АСТРОФИЗИКА

ТОМ 39 ФЕВРАЛЬ, 1996 ВЫПУСК 1

УДК: 524.384

ПЕРЕМЕННОСТЬ СПЕКТРА βCrB В ОБЛАСТИ ЛИТИЯ LiI λ6708Å

Н.С.ПОЛОСУХИНА, В.П.МАЛАНУШЕНКО
М.ХАК, Ф.КАСТЕЛЛИ

Поступила 9 января 1996
Принята к печати 25 февраля 1996

Представлены некоторые результаты наблюдений спектра спектрально-двойной Ap звезды β CrB в области линии лития LiI λ6708Å. Наблюдения выполнены в Крымской обсерватории в 1993-1995 гг. на телескопе 2.6м со спектрографом кудэ. В качестве детектора используется CCD камера. Рассмотрены некоторые факторы, которые могут влиять на поведение литиевой бленды: вращение звезды, магнитное поле, изотопический сдвиг, двойственность, блендирование неизвестным элементом. Основной результат данной работы - обнаружение переменности литиевой бленды Li λ6708Å с периодом вращения звезды. Впервые приведены кривые изменений лучевой скорости V_r и полуширины FWHM литиевой бленды, свидетельствующие о неравномерном распределении лития или о неоднородном распределении условий возбуждения резонансного дублета лития в условиях сложной структуры сильного поверхностного магнитного поля. Подобные изменения показывают также линии редкоземельных элементов GdII λ6702.10 Å, GdII+CeII λ6704.3 Å, CeII+FeI λ6706.0 Å.

1. *Введение*. В течение многих лет, начиная с 1963 г. [1], исследователи Ap звезд неоднократно обращались к проблеме лития в этих звездах. Из химических аномалий литий представляет особый интерес по причине высокой чувствительности этого элемента к эволюционному статусу звезды. Однако следует заметить, что для большинства Ap звезд этот элемент не наблюдается. При температурах Ap звезд литий полностью ионизован. Только для некоторых холодных Ap звезд немногочисленные наблюдения указывали на возможность наблюдения единственной линии, принадлежащей резонансному дублету лития LiI λ6708 Å.

Идентификация дублета лития λ6708 Å затруднена из-за относительно низкого спектрального разрешения и низкого отношения *S/N*. К тому же проблема усложнялась некоторыми эффектами, типичными для Ap звезд, подобными наличию магнитного поля и пятнам химического состава.

Более поздние наблюдения и исследования Li в Ap звездах, полученные

современными приборами, - CCD камерой высокого разрешения и высокого отношения *S/N* показали, что дублет Li вероятно может присутствовать в спектрах некоторых Ap звезд.

Исследования [2,3,6], дополненные [4], указывали на то, что некоторые Ap звезды имеют очень бедное содержание лития, тогда как другие - сверхобилие. Окончательного заключения по поводу причин такого различия не было сделано. Диффузная теория не в состоянии объяснить высокое содержание лития у немногих Ap звезд, для которых литиевая бленда Li λ6708 Å сильна. Следует обратить внимание, что наблюдения в области Li холодных Ap звезд очень малочисленны и чаще всего случайны. Еще меньше наблюдений этого типа звезд с целью изучения поведения дублета лития как функции от периода вращения звезды. Такие наблюдения проводятся в Крымской астрофизической обсерватории для некоторых Ap звезд [7,8]. Первые результаты изложены в работе [8], где для двух Ap звезд β CrB и γ Equ были продемонстрированы переменные с фазой вращения профили литиевой бленды. В настоящей работе проводится анализ поведения спектра β CrB в области Li λ6708 Å для сезона наблюдений 1993-1995 гг.

2. ***Наблюдения и обработка спектров.*** В нашей программе наблюдений Ap звезд для изучения лития заметное место отведено β CrB. По типу пекулярности эта звезда относится к SrCrEu звездам. Многочисленные наблюдения магнитного поля H_{eff} этой звезды указывают на наличие дипольного магнитного поля со средней амплитудой ±1 кГс и периодом вращения 18.^{d}487. Последние измерения поверхностного поля H_s этой звезды [10] с амплитудой от +5200 до +5800 Гс, повторяют характер изменений эффективного магнитного поля звезды.

Наблюдения β CrB в области лития выполнены в 1993-1995 гг. на 2.6м телескопе Крымской астрофизической обсерватории со спектрографом кудэ, оснащенным CCD камерой с чувствительным к красной области GEC детектором площадью 600×400 пикселов. Линейная дисперсия 2.5 Å/мм (или 0.0056 Å/*pix* в области λ 6708 Å). Спектральное разрешение 0.012 Å. Характерное значение отношения *S/N*≈200. Среднее время экспозиции около 20-30 мин. Мы получали обычно 1-4 спектрограммы в ночь. Табл. 1 содержит основные данные наблюдений β CrB.

Используя программу SPE, написанную сотрудником КрАО С.Сергеевым в Крымской обсерватории была сделана обработка этого наблюдательного материала. Детальное описание операций программы

SPE приведено в статье С.Сергеева и др. (в печати).

Для успешного изучения проблемы лития очень важно высокоточное определение шкалы длин волн. Большинство наблюдателей, работающих в области лития, делают дифференциальные измерения положения Li бленды, используя в качестве опорных линий: линии FeI и линию CaI λ6717.685 Å [11]. Этот метод был использован нами в предыдущей работе [8]. В настоящей работе определение шкалы длин волн проводилось по спектру сравнения (ториевая лампа с полым катодом). Мы отказались от более простых дифференциальных измерений, так как анализ спектра показал, что опорные линии FeI блендированы. Так например, две линии FeI λλ6708, 6716 ÅÅ из пяти опорных линий FeI блендированы линиями CeII и GdII.

Для определения шкалы длин волн в области лития λ6708Å использовались оба спектра сравнения (сверху и снизу относительно

Таблица 1

ДАННЫЕ О НАБЛЮДЕНИЯХ β CrB

1	2	3	4	5	6	7
93-06-06	6708	145.392	370	0.4805	0.1939	1
93-06-15	6708	154.365	180	0.9659	0.1962	1
93-06-21	6708	160.347	380	0.2895	0.1977	1
93-06-22	6708	161.335	510	0.3429	0.1980	1
93-06-23	6708	162.341	280	0.3973	0.1982	1
94-02-24	6707	408.469	350	0.7113	0.2618	2
94-02-25	6707	409.486	200	0.7665	0.2621	2
94-03-25	6707	437.490	670	0.2814	0.2693	2
94-07-04	6707	538.379	500	0.7384	0.2953	2
94-07-05	6707	539.380	560	0.7925	0.2956	2
94-09-09	6707	605.326	290	0.3593	0.3126	1
94-09-10	6707	606.305	430	0.4123	0.3129	1
95-03-05	6707	782.533	460	0.9453	0.3584	2
95-06-26	6707	895.287	470	0.0444	0.3875	2
средний спектр			1590	0.54	0.267	21

Объяснения колонок:

1) дата; 2) спектральная область; 3) момент наблюдений в HJD - 2449000; 4) отношение сигнал/шум; 5) фазы вращения звезды (pos.cross=2434217.^{d}50+18.^{d}487×*E*); 6) фазы орбитального движения (2425156.^{d}541+3873.^{d}0×*E*); 7) количество спектров.

звездного), от 8 до 12 линий в каждом из них. Точность определения положения линий спектра сравнения определяется отношением полуширины линии FWHM к отношению *S/N*. В нашем случае типичная полуширина линии FWHM=0.15Å, а *S/N*=120 среднее минимальное, - в этом случае σ=0.0012Å. Стандартное отклонение от дисперсионной кривой не превышает 0.002-0.003Å. Так как исследуется короткий спектральный интервал в ≈31Å, то дисперсионная кривая аппроксимировалась полиномом первой степени. После построения шкалы длин волн вносились поправки к центру Солнца.

Переход в систему длин волн, связанную с центром βCrB, был затруднен по причине спектральной двойственности звезды: полная амплитуда изменения лучевой скорости главного компонента составляет около 30 км/с. Орбитальное движение достаточно пристально изучено в [13], последнем обзоре, посвященном исследованию этого вопроса. Однако существующие разногласия по значениям компонентов орбитального движения не дают возможности точно учесть смещение шкалы длин волн: значение γ - скорости системы известно с точностью около 5 км/с. Поэтому переход к лабораторной шкале длин волн был выполнен после окончательной обработки и описан ниже.

Следующим шагом в обработке спектров было приведение каждого спектра к своему континууму. После нормирования спектров:

Все спектры β CrB были смещены к положению спектра соответствующего фазе $0.^{P}046$ периода вращения звезды. Эта фаза, близкая к фазе кроссовера, была использована как опорная. Значение сдвига каждого спектра к опорному устанавливалось с использованием кросс-корреляционной функции между отдельными спектрами и спектром, соответствующим фазе.

Из всех спектров, приведенных к фазе $0.^{P}046$, был получен средний спектр. Лабораторное значение длины волны линии CaI λ6717.685Å мы использовали как опорную линию в среднем спектре. В результате последовательных итераций был получен средний спектр β CrB в лабораторной шкале длин волн и индивидуальные спектры в той же самой шкале. Следует заметить, что для среднего спектра S/N≈1590. Этот спектр был использован для сравнения с синтетическим спектром β CrB, для определения содержания лития Li и других элементов в этой спектральной области [5]. Следует отметить хорошее согласие синтетического спектра с наблюдаемым на всем спектральном интервале, что является свидетельством корректной обработки данных наблюдений.

Сдвиги индивидуальных спектров для получения среднего спектра дают возможность выявить вариации центра тяжести линии Li и других элементов с вращением звезды.

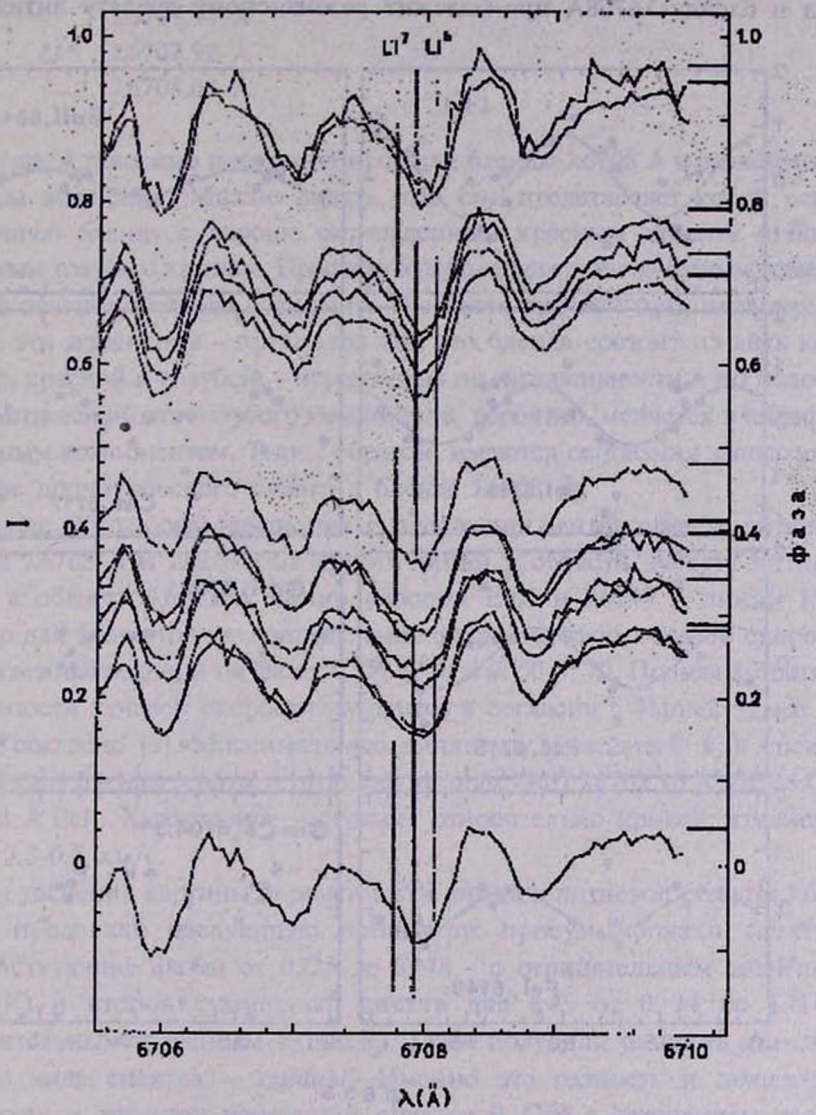

Рис. 1. Спектры β CrB, нормированные к континууму, для разных фаз вращения звезды.

4. *Результаты.* Результаты обработки спектров представлены на рис.1. Анализируя полученные результаты отмечаем следующие наиболее важные положения:

Наличие бленды λ6708Å на всех спектрах. Мы считаем, что главный вклад в бленду λ6708Å принадлежит резонансному дублету лития LiI

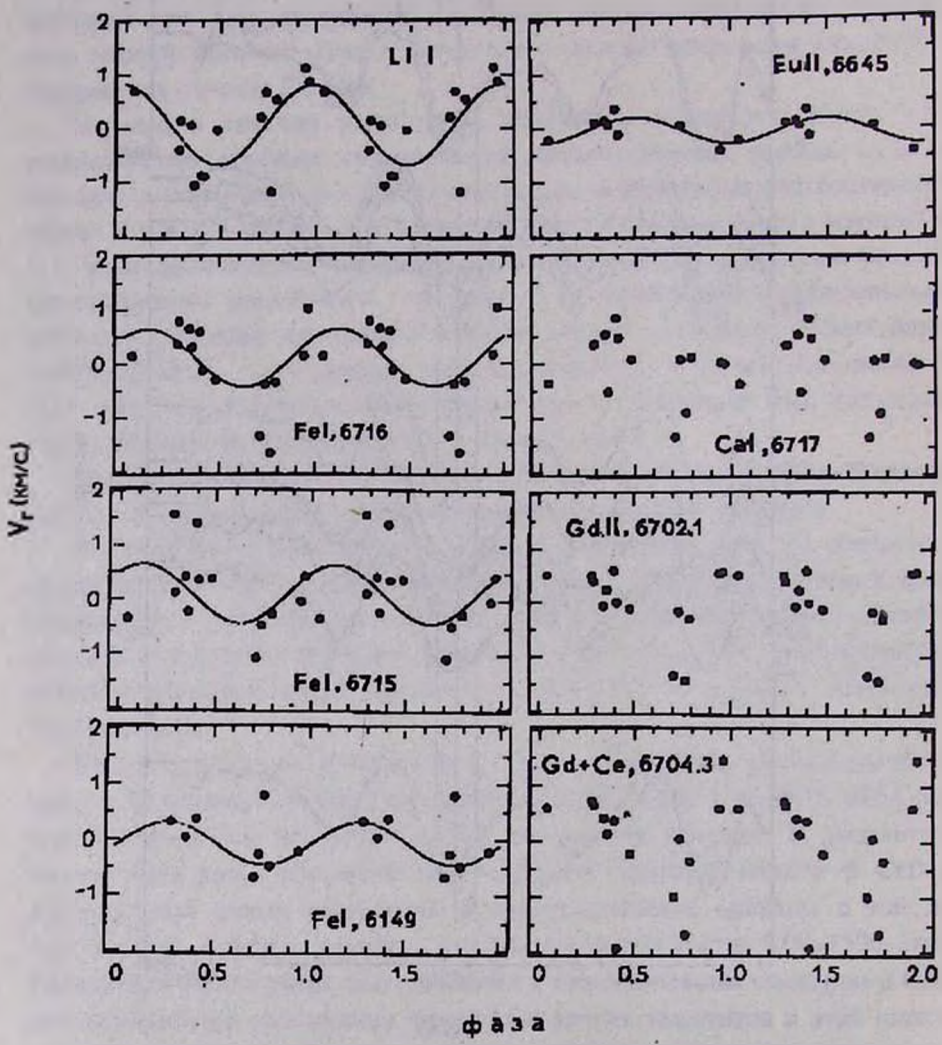

Рис. 2. Изменения лучевой скорости V_r для линий ряда элементов в области лития(λλ6690-6720ÅÅ).

Структура дублета LiI сложная: два компонента дублета, расщепленные на расстояние 0.152Å, принадлежат двум изотопам Li^7 и Li^6:

Li^7	λ6707.76 Å
	λ6707.91 Å
Li^6	λ6707.92 Å
	λ6708.07 Å.

На рис.1 показано поведение профиля бленды λ6708 Å в зависимости от фазы вращения. Можно видеть, что она представляет собой асимметричную бленду с хорошо определенным красным крылом и более размытым голубым крылом. Профиль бленды подвержен заметным изменениям в течение периода вращения. Наиболее простой путь интерпретировать эти изменения - предположить, что бленда состоит из двух компонент, красной и голубой, - переменных по интенсивности и по положению. Интенсивность голубого компонента, вероятно, меняется в антифазе с красным компонентом. Таким образом, имеются основания заподозрить наличие допплеровского сдвига в бленде λ6708 Å.

На рис. 2 показаны изменения V_r положения центра тяжести литиевой бленды λ6708 Å и некоторых других линий в области дублета лития, а также в области λ6645 Å линии европия EuII и λ6149 Å линии FeII. Однако для более точного определения формы кривой лучевой скорости не достает наблюдений на фазах $0.^P00$-$0.^P20$ и $0.^P50$-$0.^P70$. Полная амплитуда переменности лучевой скорости находится в согласии с $V\sin i \approx 2$-3км/с для β CrB, согласно [9]. Максимальную амплитуду изменений V_r в спектре показывают бленды, соответствующие линиям GdII λ6702.10 Å, GdII+CeII λ6704.3 Å CeII. Характерное рассеяние относительно кривой изменения $\Delta V_r \sim \pm 0.3$-0.5 км/с.

Для уяснения картины переменности линий в литиевой области λ6708 Å мы проделали следующую процедуру: просуммировали спектры, соответствующие фазам от $0.^P35$ до $0.^P48$ - с отрицательным значением $V_r(\min V_r)$ и второй суммарный спектр для фаз от $0.^P94$ до $1.^P10$ с положительным значением $V_r(\max V_r)$. Затем получили разность этих двух сумм в виде спектра - *'residual'*. Именно эта разность и показывает амплитуду и характер изменений спектра β CrB с вращением звезды (рис. 3).

Переменность некоторых линий очевидна. Для бленды λ6708 Å мы можем различить две компоненты в *'residual'* спектре. Они показывают

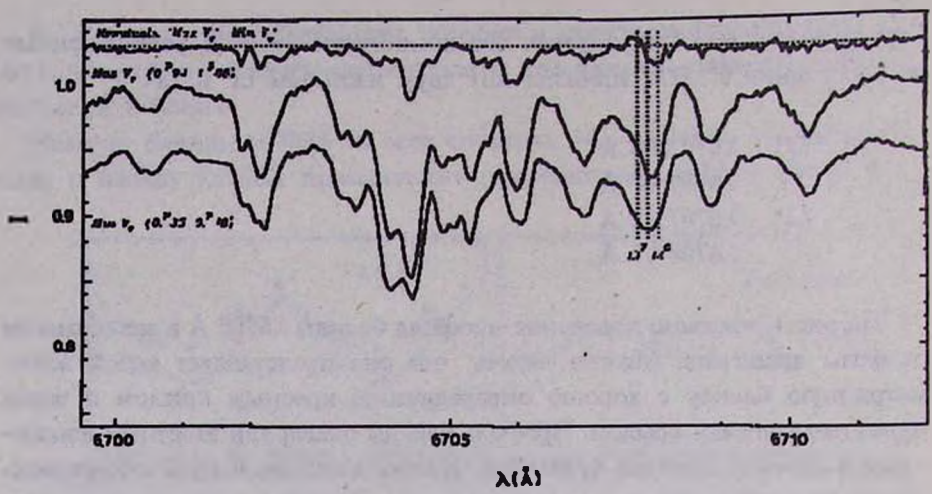

Рис. 3. Разница двух средних спектров: maxV_r - результат осреднения спектров с положительным V_r, minV_r - результат осреднения спектров с отрицательным V_r.

изменения в антифазе. Можно отметить наиболее сильные изменения у бленды с GdII и CeII.

Таким образом, в результате наших наблюдений показано, что большинство линий в спектре β CrB меняется с периодом вращения звезды.

Для полноты картины переменности спектра β CrB мы использовали также другие области спектра: EuIIλ6645 Å, FeIIλ6149 Å.

Поведение полуширин линий FWHM с фазой периода вращения также очень интересное (рис.4). Только бленда лития λ6708 Å показывает заметные изменения, тогда как эквивалентная ширина этой бленды практически не меняется.

Полный анализ результатов наблюдений литиевой бленды, а также корреляций между V_r, W_λ и FWHM для различных линий не закончен. Мы предполагаем это сделать после того, как будет полностью завершена обработка более старых CCD наблюдений этой области для β CrB.

5. *Дискуссия*. Мы выполнили предварительный анализ поведения Li бленды λ6708 Å. Здесь мы рассмотрели несколько возможностей интерпретировать полученные результаты наблюдений:

1. Одно возможное объяснение поведения литиевой бленды - это пятнистое распределение лития на поверхности β CrB. Это объяснение

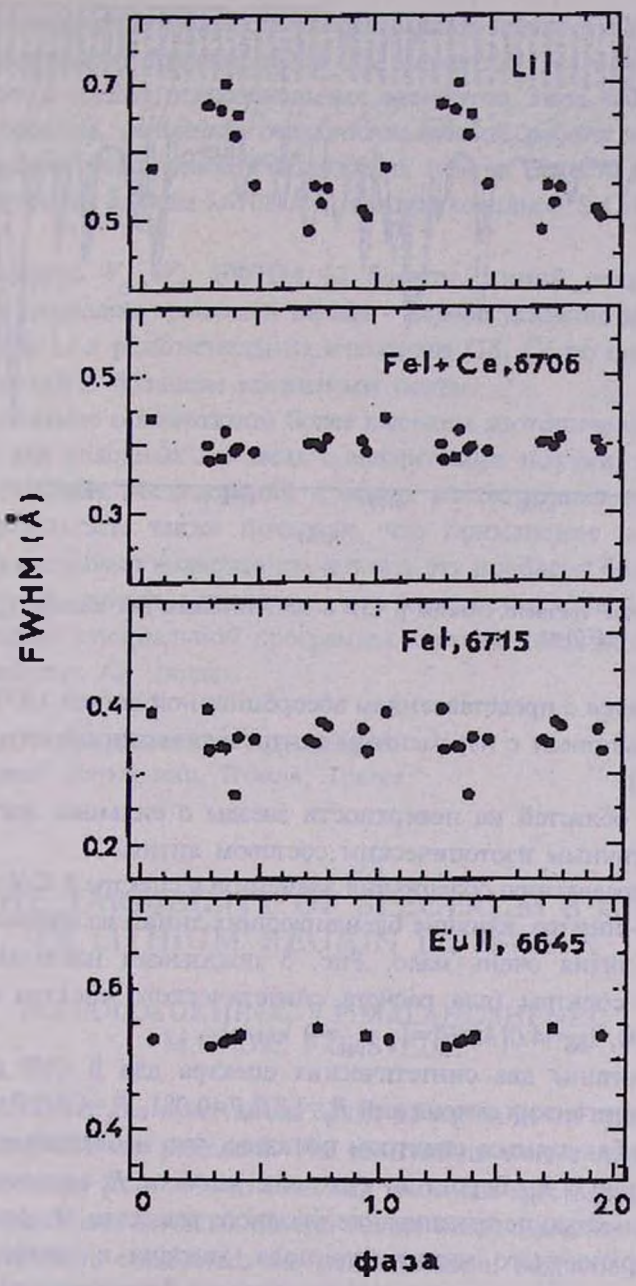

Рис. 4. Результаты измерений полуширин линий FWHM с фазой периода вращения звезды.

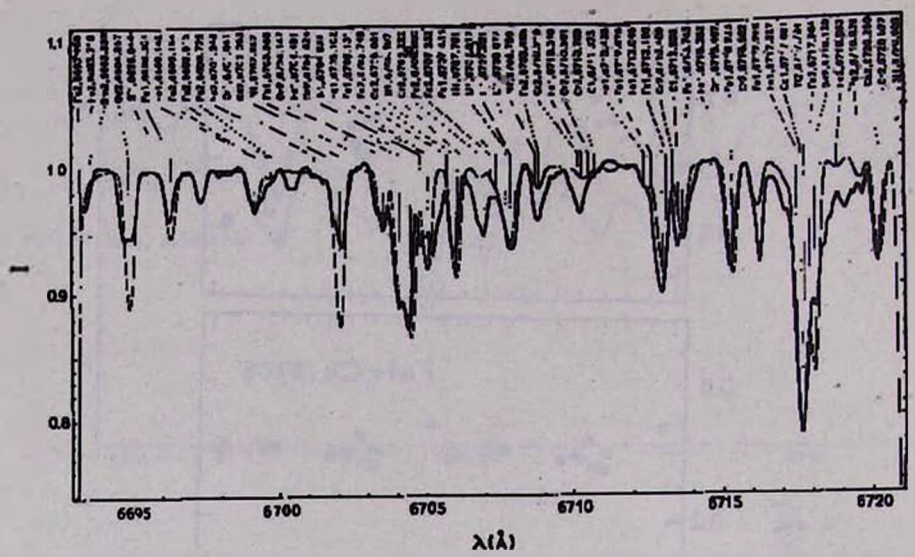

Рис. 5. Сравнение среднего спектра β CrB с синтетическим для модели: T_{eff}=8000°K, lgg=4.0, v_t=2 км/с, [M/H]=1.

хорошо согласуется с представлением абсорбционной детали λ6708 Å как бленды двух компонент с переменным центром тяжести каждого компонента (рис. 2,3).

2. Наличие областей на поверхности звезды с сильным магнитным полем и с различным изотопическим составом лития.

Согласно определению содержания элементов в спектре β CrB методом синтетического спектра, влияние блендирующих линий из списка Куруча [5] на дублет лития очень мало. Рис. 5 показывает наблюдаемый и синтетический спектры (для расчета синтетического спектра выбрана модель T_{eff}=8000, lgg=4.0[M/H]=1, v_{turb}=2 км/с).

Были рассчитаны два синтетических спектра для β CrB для двух различных изотопических отношений $R_1=Li^6/Li^7=0.081$, $R_2=Li^6/Li^7=0.700$[5]. Сравнение с наблюдаемым спектром показало, что наблюдаемая бленда согласуется лучше с R_2. Вероятно, что такое высокое R_2 возможно, если отсутствует полностью перемешивание звездного вещества. В присутствии сильного поверхностного магнитного поля, условия в поверхностных слоях таковы, что возникают условия для реакций "скалывания", причем продукты этих реакций сохраняются на поверхности из-за отсутствия перемешивания.

3. Не исключена возможность блендирования неизвестным элементом (красный компонент бленды λ6708 Å). Вероятнее всего этот элемент принадлежит к группе редкоземельных элементов, типа Gd, Ce.

Таким образом, основным результатом данной работы мы считаем:

Обнаружение переменности положения центра тяжести и структуры профиля литиевой бленды λ6708 Å в спектре холодной SrCrEuAp звезды β CrB.

Переменность V_r ,W_λ, FWHM Li бленды, линий редкоземельных элементов с периодом вращения звезды - первое указание на пятнистое распределение Li и редкоземельных элементов Gd, Ce по поверхности β CrB - Ap звезды с большим магнитным полем.

Предположение о возможном более высоком изотопическом отношении Li^6/Li^7 для холодных Ap звезд с магнитными полями, несомненно требует дальнейших исследований и новых высокоточных наблюдений.

Наши результаты также показали, что применение современных приемников открывает возможность изучать эту проблему более активно. Необходимо объединить усилия тех, кто интересуется этой проблемой для организации специальной программы систематических наблюдений лития в холодных Ap звездах.

Крымская астрофизическая обсерватория.
Департамент астрономии, Италия, Триест

THE VARIABILITY OF SPECTRUM β CrB IN LITHIUM REGION LiI λ6708 Å

N.S.POLOSUKHINA, V.P.MALANUSHENKO
M.HACK, F.CASTELLI

The last results of the observations of the Li region in the spectrum of the binary Ap star β CrB are presented. The observations were carried out at the Crimean Observatory from 1993 to 1995 with the coude spectrograph equipped with CCD detector and $S/N \geq 200$. Several factors which can affect the behavior of the Li blend were considered: the stellar rotation, magnetic field, binary system, isotopic shift Li^6/Li^7, blending by unknown elements. The main result of this paper is the variability of Lithium blend with period of rotation of the star. The variations V_r and FWHM of Li blend is correlated with magnetic field

variations. It is first indication of observing evidence of spotness of β CrB - slowly rotator cool SrCrEu star with large magnetic field. Some lines of other elements: GdII λ6702.10 Å, GdII+CeII λ6704.3 Å, CeII+FeI λ6706.0 Å show this type variations too.

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Hack, R.Faraggiana,* PASP, **75**, 376, 1963.
2. *R.Faraggiana, F.Castelli, M.Floquet* in Proceeding of IAU Coll. No 90, p. 451, 1986.
3. *C.Burkhart, M.Coupry,* Astron. Astrophys, **290**, 197, 1989.
4. *M.Gerbaldi, R.Faraggiana, F.Castelli,* Astron. Astrophys. Suppl., **111**, 1, 1995.
5. *M.Hack, F.Castelli, N.Polosukhina, V.Malanushenko,* Astron. Astrophys. (in press), 1996.
6. *Н.С.Полосухина,* Изв. Крымск. астрофиз. обс., **50**, 57, 1974.
7. *N.Polosukhina, L.Hänni,* Stellar magnetism, The Proceedings of International Meeting "Physics and evolution stars" (Nizhni Arkhyz, October 1991).
8. *N.Polosukhina, L.Lyubimkov,* Memoirs J.A.S. (in press), 1995.
9. *G.Preston,* The Proceedings of the IAU Symposium "Magnetic and Related Stars", p.19, 1967.
10. *G.Wade,* The Proceedings of IAU Symposium No. **176**, p.139, 1995.
11. *P.Nissen, B.Gustaffson, B.Edvardsson, G.Gilmore,* Astron. Astrophys., **285**, 440, 1994.
12. *R.Kurucz,* CD-ROM No.18, 1993.
13. *K.Kamper, H.McAlister, W. Hartkopf,* Astron.J., **100**, 239, 1990.