ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД В ФОКУСЕ КУДЭ 1-м ТЕЛЕСКОПА САО РАН

В. Д. Бычков

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
369167, Карачаево-Черкесия, п. Нижний Архыз
e-mail: vbych@sao.ru

Цель работы – найти способы учета инструментальных эффектов для повышения точности магнитных измерений в кудэ-фокусе 1-м телескопа. С помощью простого моделирования магнитной звезды вычислен поляризационный профиль спектральной линии, и по этому профилю найдена стандартным образом оценка магнитного поля. Далее, на основании ранее проведенных исследований вычислены искажения, которым подверглось бы излучение от звезды, прошедшее через оптику телескопа и анализатор. По "искаженному" профилю таким же способом производится оценка магнитного поля. Сравнивая оценки магнитного поля, полученные по исходному и "искаженному" профилю, оценивается влияние инструментальных эффектов. Показано, что основным фактором, влияющим на оценки магнитных полей, является инструментальная деполяризация, уменьшающая величину параметра Стокса V. Найден простой способ учета инструментальных эффектов.

ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее распространенных методов измерения магнитных полей звезд основан на получении зеемановских спектров, т. е. спектров в двух циркулярных поляризациях с высоким спектральным разрешением (R не менее 15 000). Для получения высококачественных спектров часто используют спектрометры, установленные во вторичных фокусах. Но, к сожалению, они имеют один существенный недостаток — инструментальную поляризацию и деполяризацию, образующуюся при отражении светового пучка от диагональных кудэ-зеркал до входа в кудэ-спектрометр. Эта хорошо известная проблема подробно рассматривалась во многих работах [3, 7, 9–11, 15, 23] и ряде других. Проблема инструментальной поляризации во вторичных фокусах решается различными способами. Наиболее распространенные следующие.

1. Устанавливаются специальные устройства – компенсаторы инструментальной поляризации ([4, 7, 18, 25, 28] и другие авторы). Идеология расчета таких систем подробно изложена в работе Розенберга [27].

2. Второй путь – учет инструментального влияния математически. Этот подход в постановочном плане ранее уже рассматривался в [20, 24], но не был доведен до конкретных рекомендаций. Учет влияния инструментальной поляризации на измерения магнитных полей в некоторых случаях (см., например, докторские диссертации [16] и [32]) проводится путем простого прямого сравнения результатов собственных измерений с результатами известных авторов для магнитных "стандартов". Это надежный, но очень грубый учет инструментальных эффектов, т. к. при этом сами оценки просто корректируются на определенную фиксированную величину. В частности, для фокуса Нэсмит-2 6-метрового телескопа САО РАН, в котором, в основном, и проводятся магнитные измерения, полученная оценка магнитного поля просто увеличивается на 5%.

3. Существует и более радикальное решение проблемы – установка поляризационной анализирующей оптики в первичном фокусе, не отягощенном инструментальной поляризацией, а затем уже переброс светового пучка с помощью световодов на вход высокодисперсионных стабилизированных (стационарных) спектрометров (см. обзор [19]). Но и это решение имеет недостатки – ограничения по пропусканию применяемых световодов.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПО ПРОФИЛЯМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

Распределение наблюдаемой линейной и циркулярной поляризации по профилям линий у магнитных звезд исследовалось в ряде работ ([8, 9, 24] и другие). Обычно наблюдаемая циркулярная поляризация по профилю спектральных линий редко превышает 10% [8] и в среднем составляет около 1%. Но в этой работе для количественного исследования влияния инструментальных эффектов удобней воспользоваться специально рассчитанными профилями спектральных линий. Идеология моделирования профилей спектральных линий для магнитных звезд развита во многих работах [5–7, 21] и частично повторена в работе [26]. В настоящее время методика расчета теоретических поляризационных спектров также развита достаточно детально в работах [1, 22, 30] (и ряда других авторов). Прогресс в немалой степени обусловлен появлением весьма мощных компьютеров, достаточно совершенного программного обеспечения, разработанного этими авторами (COSSAM, CARAT, ZEEMAN, ZEEMAN2), и общедоступной базы атомных данных VALD. Но в данном случае не было необходимости использовать столь мощные инструменты для решения поставленной задачи и применялось простое стандартное моделирование для звезды со следующими параметрами:

- Звезда с параметрами $T_{эф} = 10\,000$ К и $\lg g = 4.5$, $V \sin I = 20$ км/с, угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения $i = 90°$.
- Магнитное поле имеет конфигурацию центрального не смещенного диполя, ось которого наклонена к оси вращения на угол $\beta = 90°$, $B_p = 10\,000$ Гс. Рассматривается фаза максимального положительного магнитного поля.
- Для интегрирования вся видимая поверхность звезды разбивалась на 31401 участок, что вполне достаточно для решения поставленной задачи. Для рассмотрения использовалась спектральная линия Fe II $\lambda\,4520.225$ Å 37 мультиплета с эффективным фактором Ланде $g_{эф} = 1.500$, определенным по таблицам [2].

Распределение поляризации по профилю спектральной линии вычислялось согласно Унно [31] в предположении модели Милна–Эддингтона, разработанной ранее в [29]. Распределение элементов по поверхности принималось однородным. Несмотря на хорошо известный из наблюдений факт, что распределение химических элементов по поверхности магнитных Ap-звезд имеет "пятенную" структуру, это вполне оправданное упрощение. Введение пятен на поверхности только бы усложнило профиль линии и усложнило бы основную задачу – исследование влияния инструментальной поляризации на получаемые оценки магнитного поля. Вычисленный "неискаженный профиль" изображен на рис. 2.

ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ И ПРОФИЛЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Величина оценки магнитного поля напрямую зависит от величины измеренной циркулярной поляризации в крыльях спектральной линии. Ранее было изучено, как воздействуют инструментальные эффекты на излучение в кудэ-фокусе 1-м телескопа [10, 11, 14]. Инструментальные эффекты приводят в том числе и к ослаблению циркулярной поляризации — деполяризации, величина которой зависит от длины волны [11]. Все это позволяет последовательно вычислить изменения, которым подверглось излучение, прошедшее через оптику телескопа и анализатор. В результате этих вычислений получен профиль линии после воздействия всех инструментальных эффектов, изображенный на рисунке 1. Как видно из рисунка, поляризационные профили после "воздействия" инструментальных эффектов стали менее контрастны, более асимметричны и показывают меньшее расщепление $\Delta\lambda$. Оценка магнитного поля, полученная по "искаженному" профилю составляет $B_e = 3029$ Гс, тогда как оценка по исходному профилю дает значение $B_e = 3237$ Гс, т. е. уменьшилась на 6.4%.

Поскольку основным инструментальным эффектом, влияющим на оценки магнитного поля, является деполяризация, определим количественную зависимость влияния деполяризации на результирующие оценки магнитного поля. Для этого отыщем зависимость магнитного поля B_e от величины деполяризации (dep). Используя то обстоятельство, что известна количественная зависимость (dep) от длины волны (выражение 1), найдем, как меняется B_e с длиной волны. Исходя из полученной зависимости, был найден коэффициент $K_b(\lambda)$, который указывает, на какую величину надо домножить полученную оценку магнитного поля $B_{ei}(\lambda)$ по каждой спектральной линии, чтобы исправить оценку $B_{ei}(\lambda)$ за инструментальные эффекты. Зависимость от длины волны этого коэффициента, представленная на рис. 2, описывается выражением:

$$K_b(\lambda) = 4.81205 - 0.00221208 \cdot \lambda + 4.95726 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^2 - 5.06176 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda^3 + 1.98617 \cdot 10^{-15} \cdot \lambda^4. \qquad (1)$$

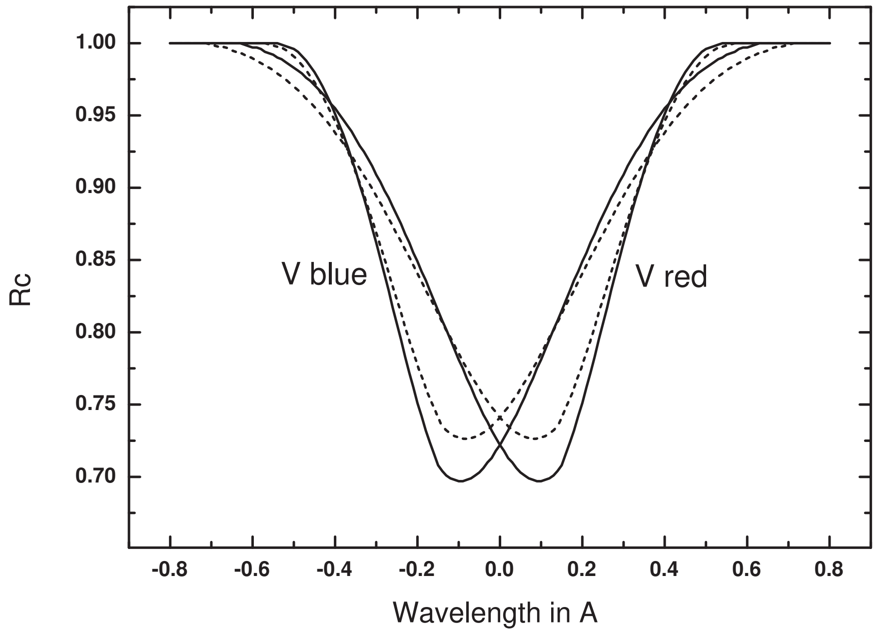

Рис. 1. Профили в лево- и правоциркулярной поляризации линии с исходными значениями (сплошная линия), и те же профили после учета всех инструментальных эффектов (штриховая линия). Как видно, поляризационные профили после "воздействия" инструментальных эффектов стали менее контрастны, более асимметричны и показывают меньшее расщепление $\Delta\lambda$

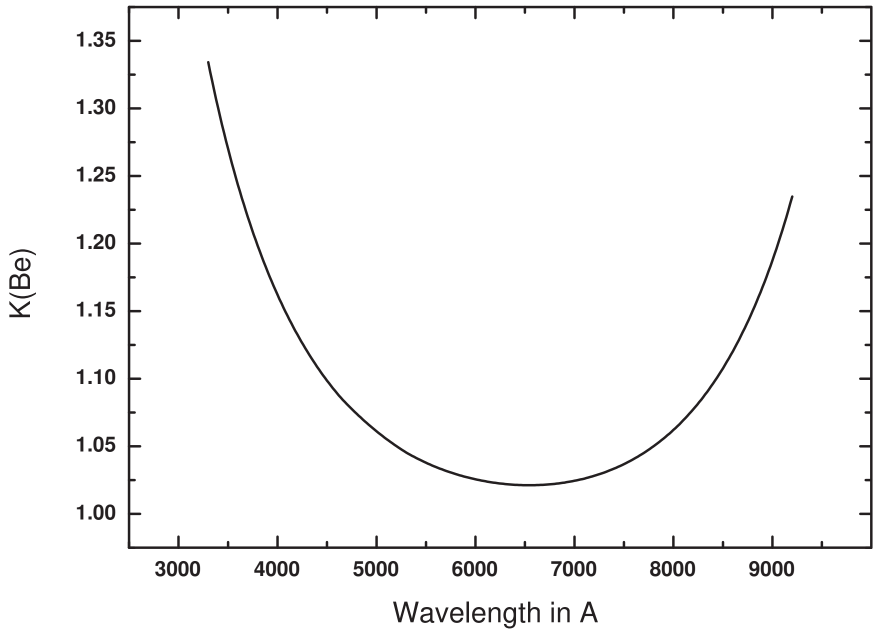

Рис. 2. Величина поправочного коэффициента $K_b(\lambda)$, позволяющего исправлять инструментальные эффекты в зависимости от длины волны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований влияния инструментальных эффектов на величину магнитного поля было показано, что наибольшее влияние оказывает инструментальная деполяризация, которая зависит от длины волны. Это позволяет достаточно просто производить учет инструментальных эффектов. Для примера можно привести измерения магнитного поля уникальной магнитной Ap-звезды γ Equ, для которой были получены 33 спектра [13]. Количество использованных линий при измерении поля менялось от 500 до 1100 от спектра к спектру в зависимости от накопления, которое определялось условиями наблюдений. В результате введения поправок за инструментальные эффекты, оценки магнитного поля для γ Equ увеличивались для каждого спектра на некоторую величину, и это увеличение, выраженное в процентах и усредненное по всем 33 спектрам, составило $5.56 \pm 0.48\%$, при этом величина стандартной ошибки уменьшилась в среднем на $6.38 \pm 0.73\%$ для этих же спектров [13]. Относительно близкие значения поправок были получены и по другим исследуемым объектам.

Из полученной зависимости (1) также следует, что наиболее благоприятный диапазон длин волн для проведения магнитных измерений лежит в пределах от $\lambda\,5200$ до $\lambda\,7800$ Å, в котором инструментальные эффекты менее 5%. Минимальное значение инструментальные эффекты имеют на длине волны $\lambda\,6540$ Å и составляют всего 2.12%.

Оценки магнитного поля, полученные в фокусе кудэ 1-метрового телескопа САО РАН после учета инструментальных поправок описанным способом, показывают очень хорошее согласие с результатами высокоточных измерений "магнитных" стандартов – α^2 CVn и 53 Cam [12, 14].

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить В. С. Лебедева, И. Д. Найденова и Л. В. Бычкову за полезные замечания и обсуждения, благотворно повлиявшие на работу. В работе использовалась Венская база атомных данных VALD-2. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-16995-а и Польского комитета научных исследований, грант No. 1 P03D 001 26.

[1] *Alecian G., Stift M. J.* Radiative accelerations in stars: The effect of Zeeman splitting // Astron. and Astrophys. – 2002. – **387**. – P. 271–284.

[2] *Beckers J. M.* A Table of Zeeman Multiplets // Sacramento Peak Observ. Contribution. – 1969. – **141**. – P. 3–401.

[3] *Babcock H. W.* A Catalog of Magnetic Stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1958. – **3**. – P. 141.

[4] *Babcock H. W.* The 34-kiloGauss Magnetic Field of HD 215441 // Astrophys. J. – 1961. – **132**. – P. 521.

[5] *Borra E. F.* The orientation of magnetic axes in Ap stars: An alternative interpretation of the component with small obliquity // Astrophys. J. – 1974. – **186**. – P. 271–274.

[6] *Borra E. F.* On the interpretation of the magnetic curves of the Ap stars as determined by the photographic technique // Astrophys. J. – 1974. – **188**. – P. 287–290.

[7] *Borra E. F.* Polarimetry at the coude focus. Instrumental effects // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1976. – **88**. – P. 548–556.

[8] *Borra E. F.* The geometry of the magnetic field of 78 Virginis // Astrophys. J. – 1980. – **235**. – P. 915–924.

[9] *Borra E. R., Vaughan A. H.* High-resolution polarization observations inside spectral lines of magnetic AP stars. I. Instrumentation and observations of Beta Coronae Borealis // Astrophys. J. – 1977. – **216**. – P. 462–478.

[10] *Bychkov V. D., Romanenko V. P., Bychkova L. V.* Study of instrumental polarization at the coude focus of the SAO 1-m telescope // Bull. Special Astrophys. Obs. – 1999. – **45**. – P. 110–116.

[11] *Bychkov V. D., Romanenko V. P., Bychkova L. V.* Investigation of instrumental depolarization at the coude focus of the 1 m telescope of SAO RAS // Bull. Special Astrophys. Obs. – 2000. – **49**. – P. 147–151.

[12] *Bychkov V. D., Bychkova L. V., Madej J.* A catalog of stellar magnetic rotational phase curves // Astron. and Astrophys. – 2005. – **430**. – P. 1143–1154.

[13] *Bychkov V. D., Bychkova L. V., Madej J.* Secular variability of the longitudinal magnetic field of the Ap star γ Equ // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2006. – **365**. –P. 585–589.

[14] *Bychkov V. D.* Circular polarization analyzer for the coude focus of the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. Design, parameters, and errors // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 2008. – **63**. – P. 83–94.

[15] *Wolff S. C., Bonsack W. K.* Magnetic-Field Variations in 78 Virginis, Beta Coronae Borealis, and 73 Draconis // Astrophys. J. Supl. Ser. – 1972. – **176**. – P. 425.

[16] *Глаголевский Ю. В.* Проблемы происхождения и эволюции магнитных поле химически пекулярных звезд. – Докторская диссертация. – Нижний Архыз, 1988.

[17] *Capitani C., Cavallini F., Ceppatelli G., et al.* Polarization properties of a 'Zeiss-type' coelostat. The case of the solar Tower in Arcetri // Solar Phys. – 1989. – **120**. – P. 173–191.

[18] *Clarke D.* Effects of Polarization on the Transmission of Coude-Spectrometer Systems // Astron. and Astrophys. – 1973. – **24**. – P. 165.

[19] *Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Романенко В. П., Найденов И. Д.* Поляриметрия и спектрополяриметрия звезд. Приборы и методы // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 2005. – **58**. – P. 132–144.

[20] *Кувшинов В. М.* О влиянии инструментальной поляризации на измерения продольных магнитных полей звезд с магнитографом // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1974. – **50**. – P. 52–56.

[21] *Лебедев В. С.* Расчет параметров Стокса для излучения в линиях от магнитных звезд // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 1980. – **12**. – P. 25–34.

[22] *Leone F., Vacca W. D., Stift M. J.* Measuring stellar magnetic fields from high resolution spectroscopy of near-infrared lines // Astron. and Astrophys. – 2003. – **409**. – P. 1055–1064.

[23] *Nariai K.* Design and adjustment of polarization compensators for coudeoptics of stellar telescopes // Annals Tokyo Astron. Obser. Supll. Ser. – 1982. – **19**. – P. 55–85.

[24] *Северный А. Б., Кувшинов В. М., Никулин Н. С.* Фотоэлектрические исследования слабых магнитных полей звезд // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1974. – **50**. – P. 3–51.

[25] *Pillet V. M., Almeida J. S.* A proposal for a low instrumental polarization coude telescope // Astron. and Astrophys. – 1991. – **252**. – P. 861–865.

[26] *Пискунов Н. Е., Хохлова В. Л.* Численное моделирование профилей круговой поляризации в спектрах магнитных Ap-звезд // Письма в Астрон. журн. – 1983. – **9**. – P. 665–672.

[27] *Розенберг Г. В.* Вектор-параметр Стокса. Матричные методы учета поляризации излучения в приближении лучевой оптики // Успехи физических наук, Москва. – **56**. – P. 77–110.

[28] *Vogt S. S., Tull R. G., Kelton P. W.* Performance of the Zeeman analyzer system of the McDonald Observatory 2.7 meter telescope // Astroph. J. – 1980. – **236**. – P. 308–317.

[29] *Chandrasekhar S.* Radiative Transfer. – Oxford Univ. Press, 1950.

[30] *Stift M. J., Leone F.* Magnetic intensification of spectral lines // Astron. and Astrophys. – 2003. – **398**. – P. 411–421.

[31] *Unno W.* Line Formation of a Normal Zeeman Triplet // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1956. – **8**. – P. 108.

[32] *Романюк И. И.* Магнитные поля химически пекулярных звезд главной последовательности. – Докторская диссертация. – Нижний Архыз, 2004.