

ПОИСК СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД

Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк,
И. Д. Найденов, В. Г. Штоль

На магнитометре Основного звездного спектрографа по линиям металлов и на спектрополяриметре по линиям водорода на 6-м телескопе проведены измерения магнитных полей ряда нормальных звезд главной последовательности, сверхгигантов и ртутно-марганцевых звезд. Эти данные, а также данные, полученные другими авторами, проанализированы статистически. Сделан вывод, что у изученных звезд вряд ли есть дипольное магнитное поле, превышающее 10—15 Гс, хотя у отдельных сверхгигантов (например, ν Cep, Канопус), поле, как известно, наблюдается.

The magnetic fields of some normal stars of the main sequence, supergiants and Hg-Mn stars have been measured from metallic and hydrogen lines on the 6-m telescope with the Fabry—Perot magnetometer and spectropolarimeter. These results and the data of other authors are statistically analysed. A conclusion is drawn that the studied types of stars hardly contain a magnetic field exceeding 10—15 Gauss, though in some individual supergiants (for example ν Cep and Canopus) fields can be present.

1. Гипотеза наиболее вероятного механизма возникновения магнитных полей химически пекулярных звезд должна объяснять, почему только 10 % звезд главной последовательности в пределах спектральных классов от В0 до F0 имеют сильные магнитные поля. Разные авторы задают вопрос: может быть, все звезды обладают магнитными полями, только у нормальных они слабее? Этой проблемой занимались Бэбкок [1], Престон [2] и др.; все они получили отрицательный результат. Можно предположить, что использовавшийся ими фотографический метод недостаточно точен — ошибки измерений магнитного поля достигают 100—200 Гс. Очевидно, что дальнейшие попытки обнаружить магнитное поле у нормальных звезд необходимо делать только с использованием фотоэлектрической методики. Одним из основательных исследований такого рода является работа Ландстрита [3]. Список измеренных им звезд содержит 35 объектов, среди которых 25 измерено со средней квадратической ошибкой $\sigma < 100$ Гс, но только 6 — более 1 раза. Эту работу можно отнести к числу первичных обзоров и необходимо продолжить поиск слабых магнитных полей нормальных звезд. К тому же следует добавить, что ни одна из измеренных звезд не показала наличия достоверного значения магнитного поля.

В связи со сказанным мы тоже включили в свою наблюдательную программу ряд звезд разных типов, причем у некоторых из них ранее уже делались попытки измерить поле. В первую очередь мы ставили перед собой следующие задачи:

- 1) увеличить количество измерений для большей надежности;
- 2) измерить поле звезд с другой аппаратурой и по другим спектральным линиям для повышения надежности выводов (взаимный контроль);
- 3) измерить поле в другие моменты времени для исключения влияния возможной переменности.

Кроме нормальных звезд главной последовательности мы включили в программу наблюдений ряд ртутно-марганцевых звезд, у которых до сих пор тоже не обнаружено поле, а также несколько звезд с высокой светимостью. Ртутно-марганцевые звезды особенно интересны потому, что они принадлежат к химически пекулярным звездам. Можно предположить у них наличие слабого магнетизма, но возникает вопрос, при какой минимальной величине поля исчезают химические аномалии, наличие которых всегда связывается с присутствием поля. Имеются и другие проблемы [4]. Звезды с высокой светимостью интересны

ТАБЛИЦА 1
Звезды главной последовательности

Звезда	<i>Sp</i>	JD 244000.0+	B_e , Гс	$\pm\sigma$, Гс	B_e/σ	Примечание
α CMi	F5IV—V	3827.52	33	20	1.65	* FeII 4520 Å
		2357.04	-17	7	2.43	[3] H-линии
α CMa	A1V	2358.00	<7	7	<1.00	То же
		3827.35	1	10	0.10	* FeII 4520 Å
		3563.41	-33	100	0.33	* То же
		1740.18	32	15	2.13	[11] FeII 4520 Å
		1758.22	-29	29	1.00	То же
		1759.18	-5	29	0.17	»
		2002.56	13	23	0.56	»
		2090.27	-2	20	0.10	»
		2091.19	-17	17	1.00	»
		2092.21	1	24	0.04	»
		2147.17	34	24	1.42	»
		1380.7	<24*	24	<1.00	[9] CrI 4254 Å
		1381.7	<9	9	<1.00	То же
		1383.7	<9	9	<1.00	»
α Lyr	A0V	3826.18	-14	45	0.31	* FeII 4520 Å
		3827.17	81	20	4.05	* То же
		3828.14	0	62	0.00	* »
		2356.63	-9	19	0.47	[3] H-линии
α Gem A	A1V	4273.25	2	37	0.05	* FeII 4520 Å
		4274.30	85	60	1.42	* То же
		3126.91	80	55	1.45	[3] H-линии
α Tau	K5III	3594.7	178	47	3.79	* NaI 5896 Å
		3827.29	35	21	1.67	* CrII 4252 Å
		6422.35	-43	25	1.72	* То же
		6451.46	8	45	0.18	* »
		1170.95	<70	70	<1.00	[8] FeI 5250 Å
α Boo	K2III	3856.50	3	16	0.19	* FeII 4520 Å
		1204.55	<35	35	<1.00	[8] FeII 5250 Å
		1378.90	<7	7	<1.00	То же
		3564.50	-19	47	0.40	* FeII 4520 Å

* Иногда авторы представляют результаты измерений как $B_e < \sigma$.
В таких случаях мы принимаем как $B_e = \sigma$.

с той точки зрения, что они обладают турбулентными атмосферами, возможно у них имеется дифференциальное вращение, а это одно из условий, которые приводят в действие магнитное динамо.

2. Наблюдения проводились на 6-м телескопе на магнитометре с эталоном Фабри—Перо по линиям металлов [5] и на спектрополяриметре по линиям водорода [6]. Результаты наших измерений эффективных магнитных полей B_e , а также наблюдения других авторов этих же и других звезд приведены

ТАБЛИЦА 2
Звезды с высокой светимостью

Звезда	<i>Sp</i>	JD 24400.0+	B_e , Гс	$\pm\sigma$, Гс	B_e/σ	Примечание		
γ Cyg	F8Ib	4817.46	-33	20	1.65	* NaI 5893 Å		
		4444.77	0	6.3	0.00	[10] Многощелевой		
		4471.85	-18.3	5.7	3.21	То же		
		4471.90	-9.5	4.0	2.37	»		
		1232.60	-340	95	3.58	[8] FeI 4210 Å		
		1382.94	<25	25	<1.00	То же		
		1384.02	<17	17	<1.00	»		
		1549.60	<25	25	<1.00	»		
		1559.70	<16	16	<1.00	»		
		1583.60	<22	22	<1.00	»		
		α Cyg	A2Ia	4748.54	24	50	0.48	* FeII 4520 Å
				5291.00	32	80	0.40	* MgII 4481 Å
				6040.28	-8	64	0.12	* CrII 4252 Å

ТАБЛИЦА 3
Ртутно-марганцевые звезды

Звезда	JD 244000.0+	V_e , Гс	$\pm\sigma$, Гс	V_e/σ	Примечание
α And	3383.77	35	55	0.63	[7] H-линии
	3384.78	118	44	2.68	То же
	3385.90	-62	48	1.29	»
	3387.81	5	44	0.11	»
	3388.81	-38	55	0.69	»
	5244.43	31	76	0.41	* CrII 4558 Å
	5245.54	-52	118	0.44	* То же
	5303.43	-62	41	1.51	* MgII 4481 Å
	5627.23	-78	54	1.44	* То же
	5629.24	64	112	0.57	* »
	5690.29	-138	86	1.60	* »
	5717.39	85	70	1.21	* H-линии
	6040.49	32	42	0.76	* CrII 4252 Å
μ Lep	6422.45	184	212	0.87	* H-линии
	6423.47	-139	60	2.31	* CrII 4252 Å
	3562.66	5	75	0.07	[7] H-линии
	5991.8	-26	288	0.09	* CrI 4252 Å
φ Her	6603.56	173	95	1.82	* То же
	3650.91	205	175	1.17	[7] H-линии
	3561.82	160	170	0.94	То же
HD 89822	3561.82	160	170	0.89	»
ν Her	3650.84	-165	185	0.89	[9] CrI 4254 Å
ι CrB	1383.0	50	50	1.00	[7] H-линии
	3561.82	160	170	0.94	[7] H-линии

в табл. 1—3, где даны также все другие необходимые сведения. В примечании указано, по каким линиям сделано измерение; звездочкой отмечены наши результаты.

Первое, что необходимо отметить, это отсутствие значимых величин поля; почти все $V_e < 3\sigma$. Этот критерий превышает только одно наше измерение поля у α Лур (81 ± 20 Гс), одно — у α Тау (178 ± 47 Гс), одно измерение Ландстрита (-340 ± 95 Гс) и одно Борры (-18.3 ± 5.7 Гс) для γ Суг. Следует отметить, что

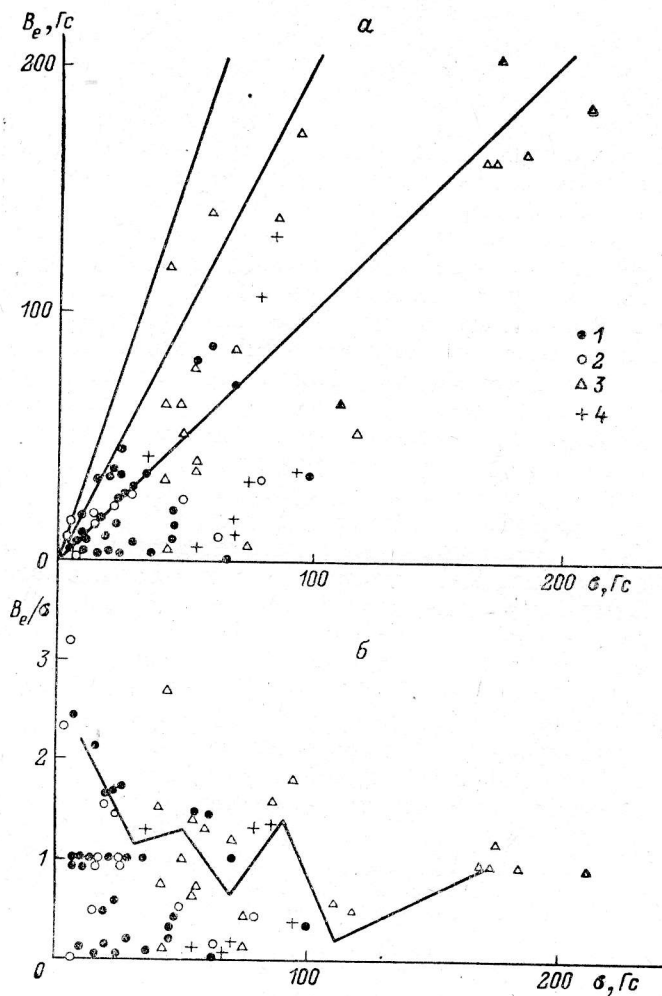
ТАБЛИЦА 4
Доля звезд, имеющих V_e в пределах значений σ , %

V_e	σ	2σ	3σ
Нормальное распределение	68	95	99.9
Нормальные звезды, сверхгиганты, (HgMn), Ам-звезды	70	92	100
Классические CP-звезды	42	79	100

такие «выбросы» иногда случаются и в нашей практике, и у других авторов; и при повторении измерений они не подтверждаются. Причина их пока неясна. В процессе измерений на магнитометрах БТА обработка сигнала производится непосредственно во время наблюдений. Программа обработки предусматривает непрерывное вычисление статистической ошибки согласно распределению Пуассона и ошибки по внутренней сходимости результатов. Практика показала, что эти ошибки оказываются одинаковыми в пределах 5 %, а распределение фотоимпульсов удовлетворяет закону Пуассона. Таким путем за качеством работы аппаратуры ведется непрерывный контроль, а грубые промахи, «выбросы», исключаются программой обработки.

Рассмотрим данные измерений. При отсутствии магнитного поля у изучаемых звезд распределение величины V_e/σ должно удовлетворять нормальному закону с нулевым средним значением. Мы произвели проверку этого предположения, пользуясь критерием Пирсона χ^2 . Оказалось, что нет оснований считать,

что величина B_e/σ распределена не по нормальному закону. Это видно также из следующего примера. Число звезд, имеющих $B_e < \sigma$, $< 2\sigma$ и $< 3\sigma$, составляет соответственно величины, представленные в табл. 4 в последней строке (мы не учли указанные выше четыре звезды с $B_e > 3\sigma$, считая, что эти значения B_e не подтверждены последующими измерениями). Как известно из статистики, при нормальном распределении в этих пределах должно находиться соответственно число звезд, указанных во второй строчке таблицы, их значения в строчках 2 и



Зависимость измеренных значений магнитного поля B_e от ошибки σ .

а — характер распределения звезд в пределах σ , 2σ и 3σ ; б — величина поля в единицах σ . 1—4 — звезды: 1 — нормальные главной последовательности; 2 — высокой светимости; 3 — ртуть-марганцевые; 4 — металлические. Ломаная кривая — дисперсия точек (см. текст).

3 очень близки и мы делаем вывод, что в третьей строчке мы имеем дело тоже с нормальным распределением. Для сравнения в последней строчке даны такие же величины для «классических» химически пекулярных звезд, у которых $B_e < 3\sigma$. Хорошо видно, что в диапазоне $2\sigma > B_e < 3\sigma$ находится 21 % звезд вместо ожидаемых 5 %. Очевидно, что это происходит потому, что у них имеется поле величиной порядка ошибок измерений.

На рисунке, а величины B_e нанесены в зависимости от σ , причем мы привели здесь также данные об измерениях поля у металлических звезд из работ [3, 7]. На рисунке разные типы звезд обозначены разными значками и легко убедиться, что систематических различий между ними нет. При рассмотрении рисунка можно сделать вывод, что все величины B_e стремятся к нулю при уменьшении σ , это свидетельствует об отсутствии значительной составляющей поля у звезд рассматриваемых типов. Для более точной оценки этого эффекта мы построили

зависимость величины B_p/σ от σ , приведенную на рисунке, б. К сожалению, пока мало данных для уверенного ответа, но предварительно можно сделать вывод, что доля звезд с $B_p/\sigma > 2$ увеличивается при увеличении точности измерений. В диапазоне $\sigma \approx 10 \div 20$ Гс имеется несколько точек с $B_p > 2\sigma$, а это может быть признаком того, что по крайней мере часть звезд обладает полем порядка 10—15 Гс. На этом же рисунке линией соединены средние значения дисперсии точек $D = \Sigma (B_p/\sigma)^2/n$, вычисленные в узких интервалах σ , откуда видно, что при увеличении относительной точности измерений дисперсия точек D растет. По-видимому, на основании этих данных можно принять как верхнюю границу среднего дипольного поля у изученных звезд значение $B_p \approx 10 \div 15$ Гс.

3. Проанализируем ситуацию, сложившуюся в связи с полученными результатами. Стриттматтер и Норрис [42] рассмотрели гипотезу возникновения магнитного поля при сжатии намагниченного протозвездного облака. В этом случае может возникнуть разное отношение магнитной энергии к вращательной. Если это отношение меньше критического значения, то меридиональная циркуляция увлечет поле внутрь звезды, поле не участвует в торможении звезды и она остается быстрым ротатором. Таков механизм возникновения нормальных звезд без поля. Если отношение выше критического, то циркуляция не может преодолеть противодействия магнитного поля, оно участвует в процессе торможения звезды и мы ее впоследствии наблюдаем как магнитную. Мы придерживаемся той точки зрения, что в фазе Хаяши конвективная турбуленция полностью разрушает поле, оставшееся после сжатия протозвездного облака. Источники такого разрушения хорошо известны, и они отчетливо проявляются на Солнце. В любом случае участие меридиональной циркуляции в изменении конфигурации магнитных полей остается проблематичным. Длительность полного оборота циркуляции имеет порядок $\sim 10^8$ лет [43], что сравнимо со временем жизни звезд на главной последовательности. В таком случае мы должны были бы наблюдать остатки магнитного поля у нормальных звезд, особенно ранних спектральных классов вследствие их быстрой эволюции.

Мосс [43] показал, что неизбежным следствием меридиональной циркуляции является постепенное увеличение наклона осей диполей со временем. Для проверки мы вычислили возрасты $\lg t$ [20] CP-звезд с помощью эволюционных треков Ибена (боллометрические величины M_0 оценивались с помощью параметров многоцветной фотометрии β посредством калибровки [21]), а также вычислили углы наклона χ магнитных диполей к оси вращения [44] для более 70 звезд. С помощью этих данных мы получили следующие значения:

Среднее $\lg t$	6.2	6.8	7.5	8.4
χ	56°	62°	55°	51°
$\pm \sigma$	5°	4°	4°	3°

Отсюда можно сделать вывод, что углы наклона осей диполей магнитных звезд с возрастом не изменяются. Следовательно, есть все основания усомниться в действии или даже существовании меридиональной циркуляции у магнитных звезд. Возможно, магнитное поле препятствует возникновению циркуляции, но у нормальных звезд с очень слабым полем ее существование возможно. Вероятно, причины возникновения слабых и сильных магнитных полей надо искать в условиях их генерации. Например, при сильном дифференциальном вращении генерируется преимущественно тороидальное поле, которое может быть «невидимым».

Отсутствие заметного дипольного поля у сверхгигантов не может быть неожиданным. Во-первых, вряд ли можно ожидать генерации поля у сверхгигантов с $T_0 > 8500$ К, так как у горячих звезд [21] наличие достаточно развитой конвекции теоретически не предсказывается. Во-вторых, появление магнитного поля той или иной конфигурации зависит от многих факторов, например от величины и типа дифференциального вращения, распределения и скорости циклонической турбуленции, глубины залегания конвективного слоя, скорости вращения звезды и многих других [45—17]. В частности, если поле генерируется динамо механизмом солнечного типа ($\alpha\omega$ -механизм), то трудно ожидать значительного поля с дипольной структурой. Возможно,

на сверхгигантах γ Сеп и Канопусе [18, 19] имеются наиболее благоприятные условия для генерации поля, а сравнительный анализ этих сверхгигантов с другими мог бы дать сведения об этих условиях.

Отсутствие магнитных полей у (HgMn)- и Am-звезд остается загадкой. Если все же предположить, что у этих звезд поле присутствует, то его нельзя обнаружить с классической методикой только в том случае, если оно имеет сложную поверхностную структуру (например, мультиполь). Если поле на поверхности не превышает нескольких сотен гаусс, то по уширению спектральных линий его тоже не удастся обнаружить. В принципе теория генерации предсказывает возможность возникновения сложных структур. Сложные структуры менее устойчивы и разрушаются быстрее простых, дипольных.

В заключение авторы благодарят И. М. Копылова за просмотр рукописи и ценные замечания, В. Д. Бычкова за помощь в наблюдениях и Г. М. Бескина за ценные советы.

Литература

1. Бэбкок Х. У. Магнитные поля звезд // Звездные атмосферы / Под ред. Д. Гринстейна. М.: ИЛ, 1963. С. 283—322.
2. Preston G. Surface characteristics of the magnetic stars // Pub. Astr. Soc. Pacif. 1971. 83. P. 571—584.
3. Landstreet J. D. A search for magnetic fields in normal main sequence stars // Astrophys. J. 1982. 258. P. 639—650.
4. О магнитном поле ртутно-марганцевой звезды α Анд / Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, В. Д. Бычков, И. Д. Найденов // Письма в Астрон. журн. 1985. 11. С. 107—111.
5. Первые измерения магнитных полей звезд / Ю. В. Глаголевский, Г. А. Чунтонов, И. Д. Найденов и др. // Сообщ. САО. 1979. 25. С. 5—16.
6. Поляриметр-магнитометр для водородных линий / В. Г. Штоль, В. Д. Бычков, Н. А. Викульев и др. Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 19. С. 66—70.
7. Borra E. F. The magnetic fields of the Ap stars // Astrophys. J. 1980. 42. P. 421—445.
8. Borra E. F., Landstreet J. D. A search for weak stellar magnetic fields // Astrophys. J. 1973. 185. L139—L143.
9. Borra E. F., Landstreet J. D., Vaughan A. H., High-resolution zeeman polarimetry // Astrophys. J. 1973. 185. L145—L147.
10. Borra E. F., Fletcher J. M., Poekert R. Multislit photoelectric magnetometer observations of cepheids and supergiant // Astrophys. J. 1981. 247. P. 569—576.
11. Borra E. F. Photoelectric observations of the magnetic fields of Sirius // Astrophys. J. 1975. 202. P. 744—742.
12. Strittmatter P. A., Norris J. Role of magnetic fields in Ap stars // Astron. Astrophys. 1971. 15. P. 239—250.
13. Moss D. L. A kinematic mechanism for the oblique rotator model of magnetic stars // Monthly Not. Astr. Sci. 1977. 178. P. 61—70.
14. Магнитные поля и другие параметры химически пекулярных звезд / Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова, В. Г. Штоль // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. 23. С. 37—57.
15. Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир, 1984.
16. Rädler K.-H. Mean field approach to spherical dynamo models // Astron. Nachr. 1980. 301. S. 101—129.
17. Rädler K.-H. Investigations of spherical kinematic mean field dynamo models // Astron. Nachr. 1986. 307. S. 83—113.
18. Schölz G., Gerth E. Radial velocity and magnetic field of A-type supergiant γ Сеп // Astron. Nachr. 1980. 301. S. 211—216.
19. Detection of a magnetic field in Canopus / K. D. Racos, A. Schermann, W. W. Weiss, H. J. Wood // Astron. Astrophys. 1977. 56. P. 453—455.
20. Глаголевский Ю. В. К проблеме торможения химически пекулярных звезд. Астрофиз. исслед. (Изв. САО). В печати.
21. Crawford D. L. Four-color, H_β calibration at KPNO // Dudley Obs. Rep. 1979. Nr 14. P. 23—31.