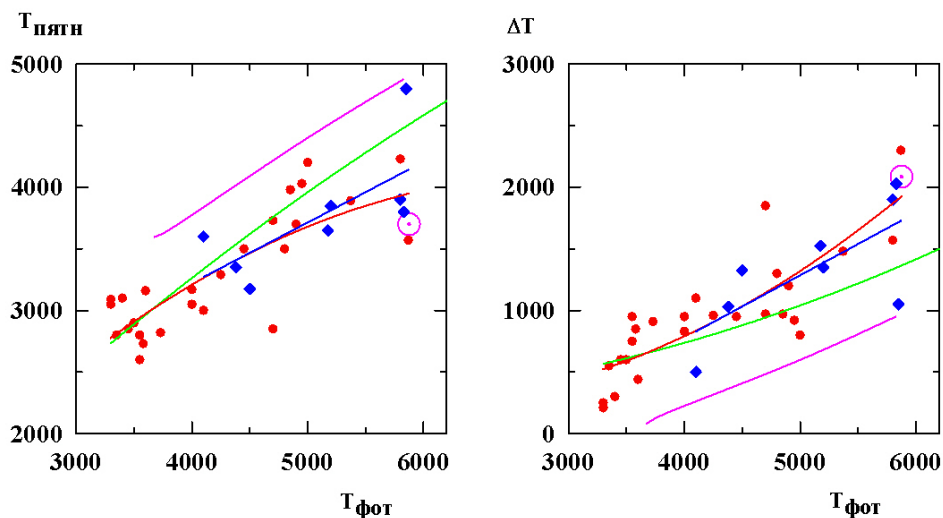


Рис. 1. Зависимость температур пятен от температур фотосфер. Красные кружки и линия – расчеты Алексеев, Кожевникова (2017, 2018) и их квадратичная аппроксимация (1). Синие ромбы и линия – данные Berdyugina (2005) для звезд-карликов и аппроксимация (2). Зеленая линия – аппроксимация Herbst et al. (2021), розовая линия – расчеты Johnson et al. (2021)

Независимо от крымских результатов, в обширном обзоре по солнечным и звездным пятнам Berdyugina (2005) рассмотрела существующие методы оценки их температур, включающие, наряду с фотометрией и колориметрией исследуемых звезд, результаты доплеровского картирования, моделирования молекулярных полос и отношения глубин спектральных линий. Для 29 звезд разных спектральных типов и классов светимости она получила зависимость температуры пятен от фотосферной, качественно аналогичную нашей. На рис. 1 синими ромбиками показаны ее результаты для звезд-карликов. Для переменных AB Dor и BY Dra Бердюгина приводит по две оценки температуры, использующие один метод (таблица 6 в ее обзоре), и мы эти оценки усреднили. Для EK Dra приведены две существенно разные оценки температуры пятен, полученные двумя разными методами – доплеровским картированием и анализом молекулярных полос окиси титана. Они представлены отдельными ромбиками. По всем этим значениям методом наименьших квадратов проведена синяя прямая

$$T_{\text{пятн}} = 0.4926 T_{\text{фот}} + 1251. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение точек от прямой составляет 340 К.

Бердюгина выполнила расчеты на более узком интервале фотосферных температур, чем расчеты зональных моделей. Но на перекрывающемся интервале этих температур красная и синяя линии на рис. 1 практически совпадают.

Herbst et al. (2021) несколько изменили метод Бердюгиной и провели расчеты температур звездных пятен для практически той же выборки звезд с температурами фотосфер от 3300 до 6400 К. Их результаты представлены на рис. 1 зеленой линией. До температур фотосфер 4900 К эта линия практически совпадает с нашей красной кривой, потом начинает уходить от нее вверх, и расхождение около 5500 К достигает приблизительно 500 К. Соответствующая ширина полосы ошибок составляет по оценкам Herbst et al. (2021) от 470 К (M-звезды) до 680 К (G-звезды).

Johnson et al. (2021) вычислили температуры звездных пятен для четырех фотосфер от M2 до G2 с помощью одномерных моделей звездных атмосфер с учетом магнитных полей. Их результаты приведены на рис. 1 розовой прямой, которая систематически выше примерно на 400 К всех рассмотренных линий.

Подтверждением нашего вывода о том, что температура фотосферы решающим образом определяет температуру пятен, может служить следующее обстоятельство. В 1974–1992 годы в КрАО проводились наблюдения EV Lac, использованные для построения моделей зональной запятненности звезды (Алексеев, Гершберг, 1996b). Картина запятненности оказалась в различные годы очень

разной: максимальная ширина полосы запятненности была в диапазоне от 16.5 до 6.1 градусов, а минимальная – от 0.00 до 0.94 максимальной ширины. Тем не менее вычисленная по 19 моделям средняя температура пятен за все эпохи оказалась практически постоянной: 3052 ± 33 К. Эти модели зональной запятненности EV Lac были рассчитаны нами с использованием данной (Pettersen, 1976) температуры звезды 3300 К. Для такой температуры фотосферы соотношение (1) дает температуру пятен 2776 К, что на 276 К ниже ее модельных расчетов, и соответствует полученному выше среднеквадратичному отклонению модельных расчетов от аппроксимации (1).

В наступившем веке при исследовании звездной запятненности нашло широкое применение доплеровское картирование, в котором по спектральным наблюдениям высокого разрешения локализируются области запятненности по всей поверхности звезды (Strassmeier, 2009). Однако оно применимо только к достаточно ярким звездам с заметным осевым вращением, тогда как чисто фотометрический метод зональной запятненности лишен этих ограничений и, в принципе, может дать корректную статистику звездной запятненности в зависимости от спектральных и эволюционных характеристик анализируемых объектов.

Таким образом, рассмотрение рис. 1 и трудности с получением важных исходных данных для использования не крымских методов позволяют рекомендовать кривую (1) для прямых оценок температур звездных пятен по эффективным температурам звездных фотосфер. Следовательно, температуру пятен можно исключить из числа искомых параметров звездной запятненности, определяемых решением системы нелинейных уравнений, как в зональных моделях, так и при решениях кривых блеска в одной полосе или при массовых определениях площадей звездных пятен в космических фотометрических обзорах.

Литература

- Алексеев И.Ю., 2001. Запятненные звезды малых масс. Одесса: Астропринт. [Alekseev I.Yu., 2001. Low-Mass Spotted Stars. Odessa: Astroprint.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996а. Астрон. журн. Т. 73. С. 589. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996a. Astron. Rep., vol. 40, p. 538.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996б. Астрон. журн. Т. 73. С. 579. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996b. Astron. Rep., vol. 40, p. 528.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1996с. Астрофизика. Т. 39. С. 67. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1996c. Astrophysics, vol. 39, p. 33.]
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., 1997. Астрон. журн. Т. 74. С. 240. [Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., 1997. Astron. Rep., vol. 41, p. 207.]
- Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В., 2017. Астрон. журн. Т. 94. № 3. С. 240. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2017. Astron. Rep., vol. 61, no. 3, p. 221–233.]
- Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В., 2018. Астрон. журн. Т. 95. № 6. С. 421. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2018. Astron. Rep., vol. 62, N. 6, p. 396–411.]
- Berdyugina S.V., 2005. Liv. Rev. Solar Phys., vol. 2, p. 8.
- Gershberg R.E., Pikel'ner S.B., 1972. Comments Astrophys. Space Phys., vol. 4, p. 113.
- Herbst K., Papaioannou A., Airapetian V.S., Atri D., 2021. Astrophys. J., vol. 907, p. 89.
- Johnson L.J., Norris C.M., Unruh Y.C., Solanki S.K., Krivova N., et al., 2021. arXiv e-prints ([arXiv:2104.11544v1](https://arxiv.org/abs/2104.11544v1)).
- Krzeminski W., 1969. In Kumar S.S. (Ed), Low luminosity stars. Gordon and Breach Sci. Publ., p. 7.
- Pettersen B.R., 1976. Inst. Theor. Astrophys., Univ. Oslo, Rep., no. 46, pp. 1–25.
- Strassmeier K.G., 2009. Astron. Astrophys. Rev., vol. 17, p. 251.

On the temperature of starspots

I.Yu. Alekseev, R.E. Gershberg

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
ilya-alekseev@mail.ru

Abstract. A number of models of the zonal spottedness of stars with solar-type activity show a certain correlation between starspot temperatures and temperatures of quiet photospheres.

Key words: Stars: starspots