# **АСТРОФИЗИКА**

**TOM 48** 

ФЕВРАЛЬ, 2005

ВЫПУСК 1

УДК: 524.3-85

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ У ЧЕТЫРЕХ ЖЕЛТЫХ СВЕРХГИГАНТОВ. I

#### С.И.ПЛАЧИНДА

Поступила 20 июля 2004 Принята к печати 15 ноября 2004

Приведены результаты многолетних высокоточных измерений продольного компонента магнитного поля (B) четырех желтых сверхгигантов:  $\beta$  Aqr (G0 Ib),  $\alpha$  Aqr (G2 Ib),  $\epsilon$  Gem (G8 Ib) и  $\epsilon$  Peg (K2 Ib). Лучшая точность измерений  $\sigma$  = 0.8 Гс достигнута для  $\epsilon$  Peg . Для тестирования достоверности полученных точностей измерений использован метод Монте-Карло. Различия между наблюдательными ошибками и ошибками, рассчитанными по методу Монте-Карло, составили ~3.2%. У  $\beta$  Aqr и  $\alpha$  Aqr статистически значимое среднее за ночь магнитное поле не зарегистрировано. У звезды  $\epsilon$  Gem среднее за ночь магнитное поле зарегистрировано в пять ночей: 11.1  $\pm$  2.7 Гс, 9.8  $\pm$  2.5 Гс, -10.5  $\pm$  3.0 Гс, 38.1  $\pm$  7.4 Гс, 5.3  $\pm$  1.5 Гс. У звезды  $\epsilon$  Peg магнитное поле зарегистрировано в две ночи: -5.3  $\pm$  0.9 Гс, -2.7  $\pm$  0.8 Гс.

1. Введение. Изучение активности Солнца и звезд Главной последовательности показало фундаментальную роль магнитного поля в физике всех проявлений этого феномена [1]. Запутанные и зависящие от времени магнитные структуры, которые непосредственно наблюдаются на Солнце, являются проявлением взаимодействия в солнечной оболочке магнитного поля, вращения и конвекции. Как стало ясно в последние десятилетия, такое взаимодействие не может быть уникальным, присущим только Солнцу, и должно присутствовать и у других конвективных звезд. У звезд, которые в процессе эволюции покинули Главную последовательность, достигли стадии гигантов и сверхгигантов с развитыми конвективными оболочками, также наблюдаются проявления активности.

У желтых и красных гигантов на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (ГР) присутствует условная линия раздела между звездами, которые демонстрируют солнечно-подобную активность с присутствием спектральных линий переходной области ( $T \sim 10^5$  K) С IV, Si IV и др. (голубая сторона), и активность, отличную от солнечной, с только хромосферными спектральными линиями ( $T \sim 10^4$  K) О I, S I, Si II и др. (красная сторона) [2]. Эта линия раздела достигает на ГР-диаграмме нижней границы звезд, у которых наблюдается массивный холодный ветер [3]. Линия раздела присутствует также и в рентгеновской области [4-6], разделяя гиганты с зарегистрированным рентгеновским излучением (голубая сторона) и без него (красная сторона). Кроме того, был выделен тип гибридных звезд,

у которых присутствуют холодный массивный ветер и линии переходной области [7-9]. Реймерс и др. [10] выполнили на телескопе ROSAT наблюдения 15 гибридных звезд. У 12 из 15 объектов было зарегистрировано ренттеновское излучение, в том числе у желтых сверхгигантов в Сат, β Dra , β Aqr и с Рup (~10<sup>30</sup>-10<sup>31</sup> эрг с<sup>-1</sup>). Авторы пришли к заключению, что все гибридные звезды обладают рентгеновским излучением и для его регистрации необходимо только увеличение экспозиции. Кроме того, они предположили, что все G и K звезды первого и второго классов светимости являются гибридными звездами и концепция существования линии разделения должна быть заменена более дифференцированной картиной. В работе Рознера и др. [11] обсуждается, как изменение звездного динамо может привести к изменению топологии звездных магнитных полей конвективных гигантов и сверхгигантов. Конфигурации магнитных полей звезд с голубой стороны линии раздела на ГР-диаграмме могут быть в основном закрытыми, а с красной стороны открытыми. В таком случае, звезды, лежащие с голубой стороны, будут иметь горячую корону, а с красной - массивный холодный ветер. Общирные исследования, выполненные на телескопе Хаббла, позволили осуществить поиск корональных запрещенных спектральных линий ( $T \sim 10^6 - 10^7$  K) у 55 A-M карликов, гигантов и сверхгигантов [12,13]. Эти линии были зарегистрированы у dMe-звезд, активных гигантов, двойных звезд типа RS CVn и заподозрены у карликов солнечного типа. Из восьми желтых сверхгигантов, которые были включены в выборку (в Адг, а Адг и в Gem в том числе), ни у одного не обнаружены корональные запрещенные линии. Хотя, с другой стороны, у этого типа объектов присутствуют такие признаки активности, как холодный ветер, спектральные линии хромосферы и переходной температурной зоны.

Все вышеперечисленные факты и закономерности проявлений активности у гигантов и сверхгигантов позволяют предположить существование у этих звезд магнитных полей.

Обзорные высокоточные наблюдения гигантов показали существование на их поверхности слабых магнитных полей [14-16]. У сверхгигантов, находящихся с красной стороны области пульсационной неустойчивости на ГР-диаграмме, прямые измерения магнитного поля отсутствуют. В данной работе приводятся первые результаты высокоточных измерений продольного компонента магнитного поля у четырех сверхгигантов, β Aqr (G0 Ib), α Aqr (G2 Ib), ε Gem (G8 Ib), ε Peg (K2 Ib), а также выполнен анализ достоверности этих измерений.

2. Наблюдения. Наблюдения четырех сверхгигантов, β Aqr (G0 Ib), α Aqr (G2 Ib), ε Gem (G8 Ib), ε Peg (K2 Ib), были выполнены в Крымской астрофизической обсерватории с использованием ахрома-

тического стоксметра, который установлен перед входной щелью спектрографа Куде 2.6-м телескопа им Г.А.Шайна. Прибор, процедура наблюдений и методика обработки описаны в [17,18]. В основе методики лежит измерение зеемановского расщепления спектральных линий в магнитном поле звезлы.

Зеемановские спектрограммы были получены в двух спектральных областях 6130-6200 Å и 6200-6270 Å. Разрешение составляло ~30000. Для одной экспозиции у каждой моды поляризованного света отношение сигнал/шум было 300-450. С целью достижения высокой точности, для каждой звезды экспозиции выполнялись многократно в течение нескольких часов. Пля выбора не блендированных спектральных линий использовалась зависимость величины ошибки единичного измерения магнитного поля от глубины линии  $(r_0 - r_1)$ , помноженной на фактор магнитной чувствительности Ланде г. Пример такой зависимости приведен на рис.1, где r<sub>0</sub> - уровень ограничения спектральной линии со стороны континуума и  $r_{\epsilon}$  - центральная глубина спектральной линии. Открытые кружки и точечная кривая аппроксимации представляют результат моделирования методом

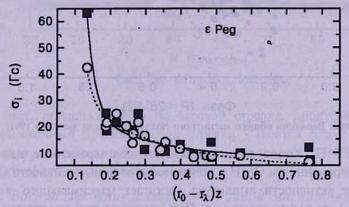


Рис.1. Зависимость ведичины ошибки единичного измерения магнитного поля от глубины линии (г. - г.) и фактора магнитной чувствительности Ланде г.

Монте-Карло с генерированием случайных чисел по нормальному закону; заполненные квадраты и сплошная кривая аппроксимации представляют исходные измерения. Для выбора подходящих спектральных линий использовался критерий  $z(r_0 - r_1) > 0.2$ .

3. Надежность высокоточных спектрополяриметрических измерений слабых магнитных полей. На рис. 2 показаны вариации Общего Магнитного Поля (ОМП) Солнца как звезды в эпоху активности в 1991г. [19]. Точность измерений составляет 0.05 Гс, что меньше размера кружков. Открытые кружки показывают поведение ОМП в первых числах 1991г., заполненные кружки обозначают величины магнитного поля для

последующих периодов. Известно, что сложная и зависимая от времени магнитная структура на поверхности Солнца является продуктом взаимодействия магнитного поля, конвекции и дифференциального вращения оболочки, расположенной над лучистым ядром. Это явление присутствует и у других звезд с развитыми конвективными оболочками разных светимостей. Рис.2 демонстрирует явление нестационарных изменений амплитуды и формы кривой поля с фазой периода вращения Солнца, накладывающихся на основную закономерность периодического

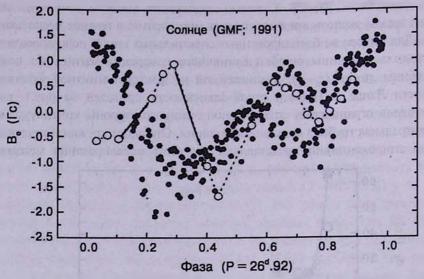


Рис.2. Вариации общего магнитного поля Солнца как звезды в 1991г.

изменения ОМП. Кроме того, существуют долговременные изменения амплитуды переменности ОМП в зависимости от фазы активности Солнца: в максимуме активности амплитуда достигает максимального значения 1.5-2 Гс, а в минимуме активности ОМП уменьшается до десятых долей Гаусса [20]. У звезд, в отличие от Солнца, измерения выполняются эпизодически и носят сезонный характер. Описанная выше (рис.2) непредсказуемая переменность ОМП может быть воспринята как ошибки измерений, и важные аспекты поведения ОМП будут утеряны, если не знать реальную точность конкретного прибора. Поэтому надежность воспроизведения высокоточных спектрополяриметрических измерений слабых магнитных полей у конвективных звезд является главным вопросом. Ряд критериев надежности, в применении к крымским измерениям, рассматривается в нижеследующих пунктах.

3.1. Контроль юстировки стоксметра. Перед каждым сетом наблюдений юстировка стоксметра проверяется с использованием какойлибо яркой звезды. Результат такой процедуры приведен на рис.3. Калиб-

ровочное устройство (поляризатор и ахроматическая четвертьволновая пластина) монтируется перед стоксметром и пучок звездного света поляризуется в циркулярнополяризованный (с эффективностью 97-98%). В зависимости от угла поворота входной четвертьволновой пластины стокс-

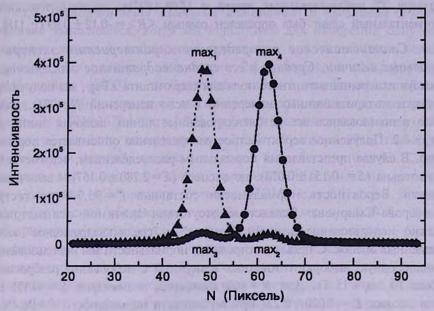


Рис.3. Тест юстировки стоксметра

метра, свет, поляризованный по часовой стрелке, пропускается ( $\max_1$ ), а поляризованный против часовой стрелки - гасится ( $\max_2$ ) и наоборот ( $\max_3$ ,  $\max_4$ ). Эффективность стоксметра составляет 94-95%, включая неэффективность калибровочной насадки.

- 3.2. Воспроизведение известной кривой магнитного поля для магнитной звезды с целью тестирования правильности определения знака поля и его величины. Наши измерения магнитного поля у магнитной звезды в Согопае Borealis [18,21] показывают требуемое согласие с измерениями других авторов. Кроме того, они демонстрируют значимое различие по амплитуде кривых изменения магнитного поля с фазой периода осевого вращения, полученных с использованием разных спектральных линий. Этот известный эффект для магнитных звезд с аномалиями химического состава присутствует также и у Солнца [22-24]. В нашем случае этот эффект важно учитывать как при оценке реальных ошибок измерений, так и при вычислении среднего значения магнитного поля.
- 3.3. Воспроизведение нулевого поля и определение величины систематического инструментального сдвига. Сравнение наших

данных для Проциона ( $B_e = -1.34 \pm 1.0$  Гс) с полученными в [25] ( $B_e = -1.86 \pm 0.9$ ,  $0.49 \pm 0.8$  Гс) показали хорошее согласие внутри ошибок наблюдений [18]. Это важное совпадение, так как в [25] использовался магнито-оптический фильтр, имеющий отличную от стоксметра конструкцию. Используя 27 наблюдательных ночей в 1989-1997гг., систематический инструментальный сдвиг был определен равным  $\langle B_e \rangle = -0.12 \pm 0.99$  Гс [18].

- 3.4. Статистическое распределение характеристик экспериментальных величин. Среднее и его среднеквадратичное отклонение. Используя измерения магнитного поля для сверхгитанта є Peg, мы получили статистики поляризационных измерений (число измерений N=971). Для анализа использовались все не блендированные линии, включая линии с  $z(r_0-r_1) < 0.2$ . Полученное вероятностное распределение описывается лоренцианой. В случае представления нормальным распределением, асимметрия незначительна ( $S=-0.154\pm0.078$ ), но эксцесс ( $E=2.280\pm0.157$ ) - величина значимая. Вероятность нормальности составила P = 93.7% по тесту Колмогорова-Смирнова. Вследствие отсутствия значимой асимметрии возможно использование величин "среднее" и "среднеквадратичное" как несмещенных оценок. С целью тестирования нормальности мы использовали квазиоднородную выборку одиночных измерений с небольшим разбросом ошибок:  $10 < \sigma_i < 15$  Гс. Для N = 460 измерений асимметрия  $S = -0.115 \pm$ 0.114 и эксцесс  $E=-0.020\pm0.227$  при вероятности нормальности P=96.4%. Так как однородный массив дает нам нормальный закон распределения для измеряемой нами величины В., то это позволяет использовать метод Монте-Карло с нормальным законом генерации случайной величины для оценки экспериментальных погрешностей.
- 3.5. Моделирование величины стандартного отклонения с использованием метода Монте-Карло. Для N = 2545 измерений магнитного поля у всех четырех сверхгигантов, включая измерения по слабым спектральным линиям, для которых  $z(r_0 - r_c) < 0.2$ , получено следующее соотношение:  $\langle \sigma_{(m-c)} \rangle = 1.033 \langle \sigma \rangle$ , т.е. средняя ошибка по методу Монте-Карло и средняя экспериментальная ошибка единичного измерения практически одинаковы. Это говорит о том, что, как для линий с  $z(r_0-r_0)>0.2$ , так и для участка резкого нелинейного увеличения величин ошибок измерений с  $z(r_0-r_0)<0.2$  (см. рис.1), метод Монте-Карло дает устойчивое совпадение с экспериментом и пригоден для оценок ошибок. Далее, измерения по слабым спектральным линиям, для которых  $z(r_0-r_0) < 0.2$ , были исключены из рассмотрения, и метод Монте-Карло дал следующую зависимость:  $\langle \sigma_{(m-c)} \rangle = 0.968 \langle \sigma \rangle$ . В том случае, если ошибки, определенные из эксперимента и по методу Монте-Карло. различаются с вероятностью P = 95% и больше, мы должны искать дополнительные источники ощибок. Полагая, что эксперимент выполнен

тшательно, таким дополнительным источником ошибок может быть как переменность магнитного поля в процессе данной серии измерений, так и тот факт, что разные линии могут нести информацию о разных полях в зависимости от физических условий в области их формирования.

- 3.6. Однородность выборки измерений. В идеальном случае это условие выполняется, когда мы используем для измерений одну спектральную линию и наблюдения проводятся при одинаковых погодных условиях. На практике, для нашего 2.6-м телескопа со спектральным разрешением ~30000 и изображением около 3 секунд, когда наблюдаем є Ред (m, = 2.4) и используем для измерения магнитного поля спектральную линию V I 6216.3678 Å с z=1.970, требуется экспозиция в 15 минут, чтобы получить точность измерения о, = 2.5 Гс. В случае 12-м телескопа и аналогичных условий, ошибка измерений была бы  $\sigma_i = 0.54$  Гс. С другой стороны, мы знаем, что ошибка измерений ОМП у Солнца как звезды на Солнечной обсерватории Вилкокса (США)  $\sigma_i = 0.05$  Гс; в Крымской астрофизической обсерватории ошибка составляет  $\sigma_i = 0.17$  Гс. В обеих обсерваториях используется для измерений одна и та же линия Fe I 5250 Å с фактором Ланде z = 3.0. Очевидно, что для высокоточных спектрополяриметрических измерений слабого магнитного поля звезд требуется использование как можно большего числа спектральных линий. Измерения по разным линиям дают разные ошибки. В нашем случае солнечноподобных спектров, как правило, отношение сигнал/шум составляет около 300-450, и область ошибок лежит в диапазоне от 4-5 до 20-25 Гс, в зависимости от магнитной чувствительности, полуширины и глубины спектральной линии. Поэтому необходимо вычислять средневзвещенные величины магнитного поля  $B_{\infty}$  и их ошибки  $\sigma_{w}$ . Но эти величины будут корректными только в том случае, если различие между экспериментальными ошибками и ошибками, определенными по методу Монте-Карло, будет статистически незначимо. Если же это различие статистически значимо, то мы должны вычислять просто среднеарифметическое В и его ошибку о и искать причины этого различия.
- 3.7. Воспроизведение магнитной кривой звезды со слабым полем. На сегодня нами получены кривые изменения магнитного поля с известным периодом вращения у двух солнечно-подобных звезд \$ Воо А и 61 Суд А [21,26]. У \$ Воо А магнитное поле меняется от -10 до +30 Гс с периодом вращения звезды, а у 61 Суд А от -10 до +4 Гс. Причем, в случае \$ Воо А наши измерения со стоксметром показали хорошее согласие с измерениями на многощелевом магнитометре других авторов [14].
- 3.8. Инструментальный контроль случайных или систематических ложных сигналов. На рис.4 схематично изображена последова-

тельность четырех экспозиций. Для пар экспозиций через одну спектры с одинаковой круговой поляризацией будут проецироваться на одно и то же место ПЗС. Эти пары должны давать нулевое магнитное поле в случае отсутствия ложного сигнала.

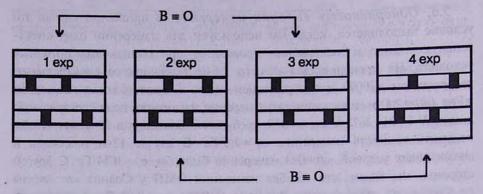


Рис.4. Схема инструментального теста для определения величины ложных полей.

4. Результаты наблюдений. Данные для спектральных линий были взяты нами из венской базы атомных параметров спектральных линий [27]. Выбор не блендированных линий для исследуемых звезд осуществлялся с помощью расчета синтетических спектров по программе "SynthM" [28].

В табл 1 суммированы результаты измерений магнитного поля для программных звезд. В первом столбце приведены гелиоцентрические юлианские даты среднего значения времени наблюдений, во втором столбце число единичных измерений. Следующие два столбца дают стандартное отклонение, полученное по методу Монте-Карло (StD\_) и из наблюдений (StD). Моделирование измерений  $B_{\rm c}$  осуществлялось по тысяче раз для каждого измерения по каждой спектральной линии. В пятом столбце приведена вероятность Р реальности различия между StD\_ и StD по критерию Фишера. В этом столбце вероятности, превышающие 95%, отмечены звездочками. Всего имеется пять таких дат. Для одной даты из этих пяти, у є Gem, зарегистрировано значимое среднее поле -10.5 ± 3.0 Гс, составляющее 3.5 о. Детальный анализ причин, которые вызвали такое значимое различие, будет приведен в следующей статье. Здесь отметим, что причинами, вызывающими такое различие, могут быть как инструментальные эффекты, так и реальная переменность магнитного поля в процессе измерений, или же различие в величине магнитного поля, определяемого по разным линиям. В шестом и седьмом столбцах приведены среднеарифметические значения магнитного поля  $(B_{m})$  и его ошибки  $(\sigma_{eq})$ . В следующих двух столбцах приведены средневзвещенные значения ОМП  $(B_{-})$  и их ошибки  $(\sigma_{ew})$  для тех дат, для которых нет реального различия между модельными и экспериментальными ошибками. В последнем столбце

Таблица 1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ CREPXCUCAHTOR

СВЕРХІ ИІ АПТОВ												
	JDH	N	StD_	StD	P	B	RMS_	B	RMS	k		
	+2400000.000	-11	Monte	TO THE OWNER OF THE OWNER	(%)	Гс	σ,	Гс	σ,			
Tr	(1)	0 -	Carlo	Udivan	74-315	MICH C				-		
β Aqr (G0 Ib)												
П	51027.502	44	18.2	20.7	79.9	9.2	3.1	8.0	2.8	2.9		
2	51028.498	65	18.3	20.1	77.2	-2.7	2.5	-3.7	2.3			
3	51035.425	65	18.6	25.5	99.4*	-0.3	3.2	J-1	-			
α Aqr (G2 Ib)												
4	51029.531	52	19.3	19.2	51.5	0.0	2.7	-0.5	2.4	1,1		
5	51031.495	66	14.8	14.6	54.4	-2.3	1.8	-1.4	1.7			
6	51035.496	66	12.4	13.0	64.8	-4.0	1.6	-3.4	1.4	2.4		
7	51432.399	71	17.1	17.1	50.0	-5.5	2.0	-5.5	1.9	2.9		
8	51433.415	40	15.4	13.4	80.6	3.7	2.1	3.5	2.0	100		
9	51434.435	80	16.0	16.3	56.5	-1.4	1.8	-2.2	1.6	100		
10	51436.440	69	16.3	15.2	71.7	3.1	1.8	2.9	1.8			
ε Gem (G8 Ib)												
11	49655.544	20	15.8	14.2	67.7	-7.1	3.2	-4.6	1.7	2.7		
12	50096.415	36	15.4	14.8	59.2	-1.4	2.5	0.1	1.9			
13	50116.372	27	13.3	12.5	62.3	3.1	2.4	-0.5	2.0			
14	50801.582	42	12.4	17.1	98.0*	4.1	2.6	W	-			
15	50817.498	21	14.2	17.6	82.8	-6.6	3.8	0.3	3.0			
16	51239.357	71	16.6	18.2	77.8	1.9	2.2	2.5	1.8			
17	51907.500	79	31.9	33.2	63.7	14.0	3.7	11.1	2.7	4.1		
18	51912.219	44	21.2	23.5	74.9	4.1	3.6	9.8	2.5	3.9		
19	52217.516	108	23.0	31.3	99.9*	-10.5	3.0	1-7.35	-	3.5		
20	52280.474	60	21.3	49.0	100*	4.9	6.3	-	-	9		
21	52306.310	13	27.8	24.8	65.1	42.5	6.9	38.1	7.4	5.1		
22	52307.451	56	20.1	22.6	80.6	-5.1	3.0	-4.9	2.4	2.0		
23	52308.376	88	19.3	22.6	92.9	3.6	2.4	1.6	2.1	445		
24	52309.356	77	17.1	17.9	65.4	4.0	2.0	5.3	1.5	3.5		
	13.1	To a se	anni av	εΙ	eg (K2	Ib)	Miles in	Miles		100		
25	51027.528	126	1.7	13.9	97.2*	-2.6	1.2	7-100	-	2.2		
26	51028.529	117	13.5	14.5	77.9	0.0	1.3	1.2	1.1			
27	51029.507	67	13.9	12.3	83.9	3.9	1.5	2.6	1.3	2.0		
28	51035.468	178	15.6	17.4	·92.6	-3.4	1.3	-5.3	0.9	5.9		
29	51403.530	100	17.5	17.7	54.5	-2.0	1.8	0.4	1.6			
30	52502.500	91	16.8	18.7	84.4	-0.3	2.0	-2.4	1.5	150		
31	52509.493	206	13.8	14.3	69.5	-3.1	1.0	-2.7	0.8	3.4		
113	10 to 10 to 10 to 10		Calle III	1010	3200	10 10 10		a = ( 0)	177	110		

даются величины  $B_{ew}/\sigma_{ew} \ge 2$ .  $B_{ea}/\sigma_{ea} \ge 2$  представлены в случае статистически достоверного различия между модельными и экспериментальными ошибками.

Анализ приведенных в таблице результатов предполагает, что были зарегистрированы статистически достоверные значения магнитного поля пять раз у є Gem и два раза у є Peg. Чтобы проверить этот результат, мы выполнили тестовый анализ согласно разделу 3.8. Результаты теста приведены в табл.2. В первом столбце приведены гелиоцентрические юлианские даты наблюдений, во втором - число измерений, далее величина магнитного поля и его ошибка ( $B_e \pm \sigma_e$ ), без обозначения способа вычисления. В четвертом столбце дана величина  $k = B_e/\sigma_e$ . В пятом и шестом столбцах даны значения, полученные в результате тестирования:  $B_{test} \pm \sigma_{test}$  и  $k_{test} = B_{test}/\sigma_{test}$ .

Таблица 2 -

	JDH +2400000.000	N	B <sub>e</sub> ± σ Γc	k	$B_{\text{rest}} \pm \sigma_{\text{rest}}$ $\Gamma c$	K <sub>rest</sub>					
ε Gem (G8 Ib)											
1	51907.500	79	11.1 ± 2.7	4.1	$3.8 \pm 3.0$	1.3					
2	51912.219	44	9.8 ± 2.5	3.9	-4.4 ± 2.2	2.0					
3	52217.516	108	$-10.5 \pm 3.0$	3.5	7.2 ± 3.4	2.1					
4	52306.310	13	38.1 ± 7.4	5.1							
5	52309.356	77	5.3 ± 1.5	3.5	$0.1 \pm 1.6$	0.1					
ε Peg (K2 Ib)											
6	51035.468	178	-5.3 ± 0.9	5.9	0.3 ± 1.0	0.3					
7	52509.493	206	$-2.7 \pm 0.8$	3.4	$-0.7 \pm 0.9$	0.9					

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТА

Как мы видим из приведенной таблицы результатов тестирования, шесть дат дают отношение  $k_{test} = B_{test}/\sigma_{test} < 3$ , т.е. величина инструментальных эффектов статистически незначима. Следовательно, для этих дат было зарегистрировано реальное среднее за ночь значение магнитного поля. Для седьмой даты JDH 2452306.310 в таблице отсутствует результат тестирования, так как было только две экспозиции, и поэтому невозможно проверить реальность полученной величины с использованием теста. Но ошибка измерений в эту дату, определенная из моделирования по методу Монте-Карло, практически не отличается от экспериментальной (см. табл.1), поэтому сделан вывод о реальности величины магнитного поля, зарегистрированной в эту дату.

В работе [21] выполнен обзор результатов высокоточных измерений ОМП у звезд с развитыми конвективными оболочками. В сводной таблице присутствуют объекты всех классов светимости (N=21), для которых зарегистрировано ОМП. В эту таблицу включены оба сверхгиганта  $\varepsilon$  Gem и  $\varepsilon$  Peg с максимальными значениями магнитного поля, полученными в настоящей работе. Для двух карликов солнечного типа  $\xi$  Boo A и 61 Cyg A получены кривые изменения ОМП с периодом собственного осевого вращения. Для всех остальных объектов числа

измерений недостаточно для поиска зависимостей изменения ОМП с фазами периодов вращения. Наибольшее число ночей наблюдений (14) выполнено у сверхгиганта  $\varepsilon$  Gem. Для всех объектов зарегистрированное продольное магнитное поле не превышает двух-трех десятков Гаусс, за исключением  $\varepsilon$  Leo (Sp G1 II), для которого однажды было зарегистрировано поле  $B=49.2\pm6.1$  Гс [15], и  $\varepsilon$  Gem (см. табл.1). В названный обзор не вошли результаты Зееман-Допплер-картирования ряда быстровращающихся звезд типа RS CVn [29], у которых на поверхности зарегистрированы крупномасштабные магнитные поля.

Таким образом, можно говорить о том, что в результате обзорных наблюдений, выполненных разными авторами и с разными инструментами, было зарегистрировано присутствие ОМП у звезд всех классов светимости с развитыми конвективными оболочками. Но вопрос о природе, геометрии и характере переменности зарегистрированных магнитных полей открыт. Отметим, что в работе [16] у звезды є Суд (КО III) в две соседние даты, JDH 2451389.371 и 2451390.354, было зарегистрировано поле 9.3 ± 2.5 и -2.6 ± 1.4 Гс. Различие является статистически значимым. Аналогично, в настоящей работе однажды зарегистрировано значимое изменение среднего значения поля от суток к суткам у сверхгиганта є Gem для дат JDH 2452306.310 и 2452307.451: 38.1  $\pm$  7.4 и -4.9  $\pm$  2.4 Гс (см. табл.1). Ясно, что в обоих случаях изменение поля за одни сутки не представляется возможным объяснить изменением его глобальной конфигурации за счет вращения звезды вокруг собственной оси или собственно переменностью этой конфигурации. Остаются два варианта объяснения. Первый вариант - это ложная переменность, вызванная инструментальными причинами, а второй вариант - это искажение существующей конфигурации, вызванное появлением (формированием) на поверхности магнитного поля активной области. Т.е. суперпозиция глобального поля и всплывающего поля формирующейся активной области может дать при измерении продольного компонента быструю переменность.

Природа ОМП у Солнца до сих пор является предметом дискуссий. ОМП с циклом активности не переключает знак, а только меняет амплитуду колебаний с периодом вращения. Это неосесимметричное поле Солнца отсутствует в общепринятой феноменологической магнито-кинематической модели Бэбкока-Лейтона, а также и в наиболее разработанной ( $\alpha - \Omega$ )-динамо модели генерации магнитных полей. В работах [21,26] обсуждалась гипотеза о том, что в случае Солнца и солнечно-подобных звезд мы наблюдаем в виде ОМП проявление на поверхности свойств глобального магнитного поля лучистой зоны.

У звезд растет радиус в процессе эволюционного ухода с Главной последовательности. У конвективных гигантов радиусы составляют десятки

радиусов Солнца, а у конвективных сверхгигантов - сотни радиусов Солнца. В случае дипольной конфигурации, с ростом размера, поле можно считать убывающим по кубическому закону. В стадии конвективных гигантов ОМП, как глобальное магнитное поле лучистой зоны звезды, будет уменьшено на поверхности в 10<sup>3</sup>-10<sup>5</sup> раз. В случае сверхгигантов этот коэффициент будет еще больше:  $10^5$ - $10^7$ . (Величина  $10^5$  как граница раздела является условной). Если гигантом является проэволюционировавший солнечно-подобный карлик, то глобальное поле лучистой зоны звезды, проникшее на поверхность, было бы меньше десятой доли Гаусса и недоступно для регистрации. В этом случае, как и в случае со сверхгигантами, можно говорить о том, что поле на поверхности звезды, вероятно, является продуктом работы динамо-механизмов. Если же гигантом является проэволюционировавшая магнитная звезда с сильным начальным полем на полюсах (~104 Гс), то у такого гиганта глобальное поле лучистого ядра на поверхности звезды может достигать десятка Гаусс и будет доступным для регистрации. У сверхгигантов величина поля бывшей магнитной звезды на поверхности составит малые доли Гаусса и будет недоступна для регистрации. Следовательно, зарегистрированное поле у двух сверхгигантов, вероятно, является продуктом работы динамо-механизмов.

5. Заключение. В статье представлены результаты многолетних высокоточных измерений продольного компонента магнитного поля ( $B_e$ ) четырех желтых сверхгигантов -  $\beta$  Aqr ,  $\alpha$  Aqr ,  $\epsilon$  Gem ,  $\epsilon$  Peg . Лучшая точность измерений,  $\sigma = 0.8$  Гс, достигнута для  $\epsilon$  Peg . Различия между наблюдательными ошибками и ошибками, определенными по методу Монте-Карло, составили ~3.2%. У  $\beta$  Aqr и  $\alpha$  Aqr статистически значимое среднее за ночь магнитное поле не зарегистрировано. У  $\epsilon$  Gem среднее за ночь магнитное поле зарегистрировано в пять ночей:  $11.1 \pm 2.7$  Гс,  $9.8 \pm 2.5$  Гс,  $-10.5 \pm 3.0$  Гс,  $38.1 \pm 7.4$  Гс,  $5.3 \pm 1.5$  Гс. У  $\epsilon$  Peg среднее за ночь магнитное поле зарегистрировано в две ночи:  $-5.3 \pm 0.9$  Гс,  $-2.7 \pm 0.8$  Гс. Вероятно, обнаруженное поле является продуктом работы динамомеханизмов.

Автор выражает признательность Н.Петровой за помощь в обработке наблюдений, С.Сергееву за дискуссии, С.Ростопчину за создание графического интерфейса подготовки данных. Работа выполнена частично при поддержке гранта Украинского правительства SFFD №02.07/00300.

Крымская астрофизическая обсерватория, Украина, e-mail: plach@crao.crimea.ua

# RESULTS OF MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS ON FOUR YELLOW SUPERGIANTS. I

### S.I.PLACHINDA

Results of high precision measurements of the net longitudinal component of magnetic field strength  $B_e$  performed during 31 nights for four yellow supergiants - $\beta$  Aqr (G0 Ib),  $\alpha$  Aqr (G2 Ib),  $\epsilon$  Gem (G8 Ib),  $\epsilon$  Peg (K2 Ib) - are reported. The best accuracy,  $\sigma = 0.8$  G, was achieved for  $\epsilon$  Peg. In order to test the real accuracy of the measurements, Monte Carlo simulations of the experimental errors are used. The discrepancy between observational errors and standard deviations from Monte Carlo simulations created using generator of the normal distribution numbers is about 3.2%. For  $\epsilon$  Gem and  $\epsilon$  Peg the presence of general magnetic fields are detected. During five (out of 14 nights, in total) observational nights of  $\epsilon$  Gem magnetic fields were:  $11.1 \pm 2.7$  G,  $9.8 \pm 2.5$  G,  $-10.5 \pm 3.0$  G,  $38.1 \pm 7.4$  G,  $5.3 \pm 1.5$  G. Two observational nights, out of 7, show the presence of magnetic field on  $\epsilon$  Peg:  $-5.3 \pm 0.9$  G,  $-2.7 \pm 0.8$  G.

Key words:  $stars:activity:magnetic\ field\ -\ stars:individual: \beta\ Aqr\ ,\ \alpha\ Aqr\ ,$   $\epsilon\ Gem\ ,\ \epsilon\ Peg$ 

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Р.Е.Гершберг, "Активность солнечного типа звезд Главной последовательности", Астропринт, Одесса, 2002.
- 2. J.L.Linsky, B.M.Haisch, Astrophys. J., 229, L27, 1979.
- 3. D. Reimers, Astron. Astrophys., 57, 395, 1977.
- 4. T.R.Ayres, J.L.Linsky, G.S.Vaiana, L.Golub, R.Rosner, Astrophys. J., 250, 293, 1981.
- 5. B.M. Haisch, J.H.M.M. Schmitt, C. Rosso, Astrophys. J., 383, L15, 1991.
- 6. B.M. Haisch, J.H.M.M. Schmitt, A. C. Fabian, Nature, 360, 239, 1992.
- 7. L. Hartmann, A.K. Dupree, J. C. Raymond, Astrophys. J., 236, L143, 1980.
- 8. L. Hartmann, A.K. Dupree, J. C. Raymond, Astrophys. J., 246, 193, 1981.
- 9. D. Reimers, Astron. Astrophys., 107, 292, 1982.
- 10. D. Reimers, M. Hunsch, J. H. M. M. Schmitt, F. Toussaint, Astron. Astrophys., 310, 813, 1996.
- 11. R.Rosner, Z.E.Musielak, F.Cattaneo, R.L.Moore, S.T.Suess, Astrophys. J., 442, L29, 1995.
- 12. T.R.Ayres, A.Brown, G.M.Harper, R.A.Osten, Astrophys. J., 583, 963, 2003.

- 13. S. Redfield. T.R. Ayres, J.L. Linsky et al., Astrophys. J., 585, 993. 2003.
- 14. E.F.Borra, G.Edwards, M.Mayor, Astrophys. J., 284, 211, 1984.
- 15. S. Hubrig, S. I. Plachinda, M. Hunsch, K.-P. Schröder, Astron. Astrophys., 291, 890, 1994.
- 16. Т.Н. Тарасова, Астрон. ж., 79, 526, 2002.
- 17. С.И.Плачинда, А.В.Якушечкин, С.Г.Сергеев, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 87, 91, 1993.
- 18. S. Plachinda, T. Tarasova, Astrophys. J., 516, 900, 1999.
- 19. Solar Geophysical Data.
- 20. V.A.Kotov, P.H.Sherrer, R.F.Howard, V.I.Haneychuk, Astrophys. J. Suppl. Ser., 116, 103, 1998.
- 21. S.I.Plachinda, in "Photopolarimetry in Remote Sensing", eds: G.Videen, Ya.S.Yatskiv, M.I.Mishchenko, Kluwer Acad. Publ. (in press), 2004.
- 22. S.I. Gopasyuk, V.A. Kotov, A.B. Severny, T.T. Tsap, Solar Physics, 31, 307, 1973.
- 23. С.И.Гопасюк, А.Б.Северный, Письма Астрон. ж., 9, 120, 1983.
- 24. В.А.Котов, И.В.Сетяева, Астрон. ж., 79, 272, 2002.
- 25. D.K.Bedford, W.J.Chaplin, A.R.Davies et al., Astron. Astrophys., 293, 377, 1995.
- 26. S.I. Plachinda, T.N. Tarasova, Astrophys. J., 533, 1016, 2000.
- 27. N.E. Piskunov, F. Kupka, T.A. Ryabchikova et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 138, 119, 1999.
- 28. С.А.Хан, "Моделирование и анализ спектров AP-звезд", канд. дисс., Одесса, 1999.
- 29. J.-F.Donati, A.CollierCameron, M.Semel et al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 345, 1145, 2003.