

УДК 524.3

О переменности Веги

В.В. Бутковская

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
varyu@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. Более 60 лет Вега является спектрофотометрическим стандартом в ближнем инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах. Однако современные спектрофотометрические и спектральные исследования подтвердили переменность Веги с периодом около 21 года. Кроме того, иногда Вега демонстрирует короткопериодическую переменность, природа которой пока не ясна. Новые спектрополяриметрические исследования обнаружили слабое магнитное поле у этой звезды. Анализ 15-летнего ряда наблюдений, полученных в КраО, позволил заподозрить переменность магнитного поля с периодом вращения Веги. В данной работе обобщены результаты изучения переменности Веги.

ON VARIABILITY OF VEGA, *by V.V. Butkovskaya.* Over 60 years Vega has been accepted as a standard star in the near infrared, optical, and ultraviolet regions. But nowadays the 21-year spectral and spectrophotometric variability of Vega is detected. Vega also demonstrates a short-term unexplained variability. Recent spectropolarimetric studies of Vega have revealed the presence of a weak magnetic field on the star. We have analyzed own results of Vega’s magnetic field measurement, which were obtained in CrAO during 15 years, and suspected the variability of the field due to stellar rotation. The results of Vega’s variability studies are summarized in this paper.

Ключевые слова: переменные звезды, магнитное поле, Вега

1 Введение

Вега (α Lyræ, A0V) – одна из пяти самых ярких звезд ночного неба и вторая по яркости звезда в Северном полушарии. На сегодняшний день Вега является одной из самых изученных звезд, но при этом продолжает преподносить астрономам все новые сюрпризы.

Вращение. Спектр Веги демонстрирует узкие линии. Казалось бы, это дает возможность ожидать не большую скорость вращения звезды. Проекция скорости вращения на луч зрения, $v \sin i$, действительно невелика – не более 22 км/с. Однако изучая спектры высокого разрешения Веги, Гулливер и др. (1994) обнаружили, что профили слабых спектральных линий имеют необычную форму – плоское ядро. На основе моделирования спектра авторы пришли к заключению, что Вега – быстровращающаяся звезда, которая видна практически с полюса вращения. Из-за быстрого вращения Вега имеет форму не шара, а эллипсоида вращения. Этот вывод был впоследствии подтвержден наблюдениями инфракрасного телескопа CHARA (Ауфденберг и др., 2006).

На сегодняшний день нет единого мнения о том, как быстро вращается Вега. Гулливер и др. (1994) на основе анализа профилей линий определили экваториальную скорость вращения $v_{eq} = 245$ км/с и угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 5.1^\circ$. Десятилетие спустя Хилл и др. (2004) провели повторный анализ тех же спектральных данных и получили значения $v_{eq} = 160$ км/с и $i = 7.9^\circ$. В результате двух независимых интерферометрических исследований были получены следующие значения экваториальной скорости вращения и угла наклона оси вращения: $v_{eq} = 274$ км/с, $i = 4.5^\circ$ (интерферометрия в оптическом диапазоне, Navy Prototype Optical Interferometer, Петерсон и др., 2006) и $v_{eq} = 270$ км/с, $i = 4.7^\circ$ (интерферометрия в ближней инфракрасной области, CHARA, Ауфденберг и др., 2006). Такеда и др. (2008) на основе анализа профилей спектральных линий и распределения энергии в спектре пришли к выводу, что $v_{eq} = 175$ км/с и $i = 7^\circ$. Хилл и др. (2010) на основе анализа новых спектральных данных получили значения $v_{eq} = 211$ км/с и $i = 5.7^\circ$.

Масса и радиус. Согласно модельным расчетам разных авторов (см. табл. 4 в работе Такеда и др., 2008), масса Веги $M = 2.3 M_{sun}$, радиус в области полюсов вращения $R_p = 2.3 - 2.5 R_{sun}$, экваториальный радиус $R_e = 2.76 - 2.87 R_{sun}$, логарифм ускорения силы тяжести в полярных областях $\log g_p = 3.75 - 4.1$, логарифм ускорения силы тяжести в области экватора $\log g_e = 3.59 - 3.88$.

Температура. Мережин (2001) обратил внимание на большой разброс значений эффективной температуры Веги, опубликованных разными авторами: от 9120 К (Блэквелл и др., 1983) до 13300 К (Гуляев и др., 1987). По его мнению, это различие может быть связано как с разными методами определения температуры, так и с переменностью самой Веги. Нет согласия у разных авторов и относительно разницы между эффективной температурой на полюсе и на экваторе Веги: по результатам различных модельных расчетов она колеблется от 350 К и до 2400 К (см. табл. 4 в работе Такеда и др., 2008).

Химсостав. Анализ химического состава Веги обнаружил небольшой дефицит металлов -0.6 dex по сравнению с солнечным (Адельман и Гулливер, 1990).

Магнитное поле. Современные спектрополяриметрические исследования Линье и др. (2009) и Петита и др. (2010) обнаружили слабое магнитное поле у Веги. Петит и др. (2010) рассчитали карты распределения магнитного поля по поверхности Веги, используя разные значения периода вращения, и пришли к выводу, что период 0.7319 дня лучше всего описывает наблюдательные данные.

2 Короткопериодичная и долгопериодичная переменность

2.1 Ранние попытки поиска переменности

Вега является одним из спектрофотометрических стандартов в ближней инфракрасной, оптической и ультрафиолетовой областях спектра, поэтому постоянно привлекает внимание исследователей, которые пытаются выяснить, действительно ли звезда не является переменной. Долгое время попытки были безрезультатными: в то время как одни авторы сообщали об обнаруженной переменности блеска или лучевой скорости Веги, результаты других авторов не подтверждали эти заявления.

Фотометрические измерения начала XX века показали, что блеск Веги не постоянен. Гутник и Прагер (1915) первыми обнаружили изменение блеска Веги с амплитудой $0.^m04$. Белопольский (1931) сообщил, что лучевая скорость Веги изменяется в течение 0.19-дневного периода с амплитудой около 6 км/с. Для проверки результата, полученного Белопольским, Ньюбауэр и Фарнsworth (1935) измерили лучевую скорость Веги в течение двух ночей в 1935 году и пришли к выводу, что она постоянна в пределах нескольких десятых км/с. В том же году Фат (1935) инициировал одновременные спектральные и фотометрические наблюдения Веги и зарегистрировал изменения лучевой скорости с амплитудой около 1 км/с относительно среднего значения. На этот раз никакой периодичности в поведении лучевой скорости обнаружено не было, но изменения лучевой скорости тесно коррелировали с изменениями блеска Веги, поэтому Фат сделал вывод, что Вега является пульсирующей переменной.

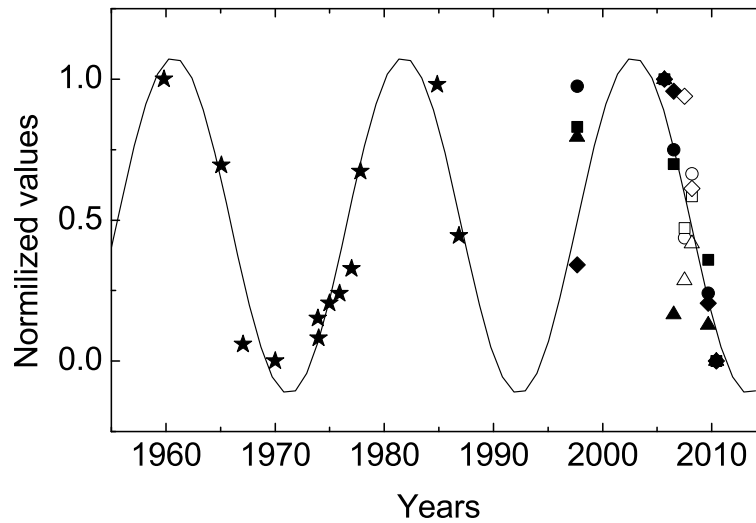


Рис. 1. До 1990 года: звездочки – данные для нормированных значений E_{5556} , собранные Васильевым и др. (1989b) по публикациям разных авторов. После 1990 года: закрытые значки – нормированные средние за год значения эквивалентных ширин спектральных линий Mg I 5167.321 Å (кружки), Mg I 5172.684 Å (треугольники), Mg I 5183.604 Å (ромбы) и Fe II 5169.033 Å (квадраты), рассчитанные по спектрам, полученным в Крымской астрофизической обсерватории; соответствующие им открытые значки – нормированные средние за год эквивалентные ширины тех же спектральных линий, рассчитанные по спектрам, полученным в Бохюнсанской обсерватории (Южная Корея)

Не способствовали прояснению ситуации и более поздние наблюдения. Часть авторов не обнаружила переменности в блеске Веги (Фернье, 1980; Козырев и др., 1981; Рубан, 1988), но публикации ряда других авторов утверждали обратное. Фернье (1981) обнаружил, что в разные даты блеск Веги меняется с амплитудой до $0.^m043$. Джонсон и Вишневы (1978) и Джонсон (1980) сообщили, что блеск звезды изменяется с амплитудой $0.^m03$ в фильтре V. Результаты последних трех работ совпадали с результатом, полученным Гутником и Прагером еще в начале века. Таким образом, на сегодняшний день в астрономической базе данных SIMBAD Вега обозначена как переменная звезда типа δ Scn, то есть демонстрирующая неправильные низкоамплитудные пульсации из-за неустойчивости в недрах звезды. Бом и др. (2012), используя эшелле-спектры высокого разрешения, зарегистрировали периодические (~ 1.8 – 4.5 часа) изменения лучевой скорости Веги в 2008, 2009 и 2010 годах с амплитудой всего несколько метров в секунду. По мнению авторов, вопрос о пульсационной природе этой переменности требует дальнейшего подтверждения.

2.2 21-летний период

Анализируя собранные по литературным источникам с 1960 по 1986 годы спектрофотометрические измерения спектральной плотности энергетической освещенности E_{5556} на длине волны $\lambda = 5556$ Å, создаваемой Вегой на внешней границе атмосферы, Васильев и др. (1989a) показали, что E_{5556} изменяется с периодом 23–25 лет. Впоследствии эта переменность была подробно исследована в монографии Мережина (2001), но не получила широкого признания. Бутковская и др. (2011), анализируя собственные многолетние измерения эквивалентных ширин спектральных линий Mg I 5167.321 Å, Mg I 5172.684 Å, Mg I 5183.604 Å и Fe II 5169.033 Å, подтвердили долгопериодическую переменность Веги и представили уточненное значение периода переменности: $JD = 2429469 + n \times 7697 \pm 157 d$ (21.28 года). На рис. 1 проиллюстрирована переменность Веги с 21-летним периодом. Так как спектральная плотность энергетической освещенности E_{5556} и эквивалентные ширины спектральных линий имеют разную физическую природу, чтобы представить их на одном графике, значения этих

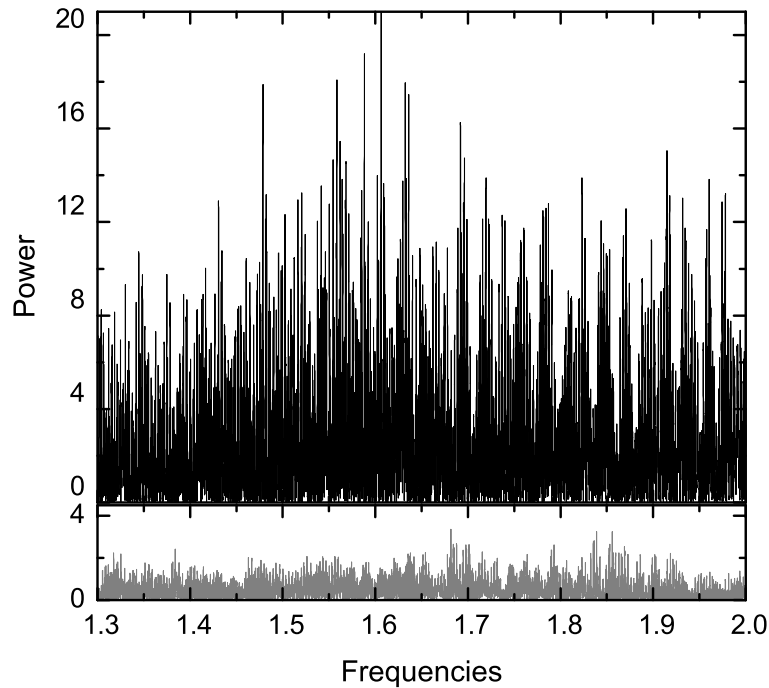


Рис. 2. Спектр мощности продольной составляющей магнитного поля Веги (верхняя панель) и тестового “нулевого” поля (нижняя панель)

параметров были отнормированы в диапазоне от 0 до 1. Процедура нормировки подробно описана в работе Бутковской и др. (2011).

2.3 Магнитное поле и период вращения

Расчет продольной составляющей магнитного поля был выполнен с помощью методики, подробно описанной в работах Плачинды (2005) и Бутковской и Плачинды (2007). Полагая экваториальный радиус Веги $R_{eq} = 2.76 R_{sun}$ (Такеда и др., 2008), радиус Солнца $R_{sun} = 695500$ км и используя значения экваториальной скорости вращения по данным разных авторов (см. Введение), значение экваториального периода вращения Веги попадает в интервал 0.510–0.873 дня. В этот же интервал попадает период 0.7319 дня, оцененный Петитом и др. (2010) на основе расчета карт распределения магнитного поля по поверхности Веги. В работе Бутковской (2013) впервые предпринята попытка определить период вращения Веги с помощью спектрополяриметрических экспериментальных данных, а не на основе модельных расчетов. Фурье-анализ 15-летнего временного ряда, включающего 1312 измерений продольной составляющей магнитного поля Веги, полученных в КрАО, выявил максимальный по мощности пик на частоте 1.6062959 d^{-1} . Обнаруженная частота соответствует периоду 0.6225503 дня:

$$JD(B_{max}) = 2450658.427 + n \times 0.6225503 \pm 1.4 \times 10^{-6}. \quad (1)$$

На верхней панели рис. 2 представлен спектр мощности в интервале частот, соответствующих возможным значениям периода вращения Веги (см. выше). Максимальный пик в спектре мощности соответствует частоте 1.6062959 d^{-1} . На нижней панели рис. 2 представлен спектр мощности “нулевого” поля, рассчитанного для тех же спектров, что и продольное поле, но с использованием спектров одинаковой поляризации. “Нулевое” поле является мощным критерием контроля отсутствия случайного сигнала в рядах спектрополяриметрических измерений (Бутковская и Плачинда,

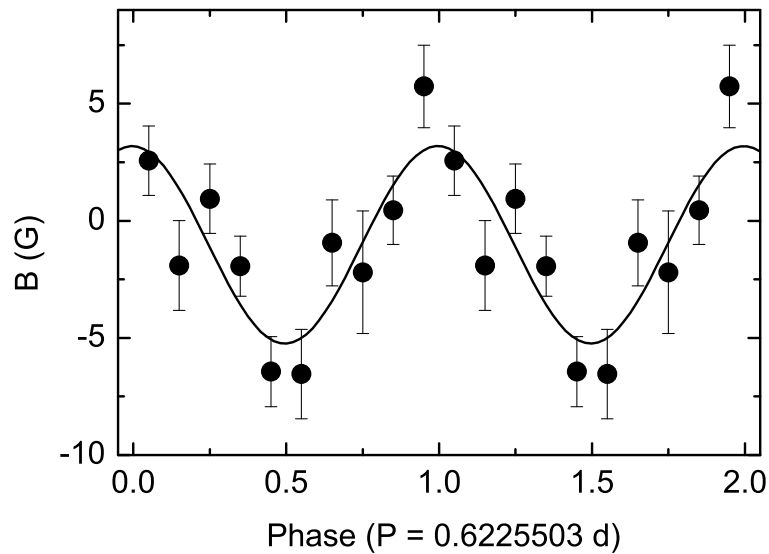


Рис. 3. Продольная компонента магнитного поля Веги, свернутая с фазами 0.6225503-дневного периода вращения и усредненная по 10 бинам. Аппроксимирующая синусоида показана сплошной линией

2007). В данном случае отсутствие какой-либо периодичности во временном ряде “нулевого” поля является подтверждением того, что обнаруженная переменность продольной составляющей магнитного поля с периодом 0.6225503 дня связана со звездой и не является артефактом.

На рис. 3 представлены значения продольного магнитного поля Веги, свернутые с фазами 0.6225503-дневного периода вращения и усредненные по 10 бинам. В течение периода вращения продольная компонента магнитного поля синусоидально изменяется с амплитудой $B_e = 4.2 \pm 1.0$ Гс относительно среднего значения $B_0 = -1.0 \pm 0.7$ Гс. Статистическая достоверность переменности, оцененная с помощью критерия Фишера, составляет $\sim 99.8\%$.

Синусоидальное изменение продольной компоненты магнитного поля с фазами периода вращения можно математически описать в рамках модели наклонного ротатора. Полагая коэффициент потемнения к краю $u = 0.5$ (Кларет, 2003), наилучшую дипольную аппроксимацию наблюдательных данных дает диполь с полярной напряженностью $B_{pol} = 50$ Гс, углом между осью вращения и лучом зрения $i = 8^\circ$ и углом между осью вращения и осью диполя $\beta = 92^\circ$. Поскольку из-за быстрого вращения звезда имеет не круглую, а чечевицеобразную форму, реальная конфигурация магнитного поля может отличаться от диполя.

3 Заключение

Вероятнее всего, признанный спектрофотометрический стандарт Вега является переменной звездой. Однако физические механизмы долгопериодической переменности и нерегулярных краткосрочных изменений блеска и лучевых скоростей требуют дальнейшего исследования. Поскольку Вега видна практически с полюса вращения, а ось магнитного диполя почти перпендикулярна оси вращения, для определения истинной конфигурации магнитного поля и уточнения периода осевого вращения Веги требуются дальнейшие спектрополяриметрические наблюдения.

Литература

- Ауфденберг и др. (Aufdenberg J.P. et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 645. P. 664.
- Бом и др. (Bohm et al.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. id. A90.
- Адельман, Гулливер (Adelman S.J., Gulliver A.F.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 348. P. 712.
- Белопольский (Belopolsky A.) // *Zeitschrift fur Astrophysik.* 1931. V. 2. P. 245.
- Блеквелл и др. (Blackwell D.E. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1983. V. 205. P. 897.
- Бутковская и др. (Butkovskaya V. et al.) // *Astron. Nachr.* 2011. V. 332. P. 956.
- Бутковская, Плачинда (Butkovskaya V., Plachinda S.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 469. P. 1069.
- Бутковская (Butkovskaya V.) // International Conference "Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars". 2013. (in press).
- Васильев и др. (Vasil'ev I.A. et al.) // *IBVS.* 1989a. V. 3308.
- Васильев и др. (Vasil'yev I.A. et al.) // Труды астрономической обсерватории Казанского государственного университета. 1989b. Т. 52. С. 26.
- Гулливер и др. (Gulliver A.F. et al.) // *Astrophys. J.* 1994. V. 429. L81.
- Гуляев и др. // Астрофизические исследования. 1987. Т. 25. С. 60.
- Гутник, Прагер (Guthnick P., Prager R.) // *Astron. Nachr.* 1915. V. 201. P. 443.
- Джонсон (Johnson H.L.) // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* 1980. V. 5. P. 25.
- Джонсон, Вишневи (Johnson H.L., Wisniewski W.Z.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1978. V. 90. P. 139.
- Кларет А. (Claret A.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 401. P. 657.
- Козырев и др. (Kozyrev V.S. et al.) // *Sov. Astron.* 1981. V. 58. P. 1242.
- Линье и др. (Lignieres F. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 500. L41.
- Мережин В.П. // Вега. Анализ и интерпретация данных наблюдений. Казань. Фэн. 2001.
- Ньюбауэр, Фарнсворт (Neubauer F.J., Farnsworth, A.H.) // *Lick Observatory bulletin.* 1935. V. 473. P. 109.
- Петерсон и др. (Peterson D.M. et al.) // *Nature.* 2006. V. 440. P. 896.
- Петит и др. (Petit P. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 523. id. A41.
- Плачинда (Plachinda S.I.) // Астрофизика. 2005. Т. 48. С. 9.
- Рубан // Астрон. циркуляр. 1988. Т. 1532. С. 29.
- Такеда и др. (Takeda Y. et al.) // *Astrophys. J.* 2008. V. 678. P. 446.
- Фат (Fath E.A.) // *Lick Observatory bulletin.* 1935. V. 474. P. 115.
- Фернье (Fernie J.D.) // *Bull. Am. Astron. Soc.* 1980. V. 12. P. 94.
- Фернье (Fernie J.D.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1981. V. 93. P. 333.
- Хилл и др. (Hill G. et al.) // *The A-Star Puzzle.* IAU Symp. 224./ Ed. J. Zverko et al. Cambridge: Cambridge University Press. 2004. P. 35.
- Хилл и др. (Hill G. et al.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. P. 250.