

О СУЩЕСТВОВАНИИ РАДИАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ПОЛЯ В АТМОСФЕРАХ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД

И. И. Романюк

Обсуждается реальность различия величины магнитного поля, измеренного по нейтральным атомам и ионам одного и того же элемента. Для звезд 53 Cam и α^2 CVn эти различия могут быть объяснены существованием радиального градиента магнитного поля.

We discuss reality of differences in the magnetic field value from neutral atoms and ions for the same element. For the stars 53 Cam and α^2 CVn these difference can be explained by the existence of the radial gradient of the magnetic field.

Вопрос о существовании градиента магнитного поля с глубиной (радиального градиента поля) в атмосферах магнитных звезд неоднократно обсуждался в литературе [1—5], но до сих пор остается много неясностей. Принципиальные трудности состоят в том, как уловить изменения поля с глубиной в слое толщиной 10^3 — 10^4 км при «пятнистой» поверхности звезды диаметром 10^6 — 10^7 км, а также в определении глубины образования линий в неоднородной звездной атмосфере.

Для Солнца существует несколько методов определения глубины образования линий в пятнах, в том числе и не зависящие от модели [6]. Применяя последний метод, Гусейнов [7] вычислил, что в глубоких слоях солнечной атмосферы величина поля в тени пятна уменьшается с высотой с градиентом 0.8—2.3, а в высоких слоях 0.2—0.6 Гс/км, что согласуется со значениями, найденными ранее разными авторами для разреженных моделей тени пятна [8—10].

Измерения магнитных полей звезд представляют собой довольно трудную процедуру, которую можно выполнить только по спектрам с высоким разрешением. Даже при дисперсии 1—3 Å/мм и расширенном до 0.5—0.7 мм спектре средняя квадратическая ошибка измерения поля по одной линии достигает 400—500 Гс. Поэтому если общее «эффективное» поле H_0 измерено уже у многих десятков звезд, то данных об измерениях поля H_1 (по отдельным элементам) чрезвычайно мало. В литературе обсуждаются следующие особенности магнитных полей звезд.

1. Все известные поля переменны, часто знакопеременны. Большая часть звезд показывает периодическую переменность поля.

2. Величина поля заметно зависит от интенсивности измеренных линий.

3. Линии разных элементов или нейтральных атомов и ионов одного и того же элемента дают переменные поля, разные по амплитуде.

В настоящей работе на основании наших измерений магнитного поля и литературных данных мы критически рассмотрели две последние особенности, реальность которых могла бы свидетельствовать о наличии градиента магнитного поля с глубиной в атмосферах магнитных звезд.

Ошибки измерений поля. Фотографические наблюдения магнитных полей в САО АН СССР проводятся в 1-й и 2-й камерах основного звездного

ТАБЛИЦА 1

Номер спектра	Середина экспозиции	t экспозиции	Фаза	H_e , Гс
17	1^h23^m	4^m	0.87	-2030 ± 380
20	1^h48^m	4	0.87	-2190 ± 360 -2250 ± 280

спектрографа БТА. Методика получения и измерения магнитограмм описана в [11, 12]. Остановимся подробнее на ошибках определения магнитного поля на примере спектров 53 Сам, полученных 12/13.09. 1976 с дисперсией $9 \text{ \AA}/\text{мм}$. Ширина спектров равна $0.25-0.30 \text{ мм}$. Данные об этих спектрограммах представлены в табл. 1.

На точность измерения магнитного поля влияют многие факторы: ошибки наведения на центр тяжести линии, ошибки измерительного

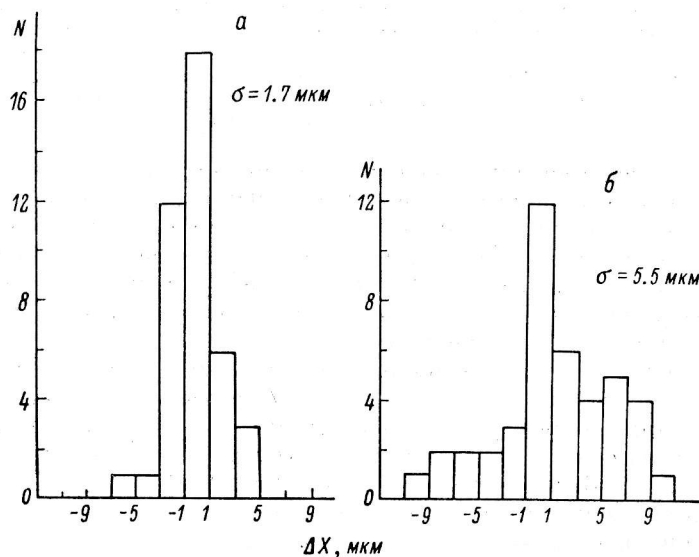


Рис. 1.

прибора, зерно и неоднородности фотоэмульсии. На рис. 1 показан вклад этих факторов.

На рис. 1, *a* изображена гистограмма распределения ошибок измерения поля, выполненных по одной и той же спектрограмме (№ 20) и по одним и тем же линиям в разное время. Различия в величине измеренного по отдельным линиям поля возникают в этом случае из-за ошибок прибора и неточностей определения центров тяжести линий. Из рис. 1, *a* видно, что средняя квадратическая ошибка равна $\pm 1.7 \text{ мкм}$, что соответствует ошибке определения поля $\pm 800 \text{ Гс}$.

На рис. 1, *б* изображено распределение ошибок измерений магнитного поля, полученного по двум спектрограммам (№ 17 и 20) в одинаковых фазах, поэтому реальными изменениями в звезде можно пренебречь, а все отклонения объяснить ошибками. В таком случае кроме изображенных на рис. 1, *a* мы должны рассматривать также ошибки, возникающие из-за зерна и неоднородностей фотоэмульсии. На рис. 1, *б* показана гистограмма распределения суммарной ошибки измерений магнитного поля по каждой отдельной линии. На обеих спектрограммах измерялись одни и те же ли-

нии. Видим, что суммарная средняя квадратическая ошибка определения поля по одной линии достигает 5.5 мкм, что соответствует ± 2500 Гс.

Таким образом, при измерениях узких спектров (шириной меньше 0.3 мм) определяющий вклад в ошибки определения поля магнитных

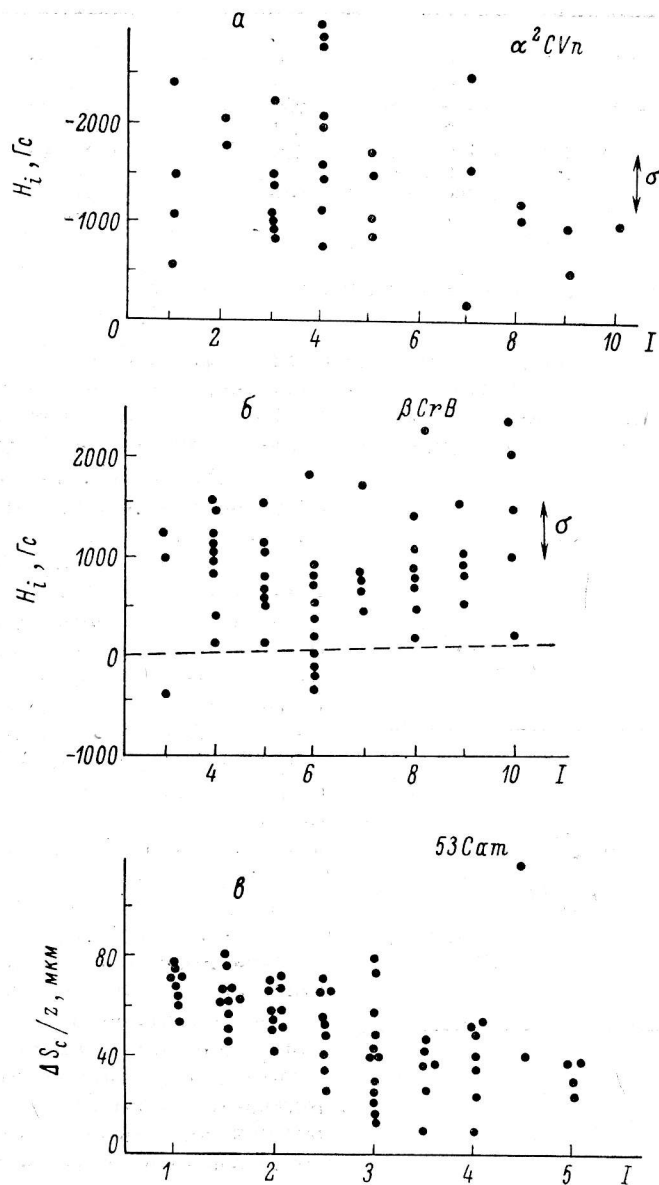


Рис. 2.

звезд по отдельным линиям вносят шумы эмульсии. Для хорошо расширенных высокодисперсионных спектров преобладают ошибки наведения на центр тяжести, особенно если профиль линии сложный.

Зависимость от интенсивности линий. Рассмотрим подробнее зависимость измеренного значения поля от интенсивности измеренной линии. В литературе [1, 13, 14] указывается, что для некоторых звезд слабые линии показывают большее поле, чем остальные. Престон [13] для 53 Cam объясняет этот эффект насыщением линий. Посмотрим, имеет ли место подобная зависимость для $\alpha^2 CVn$ и βCrB . Для сравнения с результатами

ТАБЛИЦА 2

Фаза	H_e , Гс	H_l , Гс			
		Fe I (n)	Fe II (n)	Ti II (n)	Cr II (n)
0.23	4200 ± 320	3600 ± 610 [15]	5640 ± 1430 [7]	7050 ± 340 [9]	4140 ± 450 [17]
0.54	-200 ± 350	-380 ± 580 [20]	-1030 ± 780 [15]	-820 ± 700 [19]	390 ± 440 [34]
0.64	-1820 ± 330	-1750 ± 470 [49]	-2330 ± 510 [39]	-1190 ± 460 [42]	-1430 ± 320 [79]
0.87	-2650 ± 240	-2680 ± 360 [45]	-3010 ± 340 [35]	-2870 ± 450 [25]	-2010 ± 270 [72]

Примечание. В квадратных скобках указано количество линий.

Престона ([13] и рис. 2, в) мы построили аналогичные зависимости для α^2 CVn (рис. 2, а) и β CrB (рис. 2, б). Глазомерные оценки интенсивности измеренных линий взяты из [15, 16]. Средние квадратические ошибки измерения поля по одной линии составляют ± 400 Гс для β CrB, ± 600 Гс

для α^2 CVn (при дисперсии $1.3 \text{ \AA}/\text{мм}$ и ширине спектров 0.6 мм) и ± 1000 Гс для 53 Cam [13].

Мы полагаем, что разный вид зависимости для разных звезд говорит о том, что одним фактором эту особенность объяснить нельзя; вероятнее всего, налагается несколько факторов: эффекты насыщения линий, сложность условий образования линий в сильных магнитных полях, а также реальный рост напряженности поля с глубиной в атмосферах некоторых магнитных звезд. Нужна количественная оценка вклада каждого из вышеперечисленных факторов.

Зависимость от степени ионизации. Бэбкок [14] отмечает, что для медленно вращающихся звезд с резкими линиями магнитное поле, измеряемое по разным элементам и ионам, получается одинаковым, в то время как для более быстро вращающихся звезд существуют различия. В рабо-

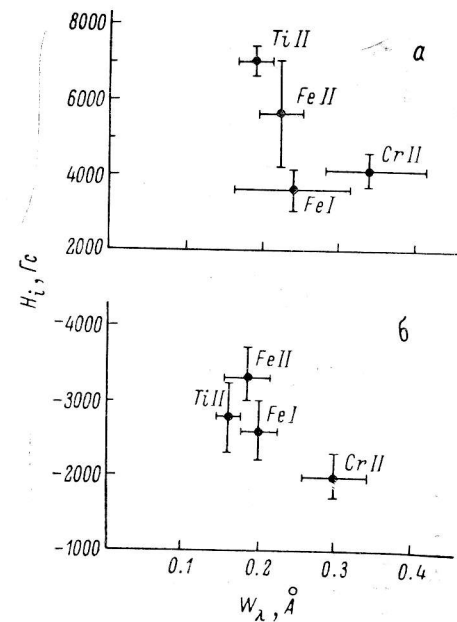


Рис. 3.

тах [17, 18] также указывается на разницу измеренных значений поля по разным элементам. Обычно различия эти небольшие, а авторы, как правило, не приводят никаких количественных оценок достоверности результатов. Поэтому возникает вопрос о реальности имеющихся различий. В табл. 2 приведены результаты наших измерений поля 53 Cam.

Проанализируем достоверность имеющихся различий. Используя критерий Стьюдента, мы видим, например, что линии Cr II у 53 Cam постоянно показывают меньшее поле, чем линии Fe II, с достоверностью 99.9%, т. е. обнаруженные различия надо считать реальными. Чтобы учесть возможное влияние неоднородного распределения элементов по поверхности, найдем достоверность различий в значении поля, определенного по нейтральным атомам и ионам железа.

Анализ значений этих различий показывает, что в среднем для всех спектров 53 Cam достоверность того, что различия не случайные, составляет 92%. Посмотрим, как сказывается на этих соотношениях зависимость поля от интенсивности линий на примере двух фаз 53 Cam (рис. 3).

Из рисунка видно, что более интенсивные линии Cr II дают меньшее поле; таким образом, зависимость от эквивалентной ширины может искажать реальные различия поля по линиям разных элементов. Линии Fe I и Fe II в среднем имеют одинаковую эквивалентную ширину, поэтому эффект зависимости от интенсивности не может повлиять на измеряемые между ними различия.

Достоверность этих различий достаточно высокая ($P=92\%$) и это может служить указанием на существование градиента магнитного поля в атмосфере 53 Cam.

Рассмотрим другие звезды. Для α^2 CVn воспользуемся измерениями магнитного поля, выполненными Пайпер [17]. Для выявления различий по разным элементам найдем среднее значение поля H_i по 10 спектрам, в пределах фаз 0.91—1.17, где поле H_e практически не изменяется. Результаты усреднения приведены в табл. 3. Согласно [17], ошибки измерения поля по одной линии составляют ± 400 —500 Гс.

ТАБЛИЦА 3

Элемент	H_i , Гс (n)	Элемент	H_i , Гс (n)	Элемент	H_i , Гс (n)	Элемент	H_i , Гс (n)
Gd I	-700 [30]	Cr I	-760 [50]	Mn I	-4380 [30]	Fe I	-900 [70]
Gd II	-1130 [160]	Cr II	-1040 [310]	Mn II	-4780 [20]	Fe II	-1260 [410]

Из табл. 3 видно, что у всех элементов, для которых есть измерения в двух стадиях ионизации, поле по ионам получается большим, чем поле по нейтральным атомам. Оценка достоверности этого различия показала, что оно имеет надежность $P > 99.5\%$. Полученные данные приведены для благоприятных условий, так как в [19] показано, что в фазах около 0.0 хорошо видны элементы железного пика и редкие земли. Эффекты неравномерного распределения элементов по поверхности здесь сказываются сравнительно мало, поэтому имеющиеся различия можно объяснить увеличением поля с глубиной в атмосфере α^2 CVn.

ТАБЛИЦА 4

Элемент	H_i , Гс	Средняя интенсивность линий [16] по глазомерным оценкам	Элемент	H_i , Гс	Средняя интенсивность линий [16] по глазомерным оценкам
Fe I	+750±185 [12]	5.9	Cr II	+740±225 [11]	5.3
Fe II	+960±230 [10]	6.1	Ti II	+480±150 [11]	6.2
Cr I	+820±140 [3]	6.0	Eu II	+1130±140 [3]	9.0

В табл. 4 приведены наши измерения магнитного поля у β CrV, выполненные по спектру с дисперсией 1.3 Å/мм (фаза 0.17, $H_e=750 \pm 80$ Гс).

Анализ таблицы показывает, что не видно зависимости величины поля β CrV от интенсивности линий. Для железа намечается зависимость — большее поле по ионам и меньшее по нейтральным атомам, однако достоверность различия составляет всего 61%.

Наблюдения в области бальмеровского скачка. Как видно из вышеизложенного, типичные различия поля, измеренного по ионам и нейтраль-

ным атомам, составляют несколько сот гаусс. Согласно моделям [20], для $\theta=0.5$ и $\lg g=4$ различия в глубине образования разных ионов железа оцениваются в несколько сот километров. Таким образом, можно ожидать градиента поля с глубиной, достигающего значений порядка нескольких гаусс на километр. (Мы не учитываем влияния возможного неравномерного распределения нейтральных атомов и ионов одного и того же элемента по поверхности).

1. Следует отметить, что преимущественное число наблюдений магнитного поля выполнено в узкой спектральной области $\Delta\lambda=300 \text{ \AA}$ (около $\lambda=4300 \text{ \AA}$), поэтому диапазон разностей оптических глубин невелик.

2. Чтобы увеличить его, нужно провести измерения магнитного поля H_i одновременно до и после бальмеровского скачка.

3. В связи с началом эксплуатации первых ахроматических анализаторов [12] будут возможны одновременные наблюдения магнитного поля в линиях с длиной волны короче и длиннее $\lambda=3647 \text{ \AA}$, что существенно увеличит диапазон наблюдаемых эффективных глубин образования линий. Для исключения неравномерного распределения по поверхности нужны измерения поля по линиям одного мультиплета, но такого, часть линий которого образуется до бальмеровского скачка, а часть — после. В качестве примера в табл. 5 приведены некоторые из отобранных нами мультиплетов, линии которых присутствуют в спектре β CгВ. (Отождествление проведено К. И. Козловой).

ТАБЛИЦА 5

Элемент	Мультиплеты	Элемент	Мультиплеты
Sc II	2	Fe I	46, 130, 133, 135, 180, 295,
Ti II	116		322, 323, 324, 389, 390, 393,
Ti I	19, 118		437, 440, 490, 568, 569
Cr I	47, 48	Fe II	111
Cr II	12	Co I	4, 21, 64
		Sm II	19

Выводы. На основании наших измерений поля и литературных данных можно сделать следующие выводы.

1. Для α^2 CVn и 53 Cam различия поля, измеренного по нейтральным атомам и ионам у одного и того же элемента, существенно превышают ошибки измерений, при этом поле по ионам получается большим, чем по нейтральным атомам.

2. У звезды 53 Cam существует зависимость поля от эквивалентной ширины линий, которая только частично объясняется методикой измерений поля.

3. Оба вывода косвенным образом свидетельствуют о возможном увеличении значения поля с глубиной в атмосферах звезд α^2 CVn и 53 Cam с градиентом порядка нескольких Гс/км.

4. Для более уверенного определения радиального градиента поля нужны измерения до и после бальмеровского скачка, желательно по линиям одного мультиплета.

Когда настоящая статья уже была подготовлена к печати, вышла работа [21], автор которой произвел измерения магнитных полей для α^2 CVn, 78 Vir и β CгВ с целью определения радиального градиента поля. Различия в H_e , измеренном до и после скачка, не превышают 25% величины поля, поэтому автор [21] не определяет количественно величину градиента. Тем не менее для α^2 CVn заметна меньшая амплитуда изменений поля, измеренного в ультрафиолете по сравнению с обычной фотографической областью. Это не противоречит выводам нашей работы о том, что магнитное поле α^2 CVn увеличивается с глубиной.

Автор считает своим долгом выразить признательность Ю. В. Глаголевскому за предложение темы, руководство и помощь в работе, И. М. Копылову за ценные советы, В. С. Лебедеву, В. В. Соколову и Л. А. Пустильнику за полезные дискуссии.

Список литературы

1. Babcock H. W. The magnetic field of γ Equ. — *Astrophys. J.*, 1949, **108**, No 2, p. 191.
2. Preston G. W. Studies of stellar magnetism — past, present and future. — *Contrib. Lick. Obs.*, 1965, No 205, p. 25.
3. Асланов И. А., Рустамов Ю. С. Измерение магнитного поля у звезды β CrB. — *Письма в АЖ*, 1975, № 4, 1, с. 21.
4. Adelman S. J. The peculiar A-star HD215441. — *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, 1974, **27**, No 242, p. 203.
5. Wolff S. C. Magnetic fields: observational aspects. — In: *Physics of Ap-stars*. Vienna, 1976, p. 415.
6. Северну А. В., Вумба В. О проникновении солнечных магнитных полей в хромосферу. — *«Observatory»*, 1958, **78**, No 902, p. 33.
7. Гусейнов М. Дж. О величине вертикального градиента напряженности магнитного поля в тени пятен. — *Изв. КрАО*, 1978, **58**, с. 31.
8. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М., «Мир», 1967. 282 с.
9. Гусейнов М. Дж. Определение напряженности магнитного поля по разным линиям поглощения. — *Изв. КрАО*, 1968, **39**, с. 253.
10. Гусейнов М. Дж. Вертикальное распределение напряженности магнитного поля в ядре солнечного пятна. *Изв. КрАО*, 1970, **41—42**, с. 89.
11. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Копылов И. М. и др. Первые наблюдения магнитных полей на 6-м телескопе. — *Письма в АЖ*, 1977, № 11, с. 500.
12. Глаголевский Ю. В., Найденов И. Д., Романюк И. И., Чупакова Н. М., Чунтонов Г. А. Опыт применения ахроматического анализатора на 6-м телескопе. — *Сообщ. САО*, 1978, **24**.
13. Preston G. W. Partial resolution of Zeeman patterns in the spectrum of 53 Cam. — *Astrophys. J.*, 1969, **157**, No 1, p. 247.
14. Бэбкок Г. У. Магнитные поля звезд. — В кн.: *Звездные атмосферы*. Под ред. Гринстейна. М., Изд-во иностр. лит., 1963, с. 283.
15. Struve O., Swings P. The spectrum of α^2 CVn. — *Astrophys. J.*, 1943, **98**, p. 361.
16. Hiltner W. A. The spectrum of β CrB. — *Astrophys. J.*, 1945, **102**, p. 438.
17. Purer D. M. α^2 CVn and the oblique-rotator theory. — *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, 1969, **18**, p. 347.
18. Wolff S. C. The magnetic field variations of HD188041. — *Astrophys. J.*, 1969, **157**, p. 253.
19. Кумайгородская Р. Н., Копылов И. М. Спектрофотометрическое исследование магнитно-переменной звезды α^2 CVn по спектрограммам высокого разрешения. II. Некоторые особенности спектральной переменности. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1970, **4**, с. 50.
20. Carbon D. F., Gingerich O. — In: *Theory and Observation of Normal Stellar Atmospheres*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1969, p. 337.
21. Wolff S. C. A search for radial gradients of the magnetic fields in the atmospheres of α^2 CVn, 78 Vir and β CrB. — *PASP*, 1978, **90**, p. 412.