

УДК 524.33

## Магнитно-активные звезды в Тельце-Возничем. Основные параметры и эволюционный статус

*К.Н. Гранкин*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409  
*kgrankin@crao.crimea.ua; konstantin.grankin@rambler.ru*

Поступила в редакцию 14 декабря 2012 г.

**Аннотация.** Проанализирована выборка 74 магнитно-активных звезд, расположенных в направлении области звездообразования Тельца-Возничего. Исследовано изменение углового момента вращения звезд в течение первых 40 млн лет эволюции. Показано, что время активного взаимодействия между звездой и протопланетным диском происходит на временном интервале от 0.7 до 10 млн лет. Все звезды выборки находятся в режиме насыщенного динамо, когда рентгеновская светимость достигает максимума и не зависит от числа Россби. Анализ многолетней фотометрической переменности показал, что фотометрическая активность самых молодых звезд заметно выше, чем активность более старых объектов выборки, что может быть связано с эволюцией магнитного поля от преимущественно дипольной и осесимметричной к многополюсной и неосесимметричной.

MAGNETICALLY ACTIVE STARS IN TAURUS-AURIGA: KEY PARAMETERS AND EVOLUTIONARY STATUS, *by K.N. Grankin*. Sample of 74 magnetically active stars located in the direction of the Taurus-Auriga star-forming region is analysed. Change of the stars rotation angular momentum during first 40 million years of evolution is investigated. It is shown that time of active interaction between a star and a protoplanetary disk occurs on a time interval from 0.7 up to 10 million years. All stars of sample are in a condition of the saturated dynamo when the X-ray luminosity reaches a maximum and does not depend on the Rossby number. The analysis of long-term variability has shown that photometric activity of the youngest stars is noticeably above, than activity of older objects of the sample that can be connected with evolution of a magnetic field from mainly dipole and axisymmetric to multipolar and nonaxisymmetric.

**Ключевые слова:** звезды – переменные, молодые, свойства, вращение, эволюция

---

В настоящей работе проанализированы однородные долговременные фотометрические наблюдения 28 хорошо известных молодых звезд со слабыми эмиссионными линиями (WTTS) из списка Гранкина (Гранкин и др., 2008) и 46 кандидатов в WTTS из списка Вихмана (Вихман и др., 1996) в области звездообразования (ОЗ) Тельца-Возничего и получены следующие результаты.

Показано, что 39 звезд из списка Вихмана демонстрируют периодические изменения блеска, которые обусловлены явлением пятенной вращательной модуляции. Проанализированы периоды вращения 39 звезд из списка Вихмана и 22 хорошо известных WTTS из списка Гранкина. Периоды вращения этих 62 звезд лежат в пределах от 0.5 до 10 дней.

Для всех звезд оценены значения  $T_{eff}$  с использованием температурной калибровки Токунага. Показано, что ошибки в определении эффективной температуры могут достигать  $\pm 50^\circ K$  для звезд

спектральных классов G1-G6,  $\pm 100^\circ K$  для G7-K1,  $\pm 195^\circ K$  для K2-K6,  $\pm 90^\circ K$  для K7-M0 и  $\pm 160^\circ K$  для M1-M6.

Вычислена звездная светимость из величины  $V_{max}$ , с учетом болометрической поправки, уместной для спектрального класса звезды, соответствующей экстинкции на луче зрения, которая была получена из избытка цвета V-R, и в предположении, что все звезды расположены на среднем расстоянии темных облаков Тельца, т. е. 140 пс. Обсуждены различные источники ошибок в оценках звездной светимости и предпринята попытка минимизировать некоторые из этих ошибок. Показано, что ошибки в определении  $\log L$  могут достигать  $\pm 0.1 - 0.17$  dex. Используя диаграмму  $T_{eff}$ ,  $L_{bol}$ , построенную для 190 карликов с хорошо известными температурами и светимостями, удалось выявить семь звезд нашей выборки с заведомо заниженными оценками светимости. Скорее всего, эти звезды расположены заметно дальше среднего расстояния до ОЗ Тельца-Возничего.

Вычислены звездные радиусы с помощью трех различных методов: (1) с использованием  $L_{bol}$  и  $T_{eff}$  ( $R_{bol}$ ), (2) через соотношение Кервелла и Фуке ( $R_{KF}$ ), (3) с использованием данных о периоде вращения и  $v \sin i$  ( $R'_{rot}$ ). Показано, что оценки  $R_{bol}$  и  $R_{KF}$  находятся в прекрасном согласии (лучше чем 99 %) со средним отношением  $\langle R_{KF}/R_{bol} \rangle = 1.004 \pm 0.012$ . Выявлены пять звезд с завышенными оценками  $R_{bol}$  ( $R_{bol} \gg R \sin i$ ) и две звезды, у которых  $R_{bol}$  занижены ( $R_{bol} \ll R \sin i$ ). Обсуждены возможные причины для сильных несоответствий между  $R_{bol}$  и  $R \sin i$ . Показано, что для звезд с известными периодами вращения  $P_{rot}$  и значениями  $v \sin i$  оценки  $R_{bol}$  и  $R'_{rot}$  находятся в хорошем согласии со средним отношением  $\langle R'_{rot}/R_{bol} \rangle = 1.125 \pm 0.096$ . Выявлено десять звезд с небольшими углами наклона ( $\sin i \ll \pi/4$ ), для которых оценки  $R'_{rot}$  явно занижены. Показано, что среднее расстояние до 24 звезд из списка Вихмана с надежными оценками  $R'_{rot}$  составляет  $143 \pm 26$  пс, что находится в очень хорошем согласии с принятым расстоянием до ОЗ Тельца-Возничего.

Определены звездные массы и возраст для звезд с надежными оценками светимости. Показано, что звезды из списка Вихмана имеют массу в диапазоне от  $0.4M_\odot$  до  $2.2M_\odot$  и возраст от  $1.5 \times 10^6$  до  $10^8$  лет. Около 33 % звезд из списка Вихмана имеют возраст меньше чем  $10^7$  лет.

На основе данных о собственном движении, эквивалентной ширине линии лития и возрасте уточнен эволюционный статус 24 звезд из списка Гранкина и 50 звезд из списка Вихмана. Показано, что 17 объектов из списка Гранкина являются надежными WTTS и 2 объекта имеют возраст чуть больше 10 млн лет и принадлежат к группе звезд, которые недавно прошли стадию Т Тельца (PTTS). Анализ эволюционного статуса 50 звезд из списка Вихмана показал, что 29 объектов ( $\sim 58$  %) являются молодыми звездами с возрастом 1–40 млн лет, которые с высокой долей вероятности принадлежат ОЗ Тельца-Возничего. Из этих 29 молодых объектов 14 были классифицированы как WTTS (моложе 10 млн лет) и 15 – как PTTS (старше 10 млн лет). Одна звезда отнесена к объектам начальной главной последовательности (НГП), одна – к членам Плеяд, и одна – возможный член Плеяд. Остальные 18 объектов из списка Вихмана классифицированы как звезды, не достигшие главной последовательности (PMS), которые могут быть отнесены к популяции звезд Пояса Гулда.

Исследована зависимость периода вращения от массы и возраста. Показано, что более массивные звезды выборки вращаются в среднем быстрее, чем менее массивные. Относительно старые PMS звезды с возрастом более 10 млн лет (PTTS) вращаются в среднем быстрее, чем более молодые PMS звезды (WTTS). Этот результат находится в хорошем согласии с теоретическими моделями, которые предсказывают уменьшение периода вращения при движении к НГП.

Исследована эволюция углового момента вращения PMS звезд в ОЗ Тельца-Возничего в течение первых 40 млн лет эволюции. Показано, что распределение звезд на диаграмме период вращения – возраст можно объяснить различным временем активного взаимодействия между звездой и диском. Большинство звезд выборки прекратили активное взаимодействие со своими дисками на временном интервале от 0.7 до 10 млн лет. Наблюдаемое ускорение вращения от самых молодых WTTS к PTTS в пределах временной шкалы от 1 до 40 млн лет хорошо объясняется быстрым уменьшением момента инерции, в то время как потери углового момента являются умеренными.

Исследована зависимость между различными параметрами рентгеновской активности и вращением PMS звезд в ОЗ Тельца-Возничего. Показано, что существует слабая корреляция между нормированным угловым моментом вращения и рентгеновской светимостью PMS-звезд. Проана-

лизировано положение PMS-звезд на диаграмме Росби ( $L_X/L_{bol}$  и  $R_o$ ). Все звезды выборки демонстрируют те же самые значения  $L_X/L_{bol}$  и  $R_o$ , что и звезды из скопления IC 2602 и Плеяд с возрастными в пределах 30–100 млн лет, т. е. находятся в режиме насыщенного динамо.

Исследована фотосферная активность PMS-звезд на основе анализа оригинальных многолетних фотометрических наблюдений. Отмечено, что максимальная амплитуда переменности блеска в среднем увеличивается с увеличением эквивалентной ширины эмиссионной линии  $H_\alpha$  и абсорбционной линии лития.

Обнаружена статистически значимая зависимость между эквивалентной шириной линии лития и возрастом PMS-звезд солнечных масс (в диапазоне от 0.7 до 1.2  $M_\odot$ ). Чем больше возраст, тем меньше эквивалентная ширина Li. Этот результат находится в хорошем соответствии с предсказаниями классических моделей, объясняющих эволюцию атмосферного избытка Li в течение PMS-стадии развития звезд солнечных масс. Выделена группа из 5 наиболее активных PMS-звезд, которые демонстрируют максимальные амплитуды переменности блеска, достигающие значений  $0.^m4 - 0.^m8$ . Все эти звезды имеют очень близкие физические параметры: спектральные классы (K6-K7), периоды вращения (2.4–5.7 суток), радиусы (1.3–1.75  $R_\odot$ ), массы (0.74 до 0.92  $M_\odot$ ), и возраст (2.5–8.2 млн лет). Помимо этого, они показывают заметную эмиссию в линии  $H_\alpha$  (от  $-0.5$  до  $-4.0 \text{ \AA}$ ) и самую сильную абсорбционную линию лития ( $W(\text{Li}) > 0.57 \text{ \AA}$ ).

Наиболее интересная особенность фотометрического поведения этих активных звезд связана с явлением стабильности фазовой кривой блеска на протяжении нескольких наблюдательных сезонов. Долговременная стабильность фазовых кривых блеска проявляется в том, что фаза минимума фазовой кривой блеска ( $\varphi_{min}$ ) сохраняет свое значение на интервале от 5 до 19 лет. Такая особенность фотометрического поведения может быть обусловлена особенностями конфигурации магнитного поля этих звезд. Скорее всего, наиболее активные звезды нашей выборки имеют в основном крупномасштабные магнитные поля с осесимметричной полоидальной конфигурацией. В этом случае протяженные запятненные области концентрируются в районе расположения 2-х магнитных полюсов. Длительное существование протяженных запятненных областей свидетельствует о том, что структура этих дипольных полей достаточно устойчива на протяжении нескольких лет.

Остальные звезды выборки демонстрируют небольшие амплитуды переменности блеска. Причем, периодический процесс наблюдается не каждый наблюдательный сезон. Показано, что частота появления периодического процесса максимальна для самых молодых звезд и постепенно падает для более старых объектов. Высказано предположение о том, что наличие этой зависимости является косвенным подтверждением эволюции структуры магнитного поля молодых звезд от преимущественно дипольной и осесимметричной (в случае полностью конвективных звезд), к октупольной и осесимметричной (когда излучающее ядро меньше половины звездного радиуса) и затем к многополюсной и неосесимметричной (когда конвективная зона занимает меньше половины звездного радиуса). Дополнительным аргументом в пользу такой эволюции магнитного поля может служить тот факт, что пять наиболее активных звезд лежат на ГР-диаграмме в той области, где должны располагаться полностью конвективные протозвезды с достаточно простой дипольной структурой магнитного поля.

## Литература

- Вихман и др. (Wichmann R., Krautter J., Schmitt J.H.M.M., et al.) // Astron. Astrophys. J. 1996. V. 312. P. 439.
- Гранкин и др. (Grankin K.N., Bouvier J., Herbst W., et al.) // Astron. Astrophys. J. 2008. V. 479. P. 827.