ВРАЩЕНИЕ И АКТИВНОСТЬ ИЗБРАННЫХ ЗВЁЗД-БЛИЗНЕЦОВ СОЛНЦА

Кацова М.М.¹, Низамов Б.А.¹, Шляпников А.А.², Мишенина Т.В.³

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

³Астрономическая обсерватория Одесского национального университета,
Одесса, Украина

ROTATION AND ACTIVITY OF SELECTED SOLAR TWINS

Katsova M.M.¹, Nizamov B.A.¹, Shlyapnikov A.A.², Mishenina T.V.³

¹Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory Russian Academy of Sciences, Nauchny, Russia

³Astronomical Observatory, Odessa National University, Odessa, Ukraine

We analyze data for 55 solar analogs which are characterized by significant scatter of Lithium abundance in their atmospheres. Among these stars there are 22 solar twins. Preliminary analysis of the TESS data allowed us to reveal rotation modulation of stellar brightness associated with star spots. For some of our samples, periods of axial rotation are detected from $4^d.6$ to $6^d.5$, i.e. these stars rotate 4-6 times faster than the contemporary Sun. This indicates their relative youth. Flare activity of solar twins is discovered in the TESS data, and we present temporal profiles for different types of flares. A search available data in X-ray archives gives a chance to compare coronae of the Sun and its twins of various ages. We found a scatter in the X-ray to bolometric luminosity ratio L_x/L_{bol} by several orders of magnitude, which exists in these stars along with a significant scatter in the abundance of lithium. This may link the surface activity of stars with phenomena at the base of their convective zones. In addition, several stars in this sample have one or more exoplanets, which makes them similar to our solar system.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-155-160

Введение

Явления звёздной активности широко распространены среди звёзд нижней части Главной Последовательности. Среди солнечных аналогов – звёзд с фундаментальными параметрами, близкими к солнечным характеристикам – существует группа звёзд-близнецов Солнца, у которых спектральные исследования выявили значительный разброс обилия лития в их атмосферах [1]. Понимание причин такого поведения лития важно при изучении эволюции звёзд и химической эволюции Галактики. Li^7 разрушается при температурах $\sim 2.5 \cdot 10^6 K$, поэтому знание содержания лития обеспечивает эффективный инструмент исследования различных процессов перемешивания внутри звёзд солнечного типа, которые приводят к изменению его содержания. К таким процессам можно отнести в первую оче-

редь конвекцию, микроскопическую диффузию, меридиональную циркуляцию и хромосферную активность. Помимо начальных условий, с которыми звезда приходит на Главную Последовательность, одним из факторов, влияющих на обилие лития, может являться активность [2, 3]. Наши солнечные близнецы – это 22 звезды из 56 звёзд-аналогов Солнца, которые различаются менее чем на 100 K по T_{eff} , на 0,1 dex по $\log g$ и 0,1 dex по металличности от значений для Солнца.

Оптические кривые блеска некоторых близнецов Солнца с возможным рентгеновским излучением

Более детально рассмотрим те звёзды с обнаруженной дисперсией обилия лития, которые являются возможными кандидатами на идентификацию в рентгеновском диапазоне. Данные обсерватории TESS после предварительной обработки и фильтрации дают возможность получить оптические кривые блеска некоторых из них [4]. Примеры вращательной модуляции нескольких звёзд, связанной с пятнами, приведены на рис. 1.

Рис. 1. Верхняя панель – кривые блеска двух близнецов Солнца HD 5294 и HD 22409 без особенностей; на нижней панели: слева – изменение блеска звезды HD 42807 (типа RS CVn) с высокой хромосферной активностью, в центре – звезда HD 113319 с экзопланетой, справа – компонент спектрально-двойной системы HD 159222.

Результаты анализа периодичности в переменности кривые блеска трёх звёзд приведены на рис. 2–4.

Рис. 2. Слева – частотная диаграмма, построенная по данным TESS для звезды HD 5294, полученным в 17 секторе. Справа – свертка с периодом $6^{\text{d}}.526949$.

Рис. 3. Слева – частотная диаграмма, построенная по данным обсерватории TESS для звезды HD 159222, полученным в 26 секторе. Справа – свертка с периодом $5^{\text{d}}.92057$.

Рис. 4. Слева – частотная диаграмма, построенная по данным обсерватории TESS для звезды HD 113319, полученным в 23 секторе. Справа – свертка с периодом $4^{\text{d}}.6369$.

Таким образом, периоды осевого вращения этих звёзд находятся в пределах от $4^{\text{d}}.6$ до $6^{\text{d}}.5$, т.е. эти звёзды вращаются в 4–6 раз быстрее современного Солнца. Это указывает на их сравнительную молодость.

Оптические вспышки на близнецах Солнца по данным TESS

Анализ кривых блеска, полученных обсерваторией TESS позволил обнаружить вспыхивающую активность этих достаточно ярких звёзд, которую трудно наблюдать на наземных обсерваториях. Несколько примеров изменений блеска звёзд при вспышках с временным разрешением 20 с, приведены на рис. 5. События длятся от нескольких минут до нескольких часов. Особый интерес представляет третий пример на рисунке справа, демонстрирующий классическую импульсную вспышку, подобную тем, которые наблюдаются на красных карликах.

Рис. 5. Кривые блеска вспышек на двух звёздах HD 24409 и HD 75767 с временным разрешением 20 с.

Рентгеновское излучение близнецов Солнца с обнаружимым литием

Корональный индекс, отношение рентгеновской светимости звезды к её болометрической светимости – L_x/L_{bol} – характеризует уровень активности. По данным рентгеновских архивов обсерваторий *Einstein*, *EXOSAT*, *ROSAT*, *XMM-Newton* и *Chandra* [5–7] мы оценили это отношение для рассматриваемых звёзд. На рис. 6 эта величина представлена в зависимости от скорости осевого вращения звезды. Как и у данных по обилию лития, здесь оказался значительный разброс вплоть до 4-х порядков величин. Таким образом, среди близнецов Солнца выявлены звёзды с более мощной короной, т.е. более активные молодые звёзды, вращающиеся в несколько раз быстрее Солнца. В то же время существуют и его «близнецы», обладающие более низким уровнем активности, чем у современного Солнца; их мягкое рентгеновское излучения почти на порядок слабее солнечного.

Сравнение индекса корональной активности L_x/L_{bol} с данными об обилии лития в атмосферах рассматриваемых звёзд и современного Солнца приведено на рис. 7. Видно, что, несмотря на разброс, можно проследить определённый тренд, указывающий на связь этих характеристик.

Рис. 6. Индекс корональной активности, L_x/L_{bol} близнецов Солнца в зависимости от скорости их осевого вращения $v \sin i$.

Рис. 7. Сопоставление индекса корональной активности L_x/L_{bol} и обилия лития звёзд-близнецов Солнца. Крестики соответствуют значениям L_x/L_{bol} для Солнца в максимум и минимум цикла [8]. Содержание лития для Солнца $A(Li) = 1.05$ принято по [9].

Таблица.

HD	Спектр	P_{rot} , day	L_x/L_{bol}	Примечания. P_{orb} даны в днях
42618	G4 V	9.33	2.518e-07	Экзопланета с $P_{orb} = 149.6$
42807	G5 V	1.08/12?	1.580e-05	Звезда типа RS CVn
95128	G1 V		2.093e-07	47 UMa, 3 экзопланеты с P_{orb} 1078/2391/14002
117176	G4 V		1.128e-07	70 Vir, экзопланета с $P_{orb} = 116.7$
164595	G2 V	29.53		Экзопланета с $P_{orb} = 40$
186408	G1.5 Vb		1.836e-07	16 Cyg A
186427	G3 V		6.245e-08	16 Cyg B, экзопланета с $P_{orb} = 799$
187123	G2 V			2 экзопланеты с $P_{orb} = 3.1$ and 3810
222143	G2	6.1–7.5	2.698e-05	Звезда типа BY Dra
146362	G1 V		1.331e-03	Звезда типа RS CVn, +F6 V (спектр. двойная)

В таблице приведены данные для 10 звёзд-близнецов Солнца о корональном индексе – отношении L_x/L_{bol} , периоды вращения и типе переменности (когда известно). В частности, одна из трёх наиболее активных звёзд, HD 222143, относится к типу BY Dra, т.е. сильно запятнённых, а две другие, HD 42807 и HD 146362, к двойным системам с сильной хромосферной активностью (тип RS CVn). С другой стороны, у нескольких звёзд, с уровнем активности ниже солнечной, обнаружены одна или несколько экзопланет. В примечании указаны их орбитальные периоды.

Заключение

Среди солнечных аналогов – звёзд с фундаментальными параметрами, близкими к солнечным характеристикам – существует группа звёзд-близнецов Солнца, у которых спектральные исследования выявили значительный разброс обилия лития в их атмосферах. Понимание причин такого поведения лития важно при изучении эволюции звёзд и химической эволюции Галактики. Помимо начальных условий, с которыми звезда приходит на Главную Последовательность, одним из факторов, влияющих на обилие лития, может являться активность.

Проанализированы имеющиеся данные для 55 солнечных аналогов, 22 из которых можно считать близнецами Солнца. Предварительный анализ вращательной модуляции по данным орбитальной обсерватории TESS позволил оценить периоды осевого вращения. Обнаружена также вспышечная активность этих звёзд, которую трудно наблюдать наземными средствами. Приведены примеры кривых блеска нескольких вспышек. Проведён поиск архивных рентгеновских данных для звёзд-близнецов Солнца, который позволил сравнить мощность корон современного Солнца и его близнецов разного возраста. Обнаружен разброс в несколько порядков величин отношения рентгеновской к болометрической светимости L_x/L_{bol} , существующий в этих звёздах наряду со значительным разбросом обилия лития. Это может указывать на связь поверхностной активности с явлениями в основании конвективной зоны. По-видимому, одним из возможных механизмов, изменяющих содержание лития, может быть активность. Кроме того, у нескольких звёзд этой выборки обнаружены одна, а иногда и несколько экзопланет, что сближает нашу Солнечную систему с рассматриваемыми звёздными системами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ в рамках проекта 19-02-00191, ММК и БАН благодарны Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку в рамках гранта 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

Литература

1. Mishenina T., Soubiran C., Charbonnel C. et al. // *Mem.Soc.Astron.Ital.*, 2020, 91, 171.
2. Mishenina T.V., Soubiran C., Kovtyukh V.V. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2012, 547, A106.
3. Katsova M.M., Livshits M.A., Mishenina T.V. // *Astron. Rep.*, 2013, 57(9), 702.
4. Ricker G.R., Winn J.N., Vanderspek R. // *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9143, 914320.
5. Boller Th., Freyberg M.J., Trümper J. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2016, 588, A103.
6. Traulsen I., Schwobe A.D., Lamer G. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2020, 641, A137.
7. Evans, I.N., Primi F.A., Glotfelty K.J. et al. // *Astrophys. J. Suppl.*, 2010, 189, 37.
8. Peres G., Orlando S., Reale F., Rosner R., Hudson H. // *ApJ*, 2000, 528, 537.
9. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. // *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* 2009, 47, 481.