

УДК: 52-3370

О ВОЗМОЖНОМ ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И СОДЕРЖАНИИ ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРАХ "МЕТАЛЛИЧЕСКИХ" Ам-ЗВЕЗД

И.С.САВАНОВ

Поступила 8 июня 1994
Принята к печати 15 июня 1994

На основе спектральных наблюдений с ПЗС-камерой исследованы две линии FeII λ 6147.7 Å и λ 6149.2 Å в спектрах 12 Ам-звезд. Значимое усиление линии FeII λ 6147.7 Å по отношению к линии λ 6149.2 Å может рассматриваться как указание на наличие магнитного поля в атмосфере "классической" Ам-звезды 15 Vul. Наши наблюдения подтверждают результат Матиса и Ланца [1] о присутствии магнитного поля в атмосфере еще одной Ам-звезды *o Peg*. Для остальных изученных звезд различия в эквивалентных ширинах линий FeII могут быть объяснены влиянием блендирования линии FeII λ 6147.7 Å. По другой свободной от блендирования линии FeII λ 6149.2 Å, выполнена оценка содержания железа в атмосферах 12 Ам-звезд, имеющих эффективные температуры в диапазоне от 7400 К до 9800 К. Полученные результаты указывают на вариации величины $\log \epsilon$ (Fe) от звезды к звезде, которые составляют не менее 0.5 dex и превышают точность определений.

1. *Введение.* В своем классическом исследовании звездных магнитных полей Бэбкок [2] перечислил 8 "металлических" (Ам) звезд, как имеющих магнитные поля в несколько сотен Гаусс. Дальнейшие исследования приводили свидетельства как в пользу отсутствия у Ам-звезд магнитных полей, так и о том, что поля существуют, но они слабы и переменны и в этом заключена причина их необнаружения. Контти [3], по наблюдениям с анализатором Зеемана, изучил 16 Ori, одну из звезд списка Бэбкока, имеющих магнитное поле. Ни по одной из 15 спектрограмм, полученных Контти, не было установлено наличия магнитного поля, превышающего величину в 50 Гаусс, характеризующую точность метода. По 9 спектрограммам еще одной Ам-звезды, 15 Vul, также не было установлено присутствия магнитных полей. Позднее Кувшиннов [4], Кувшинов, Хильдеб-

рандт, Шенаих [5] с помощью звездного магнитографа 2.6-метрового телескопа КраО нашли, что 15 Vul имеет магнитное поле, причем максимальная наблюдавшаяся величина H_{II} достигала 700 Гс, значимо превосходя среднеквадратичную ошибку результата.

Дальнейшие исследования [6,7], убедительно показали, что Ам-звезды не имеют магнитных полей дипольного типа, как принято считать для Ар-звезд. С другой стороны, возможность того, что Ам-звезды обладают полями более сложной конфигурации (солнечного типа), серьезно не рассматривалась до появления статьи Матиса и Ланца [1]. Методом Стеффо-Линдегрена, развитого первоначально для Солнца и примененного позднее для звезд поздних спектральных классов [8], Матис [9] установил для Ам-звезды σ Reg присутствие магнитного поля $H = 2.1 \pm 0.35$ кГс. Матис и Ланц в своей статье [1] приводят для нее близкий результат $H = 1.8 \pm 0.3$ кГс.

Дополнительные свидетельства в пользу присутствия магнитного поля для этой звезды были высказаны этими авторами на основе анализа пары линий Fe II 74 мультиплета $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ и $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$. Эти линии имеют мало различающиеся энергии верхнего и нижнего уровней и практически одинаковые значения сил осцилляторов: $\lg gf = 2.721$ и $\lg gf = 2.724$, соответственно [10]. В то же время в спектрах ряда магнитных звезд [1] линия $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ усилена по сравнению с $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$. Наблюдаемые различия находят свое объяснение во влиянии магнитного усиления линии $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ в эффекте Пашена-Бака [11].

2. *Наблюдения и их анализ.* В ходе наблюдений в 1992г. — начале 1993г. ряда Ам-звезд с ПЗС-камерой, установленной в спектрографе фокуса Куде 2.6-метрового телескопа Крымской астрофизической обсерватории, было зарегистрировано несколько десятков спектрограмм, содержащих упомянутые линии FeII. Спектральное разрешение определялось шириной входной щели и составляло величину $0.18 \text{ \AA}$; отношение сигнала к шуму для полученного наблюдательного материала лежало в пределах от 60 до 120. Обработка спектрограмм включала стандартные процедуры — учет темнового тока, вычитание фона неба, нормировку к плоскому полю и уровню непрерывного спектра, привязку к шкале длин волн.

Список звезд, для которых были получены наблюдения, приведен в табл. 1. Во втором — четвертом столбцах перечислены параметры атмосфер исследуемых звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести и скорость микротурбулентности, установленные как в ходе наших предыдущих исследований (на-

пример, [12, 13]), так и взятые из литературных источников (см. ниже). В пятом и шестом столбцах даны эквивалентные ширины W_λ линий FeII λ 6147.7 Å и λ 6149.2 Å. Как и в [1], мы вычислили величину R (седьмой столбец табл.1):

$$R = \frac{W_\lambda(\lambda 6147.7 \text{ Å}) - W_\lambda(\lambda 6149.2 \text{ Å})}{W_\lambda(\lambda 6147.7 \text{ Å}) + W_\lambda(\lambda 6149.2 \text{ Å})}$$

Таблица 1

Звезда	T_{eff}	$\lg g$	ξ_t	W_λ (m Å)		R	$\lg \epsilon$ (Fe)
				λ 6147.7 Å	λ 6149.2 Å		
σ Peg	9800	3.8	3.5	47	40	0.081	7.84
η Oph	9300	4.2	3.0	55	49	0.030	7.84
γ Gem	9300	3.4	2.0	46	42	0.046	7.67
22 Com	8250	4.0	4.0	70	61	0.069	7.57
8 Com	8150	4.1	4.0	125	115	0.042	8.08
81 Tau	8100	4.1	6.5	108	98	0.049	7.73
15 Vul	8100	3.5	4.8	97	78	0.109	7.50
32 Aqr	8000	4.0	4.5	113	107	0.027	7.93
16 Ori	7900	4.35	6.0	120	113	0.030	7.93
63 Tau	7750	4.3	5.0	126	109	0.072	7.93
60 Tau	7400	4.2	5.0	123	114	0.038	8.03
τ UMa*	7400	4.05	6.0	143	136	0.025	7.89
				149	138	0.038	
τ Boo	6390	3.8	1.8	89	61	0.187	7.57
γ Ser	6270	4.0	1.8	59	45	0.135	7.36
ι Vir	6120	3.8	1.8	74	60	0.104	7.59

* наблюдения 3 января 1993 г. и 9 февраля 1993 г., соответственно.

Полученные величины R в зависимости от эффективных температур исследованных звезд представлены на рис. 1. Для трех звезд (σ Peg, 15 Vul, τ UMa) мы приводим характерные ошибки определений величины R , для остальных звезд

ошибки имеют сходную величину. Рис.1. дополнен результатами измерений R из статьи [1] для σ Peg, четырех немагнитных звезд и трех звезд, имеющих H_β : 3.3, 5.0, 6.1 кГс (открытые кружки). Результаты, представленные на рис.1, свидетельствуют о том, что в спектрах почти всех изученных нами звезд линия FeII λ 6147.7 Å более интенсивна, чем λ 6149.2 Å. Это различие представляется нам реальным, его вряд ли возможно объяснить погрешностями измерений W_λ линий. Полученная нами величина $R = 0.081$ для σ Peg (наблюдения 13 августа 1992 г.), в пределах ошибок определения, согласуется с данными [1] $R = 0.052$ (наблюдения 1 декабря 1989 г.). Точность нашего измерения R для σ Peg мы оцениваем не ниже 0.035, она существенно хуже, чем в [1] (Матис и Ланц приводят оценку точности 0.01, что, несомненно, связано с более высоким качеством наблюдательного материала этих авторов). Кроме того, не исключена возможная спектральная переменность звезды, поскольку наблюдения были выполнены с интервалом почти в три года. Наблюдения другой Aп-звезды — τ UMa были получены нами с интервалом около одного месяца и привели к совпадающим, в пределах ошибок измерений, результатам (табл.1).

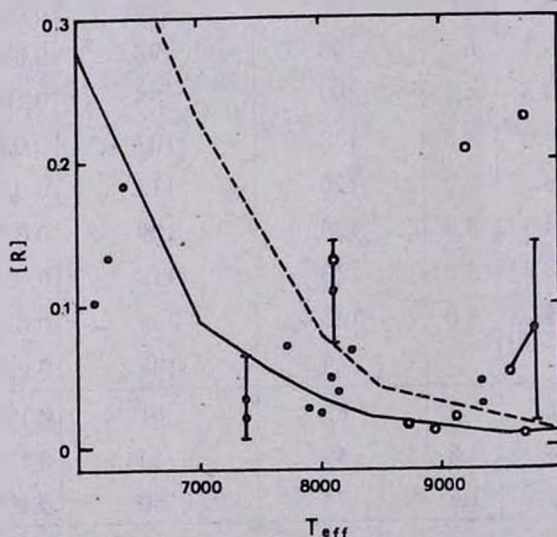
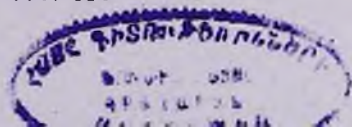


Рис.1. Величины R в зависимости от эффективной температуры T_{eff} . Заполненные кружки — наши наблюдения, открытые кружки — данные из статьи [1]. Линиями изображена зависимость теоретических значений R , вычисленных с учетом блендирования линии FeII λ 6147.7 Å при микротурбулентной скорости 0 км/с (штриховая линия) и 4 км/с (непрерывная линия). Отрезки прямых соединяют пары наблюдений для σ Peg и τ UMa (пояснения см. в тексте).

Особого внимания заслуживает рассмотрение возможности увеличения эквивалентной ширины линии $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$, по сравнению с $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$, вследствие блендирования первой из них. Как указывали Матис и Ланц [1], если линию $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$ можно считать практически свободной от влияния бленд, то для линии $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ имеется возможность блендирования прежде всего со стороны линии $\text{FeI } \lambda 6147.7 \text{ \AA}$. Для выяснения этого обстоятельства мы провели вычисления синтетических спектров в диапазоне $\lambda 6145 \text{ \AA} - \lambda 6155 \text{ \AA}$.

Вычисления проводились по программе SYNTHEL [14], модифицированной для персонального компьютера. Из списка линий [15] было отобрано около 20 линий, которые могут в данной области вносить вклад в теоретический спектр. Для части линий значения $\lg gf$ из списка [15] были заменены на более точные редуцированные лабораторные измерения или "солнечные" gf -величины. Вычисления проводились для моделей атмосфер из сетки Куруца [16] с эффективными температурами от 6000 К до 10000 К для двух значений микротурбулентной скорости (0 км/с и 4 км/с). Были взяты типичные для атмосфер Ам-звезд содержания элементов (см., например, [12]). Величина содержания железа принималась равной $\lg \epsilon(\text{Fe}) = 7.90$ (несколько выше, чем, как будет показано в дальнейшем, составляет средняя величина содержания этого элемента в атмосферах Ам-звезд) для того, чтобы оценить возможность максимального вклада со стороны блендирующей линии FeI. На рассчитанных теоретических спектрах мы измерили эквивалентные ширины линий $W_\lambda \text{ FeI}$ и нашли величины R для различных значений T_{eff} (см. кривые на рис.1). Полученные значения R , по-видимому, связаны с изменением вклада линии $\text{FeI } \lambda 6147.7 \text{ \AA}$, который минимален для горячих звезд с $T_{\text{eff}} = 10000 \text{ К}$ и значителен для звезд с $T_{\text{eff}} = 6000 \text{ К}$. Вычисления показали, что при заданном значении эффективной температуры теоретические величины R мало чувствительны к выбору параметра ускорения силы тяжести (на рис.1 представлены результаты, полученные при $\lg g = 4.0$) и увеличиваются с уменьшением микротурбулентной скорости ξ_t . При этом значения R , вычисленные для $\xi_t = 0.0 \text{ км/с}$, могут рассматриваться как верхняя оценка теоретических значений R , поскольку в атмосферах Ам-звезд реальные значения микротурбулентной скорости составляют от 2 до 6 км/с (см. табл.1). Принимая во внимание точность определения величины R , можно заключить, что для большинства звезд различия в эквивалентных ширинах линий FeII могут быть объяснены влиянием блендирования линии $\text{FeII } \lambda 6147.7 \text{ \AA}$.



Помимо трех магнитных звезд, данные о которых были приведены в статье [1], можно предполагать, что существует отклонение от зависимости, изображенной штриховой линией ($\xi_r = 0.0$ км/с), еще для двух "металлических" звезд. Кроме уже рассмотренной в [1] звезды *o Peg* высокое значение R имеет другая хорошо известная Ам-звезда 15 Vul, уже упоминавшаяся нами ранее во введении. Химический состав атмосферы 15 Vul на основе литературных источников измерений эквивалентных ширины линий в ее спектре был дан нами в статье [13]; новые результаты, основанные на наблюдениях с ПЗС-камерой, представлены в [17].

Представляется крайне интересным проведение дополнительных наблюдений с целью установления присутствия магнитного поля на поверхности звезды 15 Vul путем классических наблюдений с анализатором Зеемана, что позволит рассмотреть их в совокупности с результатами наблюдений [5]. Кроме того, поскольку для *o Peg* присутствие магнитного поля солнечного типа было установлено также с применением методики Стенфлю-Линдегрена, очень важным является повторение аналогичного анализа для 15 Vul. Для решения данной задачи необходимо получение спектра этой звезды в диапазоне длин волн $\lambda 3700 \text{ \AA} - \lambda 4700 \text{ \AA}$ с высоким отношением сигнала к шуму и высоким спектральным разрешением для исследования профилей линий. Таким образом, две звезды из нашей выборки 12 "металлических" звезд — *o Peg* и 15 Vul представляют несомненный интерес с точки зрения исследования присутствия магнитных полей в атмосферах Ам-звезд и возможности установления связи магнитных полей в атмосферах Ам-звезд и возможности установления связи "металлических" звезд с магнитными и требуют дальнейшего всестороннего анализа.

3. *Оценки содержания железа.* Поскольку линию FeII $\lambda 5149.2 \text{ \AA}$ можно считать практически свободной от blends, мы выполнили оценку содержания железа по эквивалентной ширине этой линии для 12 исследуемых нами звезд (последний столбец табл.1). Вычисления проводились с параметрами атмосфер звезд: T_{eff} , $\lg g$ и ξ_r , указанными в табл.1 и установленными в предыдущих исследованиях, в том числе наших. Для трех звезд они были взяты из литературных источников (для 32 Aqr и 60 Tau — из статьи [18], для 63 Tau — [19]). Параметры атмосфер трех F-звезд были приняты на основе данных [20]. Выполненные для них определения содержания Fe служили для сравнения и оказались действительно близки к определению содержания железа для Солнца.

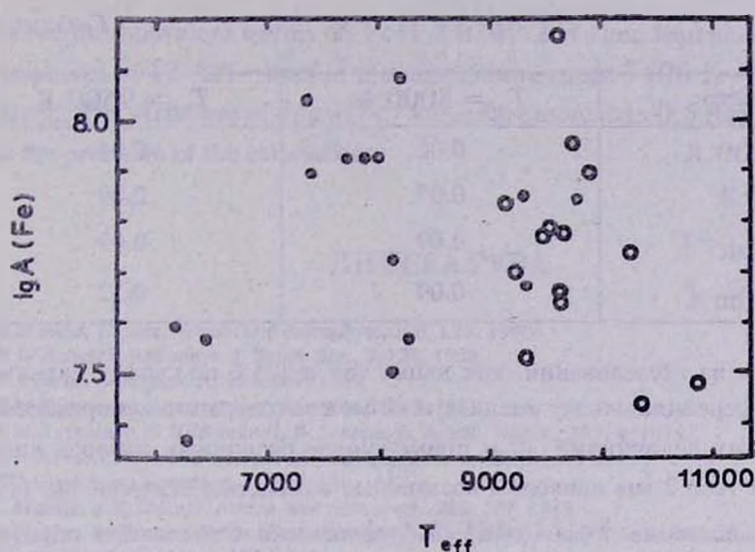


Рис.2. Содержание железа $\lg A(\text{Fe})$ в зависимости от эффективной температуры T_{eff} . Заполненные кружки — результаты наших наблюдений, открытые кружки — данные из статьи [21].

На рис.2 наши данные дополнены результатами определений $\lg A(\text{Fe})$ в атмосферах горячих А-звезд из [21], исключая три звезды с дефицитом металлов (HR 5959, HR 5798, HR 7001). Как следует из рис.2, в совокупности звезд нашего исследования, а также тех, для которых были опубликованы данные Лемке [21], можно выделить две группы, имеющие эффективные температуры T_{eff} около 7500 К—8000 К и T_{eff} в диапазоне 9000 К—10000 К, численностью порядка десяти в каждой из групп. Среди многих литературных источников мы предпочли использовать данные [21], полученные по линиям FeII, поскольку это дает нам основание надеяться, что представленные результаты образуют достаточно однородную выборку. Кроме того, следует иметь в виду, что другие результаты определений содержания железа в атмосферах А-звезд выполнялись преимущественно по линиям FeI и могут иметь систематические отличия вследствие влияния эффектов отклонений от ЛТР в атмосферах этих звезд.

Среднее значение содержания железа в атмосферах "металлических" звезд по нашей выборке из 12 объектов составляет $\lg A(\text{Fe}) = 7.83 \pm 0.05$; если мы примем во внимание данные [21], то эта величина составит 7.78 ± 0.04 . При этом изменения содержания железа от звезды к звезде превосходят 0.5 dex и не могут быть связаны с точностью определений. Используя один и тот же набор

Таблица 2

Параметр	$T_{eff} = 8000$ К	$T_{eff} = 9500$ К
$\Delta T_{eff} = 200$ К	0.06	0.04
$\Delta \lg g = 0.3$	0.07	0.09
$\Delta \xi_t = 1 \text{ кмс}^{-1}$,	0.09	0.09
$\Delta W_\lambda = 10 \text{ м } \text{\AA}$	0.09	0.12

линий, каждое из исследований, как наше, так и [21], по своему характеру близко к дифференциальному анализу и не может содержать неопределенностей, вызванных величинами gf и применением различных наборов линий. Кроме того, в табл.2 мы приводим возможные изменения величин $\lg \epsilon$ (Fe), определенных по линии $\text{FeII } \lambda 6149.2 \text{ \AA}$, связанных с точностью определения параметров атмосфер и измерения ее эквивалентной ширины. Такие изменения несколько различаются для температурных диапазонов T_{eff} около 8000 К и T_{eff} около 9500 К, однако и в том, и в другом случаях максимальная из неопределенностей не превосходит 0.15 dex и не может объяснить окончательных вариаций величин $\lg \epsilon$ (Fe) в атмосферах изученных нами Am-звезд.

Крымская астрофизическая обсерватория

ON THE POSSIBLE EXISTANCE OF MAGNETIC FIELDS AND IRON ABUNDANCES IN THE ATMOSPHERES OF "METALLIC" Am- STARS.

I.S.SAVANOV

Two Iron lines ($\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ and $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$) in the spectra of 12 Am- stars were investigated on the base of CCD-observations. The fact that $\text{FeII } \lambda 6147.7 \text{ \AA}$ line is more intense than $\lambda 6149.2 \text{ \AA}$ line in the spectrum of Am-star 15 Vul can be regarded as indication on the presence of a magnetic field in its atmosphere. Our observations confirm that another Am-star *o Peg* has a magnetic field [1]. The difference in the equivalent widths of FeII lines in the spectra of other investigated stars can be due to blending of $\lambda 6147.7 \text{ \AA}$ line. From measure-

ments of the equivalent widths of FeII λ 6149.2 Å line Iron abundances in the atmospheres of 12 Am stars in the temperature range 7400 K—9800 K were obtained. The variations of $\log \epsilon$ (Fe) values are more than 0.5 dex and are larger than the precision of the estimations.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.Mathys, T.Lanz, *Astron. and Astrophys.*, 230, L21, 1990.
2. H.W.Babcock, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 3, 131, 1958.
3. P.S.Conti, *Astrophys. J.*, 156, 661, 1969.
4. В.М.Кувшинов, *Астрон. циркуляр*, No 682, 3, 1972.
5. V.M.Kuvshinov, G.Hildebrandt, W.Schoneich, *Astron. Nachr.*, 297, 4, 1976.
6. E.F.Borra, J.D.Landstreet, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 42, 421, 1990.
7. J.D.Landstreet, *Astrophys. J.*, 258, 639, 1982.
8. G.Mathys, S.K.Solanki, *Astron. and Astrophys.*, 208, 189, 1989.
9. G.Mathys, in "Elemental Abundance Analysis". eds. S.J.Adelman, T.Lanz. *Inst. d'Astronomie de l'Universite de Lausanne*, 101, 1988.
10. R.L.Kurucz, *SAO Special Rep.*, No 390, 1, 1981.
11. G.Mathys, *Astron. and Astrophys.*, 232, 151, 1990.
12. Л.С.Любимков, И.С.Саванов, *Астрофизика*, 19, 505, 1983.
13. Л.С.Любимков, И.С.Саванов, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 69, 50, 1984.
14. Л.С.Любимков, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 74, 3, 1986.
15. R.L.Kurucz, E.Peytremann, *SAO Special Rep.*, No 362, 1, 1975.
16. R.L.Kurucz, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, 1, 1979.
17. И.С.Саванов, *Астрон. ж.*, 1994 (в печати).
18. C.Burkhardt, M.F.Coupry, M.Lunel, C.van't Veer, *Astron. and Astrophys.*, 172, 257, 1987.
19. E.Hundt, *Astron. and Astrophys.*, 21, 413, 1972.
20. A.M.Boesgaard, R.L.Lavery, *Astrophys. J.*, 309, 762, 1986.
21. M.Lemke, *Astron. and Astrophys.*, 225, 125, 1989.