

УДК: 524.3—337:524.86 Нс

СВЯЗЬ МЕЖДУ ВЕЛИЧИНОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СОДЕРЖАНИЕМ ГЕЛИЯ У ЗВЕЗД С УСИЛЕННЫМИ ЛИНИЯМИ ГЕЛИЯ

Ю. В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ, Ф. Г. КОПЫЛОВА, Л. С. ЛЮБИМКОВ

Поступила 28 июня 1990

Принята к печати 15 сентября 1990

На основе собственных измерений и литературных данных определено содержание гелия He/H у 29 звезд с усиленными линиями гелия. Найдено, что с достаточно высоким уровнем значимости существует корреляция между среднеквадратическими значениями магнитного поля и содержанием гелия у этих звезд, причем чем больше поле, тем больше избыток гелия. Отмечено, что этот эффект можно объяснить в рамках теории диффузии, если предположить стабилизирующее действие магнитного поля на движения в атмосфере.

Наблюдательные данные показывают, что у химически пекулярных звезд (CP) существует связь между величиной магнитного поля и степенью химических аномалий. Например, согласно результатам Леушина [1] и Глаголевского и др. [2], степень пекулярности $\rho \sim z \sim B_v$, где z — параметр женеvской фотометрии, зависящий от интенсивности депрессии $\lambda 5200 \text{ \AA}$ [3], а B_s — поверхностное магнитное поле звезды. Имеются также данные о зависимости степени уменьшения бальмеровских скачков от поверхностного магнитного поля [4]; поскольку в этой же работе показано, что есть все основания считать факт уменьшения бальмеровских скачков относительно нормальных звезд с той же эффективной температурой T_e следствием избытка металлов, то связь аномальности бальмеровских скачков с величиной магнитного поля следует рассматривать как результат зависимости химического состава от магнитного поля. Все эти данные позволяют предположить, что магнитное поле благоприятствует диффузионным процессам, в результате которых происходит обогащение верхних слоев атмосфер некоторыми химическими элементами. В связи с этим весьма важной проблемой оказывается изучение химически пекулярных звезд с аномальными линиями гелия — с усиленными (He-г) и ослаб-

ленными (He-w). Она интересна потому, что не совсем ясно, почему самые горячие из CP-звезд имеют усиленные линии гелия, а примыкающие к ним в среднем более холодные звезды типа He-w имеют ослабленные линии гелия, причем обе группы перекрываются, т. е. существует много звезд, которые имеют одинаковые температуры и радиусы, но относятся к разным типам пекулярности. Очень важно выяснить механизм, приводящий к столь противоположным свойствам.

В данной работе мы приводим только предварительные результаты исследования звезд с усиленными линиями гелия. Магнитное поле таких звезд изучено к настоящему времени относительно хорошо [5], но данных для определения содержания гелия было мало. Для части таких звезд спектроскопический материал был получен нами на II камере Основного звездного спектрографа 6-метрового телескопа с дисперсией 9 Å/мм, а для других звезд мы воспользовались данными Вальборна [6]. Звезду HD 142990 мы исследовали по спектрограммам, любезно предоставленным нам И. М. Копыловым и В. Г. Клочковой. В табл. 1 приведены результаты наших измерений и другие данные. Кроме номера звезды там приведено число n использованных спектрограмм, затем эффективная температура T_e из каталога [7]. В том случае, если мы не располагали данными о $\lg g$, использовались средние для CP-звезд значения $\lg g = 4.0$. В табл. 1 приведены также измеренные эквивалентные ширины W_λ линий гелия, по которым сделаны оценки содержания гелия He/H, и средние квадратические ошибки этих оценок $\pm \sigma$. В последних столбцах таблицы указаны средние квадратические значения магнитного поля звезд $\langle B_e \rangle$ и их ошибки, взятые из [2, 5].

Содержание гелия He/H (по числу атомов) определялось с помощью расчетов Оделла и Воелса [8], выполненных при отсутствии локального термодинамического равновесия. В этой работе вычислены значения W_λ ряда линий HeI в диапазоне эффективных температур от 18000 К до 24000 К для нормального и повышенного содержания гелия, а именно: He/(He+H) = 0.10, 0.35, 0.60 и 0.85. Подчеркнем, что предварительно Оделл и Воелс провели не-ЛТР расчеты моделей атмосфер, соответствующих указанным значениям He/(He+H). Данные этих авторов включают пять линий гелия, измеренных нами: λ 4026, 4121, 4388, 4471 и 4713 Å, однако последняя из них измеряется у многих звезд с недостаточной точностью и ее использование приводит к большим ошибкам. Поэтому средние оценки He/H, приведенные в табл. 1, получены только по первым четырем линиям.

Кроме наших оценок W_λ линий гелия, мы использовали данные Вальборна [6]. К сожалению, здесь представлены результаты измерений, сделанных только по одной или иногда по двум спектрограммам, тем не ме-

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЛИНИЙ ГЕЛИЯ (λ) И СОДЕРЖАНИЕ
ГЕЛИЯ У ЗВЕЗД ТИПА Fe-r

HD	n	T _e K	lg g	$\lambda, \text{Å}$						He/H	$\pm \sigma$	$\langle B_{\text{He}} \rangle,$ Fe	$\pm \sigma$
				4026	4121	4144	4388	4471	4713				
35912	5	18850	4.0:	1.84	0.28	0.94	1.15	1.68	—	0.23	0.02	630	110
36430	4	18450	3.97	1.67	0.26	0.88	1.03	1.65	—	0.21	0.01	260	110
36982	3	20600:	4.0:	1.73	0.28	0.81	1.06	1.68	0.50	0.17	0.01	—	—
37017	2	20450	4.06	2.55	0.43	1.79	1.62	2.22	0.54	0.42	0.01	1610	115
37479	4	23650	4.0:	2.20	0.45	1.33	1.44	2.60	0.58	0.62	0.13	1980	155
37776	2	23050	4.12	2.02	0.60	1.31	1.30	2.36	0.67	0.59	0.25	820	110
47777	4	21200	4.0:	1.38	0.23	0.84	0.88	1.63	0.27	0.11	0.03	355	280
125823	2	20250	4.20	1.66	—	—	0.81	—	—	0.08:*)	—	315	30
142990	3	18450	4.05	1.80	0.35	—	0.76	1.22	0.23	0.19	0.02	1370	70
177003	5	19600	4.14	1.39	0.25	0.75	0.87	1.56	0.27	0.10	0.02	160	80
184927	6	21500	3.83	2.37	0.43	1.58	1.68	2.44	0.45	0.58	0.06	1340	1100
208266	2	24300	4.0:	1.22	0.33	0.65	0.57	1.02	0.07	0.15	0.06	—	—
186205	2	23500	3.97	3.39	0.58	2.49	2.25	2.77	0.50	0.47	0.09	430	135
209339	5	30200	3.87	0.85	0.28	0.51	0.52	1.03	—	0.10:	—	230	320

*) S. C. Wolff, J. N. Heasley, *Astrophys. J.*, 292, 589, 1985.

нее этот материал оказался полезным. В табл. 2 приведены результаты оценок He/H для 18 звезд типа He-I, сделанных по данным Вальборна. Температуры T_e по-прежнему взяты из каталога [7], а в тех случаях, когда их там нет, мы оценивали T_e по параметру X многоцветной женевской фотометрии [9] с помощью методики, описанной в [7]. Такие температуры отмечены в табл. 2 значком (X). В этой таблице только у двух

Таблица 2

ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ ПО ДАННЫМ ВАЛЬБОРНА

HD	n	T_e , K	$\lg g$	He/H	$\pm \sigma$	$\langle B_e \rangle$, Gc	$\pm \sigma$
37479	1	23650	4.0:	0.32	0.03	1980	155
37817	1	20450	4.0:	0.37	0.02	1620	115
37776	1	23050	4.12:	0.33	0.05	820	110
58260	1	19090(X)	4.0:	0.40	0.07	2150	135
60344	1	22600	4.0:	0.21	0.06	0	275
64740	1	24100	4.0:	0.20	0.04	510	30
66522	2	18700(X)	4.0:	0.34	0.04	534	370
96446	1	23550	4.0:	0.45	0.09	1460	115
133518	1	20200	3.86	0.33	0.06	250	230
144941	1	23300	4.0:	0.88:	—	—	—
149257	2	24880	4.0:	0.35	0.07	—	—
164769	2	35000(X)	4.0:	0.53:	—	—	—
168785	2	24750	4.0:	0.51	0.09	—	—
186205	2	23500	4.0:	0.52	0.08	430	135
260858	1	18800	4.0:	0.36	0.05	—	—
264111	1	23300	4.0:	0.20	0.04	—	—
-46°3093	2	23000	4.0:	0.21	0.05	—	—
-69°2698	2	27500	4.0:	0.51	—	—	—

звезд известны значения $\lg g$, для остальных мы приняли $\lg g = 4.0$. В табл. 1 и 2 имеется четыре одинаковых звезды, поэтому для них мы смогли оценить различие эквивалентных ширин. Оказалось, что у Вальборна эквивалентные ширины линий гелия увеличены по сравнению с нашими на 40%. Ввиду того, что наших данных больше, мы редуцировали значения W_λ Вальборна к нашим. Оказалось, что такая редукция способствовала уменьшению разброса точек на графике зависимости $\langle B_e \rangle$ от He/H . Этот график приведен на рис. 1, причем черными кружками обозначены данные, полученные по нашим данным, а светлыми—по данным Вальборна (исправленным). Для четырех общих звезд величины W_λ усреднены с весом, равным количеству использованных спектров.

В трех случаях (данные Вальборна) температуры или эквивалентные ширины линий оказались вне рассчитанной сетки данных, тогда мы ис-

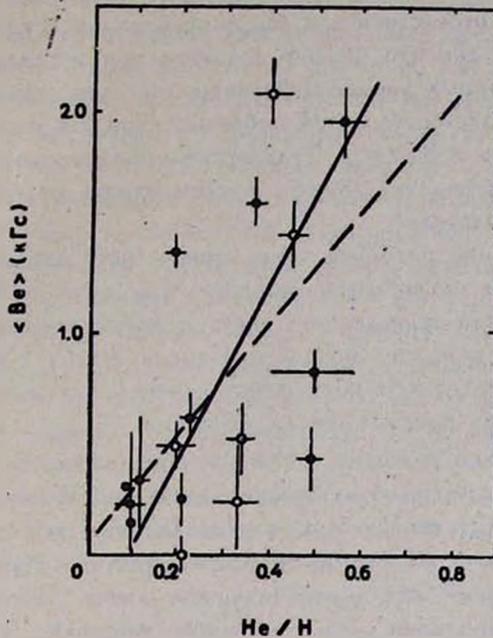


Рис. 1. Соотношение между среднеквадратическими значениями магнитного поля $\langle B_e \rangle$ и содержанием гелия у звезд He-γ.

пользовали метод графической экстраполяции и обозначили результат как неуверенный.

Рассмотрение рис. 1 показывает, что между магнитным полем и содержанием гелия, по-видимому, существует связь. Способ наименьших квадратов приводит к следующему соотношению между этими величинами:

$$\langle B_e \rangle = 2530 \cdot (He/H) + 36,$$

при коэффициенте корреляции $r=0.70$. Коэффициент $a=2530$ Гс определен с ошибкой $\sigma=\pm 600$ Гс. Эти данные свидетельствуют о том, что корреляция значимая. Прямая, соответствующая указанной формуле, на рис. 1 проведена штриховой линией, а сплошная прямая проведена через точку с координатами $\langle B_e \rangle=0$ и $(He/H)=0.1$, соответствующую нормальным звездам, и точку, равную среднему значению $\langle B_e \rangle$ и (He/H) для He-γ звезд ($(He/H)>0.1$).

Следует подчеркнуть, что использование средних квадратических значений $\langle B_e \rangle$ магнитного поля вместо поверхностного поля B_e значитель-

но увеличивает рассеяние точек на графике и уменьшает значение коэффициента корреляции, так как величина $\langle V_e \rangle$ (в отличие от V_s) зависит от угла наклона звезды. К сожалению, значения V_s для звезд He-г в настоящее время отсутствуют, и мы использовали средние квадратические значения $\langle V_e \rangle$, как это обычно делается при исследованиях магнитных химически пекулярных звезд. Действительно, существует несколько звезд, у которых наблюдается большой избыток гелия, но поле у них небольшое, а у одной из них $\langle V_e \rangle = 0$. Вследствие произвольной ориентации звезд всегда можно наблюдать объекты с невыгодным положением диполя относительно наблюдателя.

Другая причина разброса точек может быть связана с зависимостью содержания гелия от возраста, подобно той, которая была найдена Любимковым [10] для нормальных звезд главной последовательности. Для He-г звезд мы пока не можем проверить наличие такой зависимости вследствие недостаточного количества данных, однако по мере их накопления это свойство предполагается изучить.

Третья причина разброса точек—это переменность линий гелия. Как известно, все химически пекулярные звезды являются спектрально переменными, и при статистических исследованиях это надо помнить. Для уменьшения эффекта переменности линий обычно усредняют данные нескольких наблюдений, сделанных в разные даты. В результате дефицита наблюдательного времени это требование часто не удается выполнить достаточно хорошо. Сильные изменения линий гелия наблюдаются лишь у небольшой части звезд He-г, таких, как HD 37017, HD 125823. Основная же часть испытывает умеренные изменения, и средние значения эквивалентных ширин достаточно хорошо характеризуют гелиевые аномалии этих звезд. Амплитуда изменений меньше характерных особенностей этих звезд.

Мы понимаем, что для окончательного ответа на вопрос о существовании зависимости содержания гелия от магнитного поля еще мало данных, однако приведенные результаты свидетельствуют о большой вероятности такого предположения.

Посмотрим, как можно объяснить зависимость содержания гелия от магнитного поля. В работах Воукле [11] и Мишо [12] предложен механизм обогащения гелием верхних слоев атмосфер звезд типа He-г путем совместного действия диффузии и потери массы, вызванной радиационным давлением. Расчеты этих авторов показывают, что для образования звезд типа He-г с помощью такого механизма темп потери массы должен быть порядка $10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$. Скорость диффузии зависит от коэффициента диффузии и температуры, поэтому для звезд с одинаковой температурой коэффициент диффузии будет зависеть от скорости нетепловых

движений газа. Вероятно, магнитное поле препятствует таким движениям, оно стремится «заморозить» их тем сильнее, чем больше напряженность. Поэтому нет ничего удивительного в том, что между напряженностью магнитного поля и избытком содержания гелия наблюдается связь. Местель [13] показал, что в случае дипольного поля звездный ветер должен проявляться сильнее на полосах, в то же время масса, вытекающая в других частях поверхности, должна скапливаться на магнитном экваторе. Этот процесс должен приводить к обогащению гелием приполярных областей, что и наблюдается на многих звездах типа He-g. В работе Мишо [12] рассматриваются различные трудности интерпретации He-g и He-w звезд с помощью гипотезы о совместном действии диффузии и звездного ветра. В частности, в отличие от Местеля, авторы отмечают большую вероятность избытка гелия вблизи экватора. Отметим еще одну трудность теории диффузии: скорость потери массы у ранних В-звезд, вообще, и у звезд He-g, в частности, может существенно превышать указанное выше значение $10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$, но столь активное истечение будет препятствовать накоплению гелия в верхних слоях атмосферы (т. е. образованию He-g звезд).

Следует отметить, что проблема содержания гелия не решена не только для CP-звезд, но и для нормальных звезд главной последовательности. Нельзя исключить, что и у нормальных В-звезд [10] и у CP-звезд обогащение происходит одним и тем же механизмом, причем во втором случае оно усилено за счет влияния магнитного поля. Меридиональная циркуляция, связанная с вращением, не может привести к наблюдаемым эффектам, так как в случае CP-звезд существуют свидетельства ее отсутствия [14]. Как нормальные В-звезды, так и звезды He-g не показывают какой-либо корреляции содержания He с $v \sin i$, которую следует ожидать при наличии меридиональной циркуляции.

Интересно, что граница перехода от He-g к He-w звездам на температурной шкале лежит вблизи $T_e \sim 18000 \text{ K}$, и в районе этого значения наблюдаются объекты обоих указанных типов. Более того, в этой области встречаются также звезды, имеющие значительное поле и одновременно нормальное содержание гелия. Если во всех случаях работает один механизм (например, диффузия), то приходится предполагать, что его эффективность сильно зависит не только от T_e , но и от других неизвестных параметров.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

Крымская астрофизическая обсерватория
АН СССР

THE RELATION BETWEEN MAGNETIC FIELD STRENGTH AND HELIUM ABUNDANCE IN HELIUM RICH STARS

Yu. V. GLAZOLEVSKIY, F. G. KOPYLOVA, L. S. LYUBIMKOV

On the basis of our own measurements and literature data helium abundance He/H for 29 helium rich stars is determined. It is found that with a sufficiently high level of significance there is a correlation between the mean square magnetic field values and the helium abundance in these stars, here the stronger field the larger helium excess. It is noted that this can be accounted for within the framework of the diffusion theory under the assumption that the magnetic field stabilizes motions in the atmosphere.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Лушин, Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 3, 36, 1971.
2. Ю. В. Глазoleвский, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова, В. Г. Штоль, Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 23, 37, 1986.
3. N. Cramer, A. Maeder, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 41, 111, 1980.
4. Ю. В. Глазoleвский, Г. П. Топильская, Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 25, 13, 1987.
5. В. Д. Бычков, Ю. В. Глазoleвский, В. Г. Елькин, Ф. Г. Копылова и др. Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 30, (в печати).
6. N. R. Walborn, *Astrophys. J.*, 268, 195, 1983.
7. Ю. В. Глазoleвский, Н. М. Чунакова, Астрофиз. исслед. Изв. Спец. астрофиз. обсерв., 25, 13, 1987.
8. A. P. Odell, S. A. Voels, *Hydrogen Deficient Stars and Related Objects.*, Ed K. Hunger et al., Reidel, 1986, p. 297.
9. F. Rufener, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 41, 207, 1981.
10. Л. С. Любимков, Астрофизика, 29, 479, 1988.
11. S. Vauclair, *Astron. and Astrophys.*, 45, 233, 1975.
12. D. Michoud et al., *Astrophys. J.*, 322, 302, 1987.
13. L. Mestel, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 138, 359, 1968.
14. Ю. В. Глазoleвский, Магнитные звезды, Сб. докл. Наука, Ленинград, 206, 1988.