

УДК 524.35-32

ЗВЁЗДЫ С РАЗЛИЧАЮЩИМИСЯ ВЕЛИЧИНАМИ $v \sin i$, ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПО ЛИНИЯМ Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ И Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$. IV. HD 8837 — ЗВЕЗДА С ОБОЛОЧКОЙ, HD 47964 И HD 183986 — НОВЫЕ ДВОЙНЫЕ¹

© 2013 Ю. Зверко¹, И. Романюк², И. Илиев³,
Д. Кудрявцев², И. Барзова³, Е. Семенко², И. Статева³

¹Татранска Ломница, 133, 05960 Словакия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Институт Астрономии, НАО Рожен, София, 1784 Болгария

Поступила в редакцию 22 мая, 2013; принята в печать 6 августа, 2013

Осевое вращение звезды играет важную роль в ее эволюции, влияет на физические условия в ее атмосфере и на вид ее спектра. Мы проанализировали ПЗС-спектры трех звезд, для которых проекции скорости осевого вращения, полученные по линиям Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ и Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$, значительно отличаются. Мы получили эффективные температуры и ускорения силы тяжести на поверхности, используя опубликованные результаты *uvby β* -фотометрии и вычисленные синтетические спектры. Сравнивая наблюдаемые профили этих двух линий с вычисленными, мы оценили значения $v \sin i$. Мы также получили лучевые скорости методом кросс-корреляции. Известно, что HD 8837 является звездой с околозвездной оболочкой с выраженными узкими абсорбционными ядрами в бальмеровских линиях, а также в сильных линиях металлов; однако, мы не подтверждаем наличие центрального эмиссионного компонента в H β . С помощью спутника Hipparcos было обнаружено, что HD 47964 — двойная звезда. Однако, мы не нашли следов второго компонента на наших спектрах. Основываясь на данных Hipparcos, мы оценили, что другая звезда должна быть звездой главной последовательности спектрального класса A4 с крайне высокой скоростью вращения, что приводит к замыканию любых следов спектральных линий компаньона. HD 183986 известна как тройная звезда. Однако, мы нашли проявление пока не обнаруженного компаньона у компонента HD 183986 A и оценили его как звезду спектрального класса A5 главной последовательности с $v \sin i$ приблизительно 150 км/с.

Ключевые слова: звёзды: химически пекулярные—звёзды: вращение—звёзды: индивидуальные: HD 8837, HD 47964, HD 183986

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье Зверко и др. [1] мы представили список из 24 звезд спектральных классов B7–A0 с классами светимости III–V, для которых измеренные значения проекции скорости вращения на луч зрения значительно различаются в зависимости от того, какие линии в их спектрах были использованы для измерений. В указанной статье и в работе Зверко и др. [2, 3] мы исследовали 11 звезд, две из которых были выявлены как переменные. В настоящей работе мы исследуем спектры еще трех звезд. HD 8837 — звезда с оболочкой, с характерными узкими абсорбционными ядрами в линиях водорода

и железа. По данным Hipparcos HD 47964 является двойной, а HD 183986 — визуальной тройной звездой. В Разделе 2 мы описываем инструменты, применявшиеся в наблюдениях, базы данных, использовавшиеся для вычислений, и метод анализа. В Разделе 3 мы анализируем спектры, а в Разделе 4 приводим результаты.

2. НАБЛЮДЕНИЯ, МЕТОД

Мы получили ПЗС-спектры в Национальной астрономической обсерватории (НАО) в Рожене, Болгария, и в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО), Нижний Архыз, Россия. Спектры НАО с разрешением $R = 22\,000$ были получены с матрицей Photometrics AT200 CCD

¹По спектроскопическим наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН и на 2-м телескопе Болгарской национальной астрономической обсерватории

Таблица 1. Список спектров HD 8837 и измеренные наблюдаемые параметры

| Спектр | HJD | Область | S/N | RV(core), | RV(star), | Примечания |
|--------|-----------|------------------------------|-----|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| | 2450000+ | | | км/с | км/с | |
| MSS | 5075.4050 | Mg II λ 4481 Å | 490 | -2.8 ± 0.5 | -2.8 | Fe II, Mg II λ 4481 Å |
| NAO | 5432.4852 | Mg II λ 4481 Å | 178 | -5.5 ± 1.1 | -5.5 | Fe II, Mg II λ 4481 Å |
| NAO | 5432.4625 | Ca II λ 3933 Å | 77 | -6.1 ± 3.5 | -3.1 ± 0.5 | Ca II |
| NES | 5109.4699 | $\lambda\lambda$ 4800–6200 Å | 114 | -19.7 ± 0.4 | -19.8 ± 3.5 | Fe II, Si II λ 5056 Å |
| NES | | | | -19.4 ± 0.5 | | Na I D1, D2 |
| NES | | | | -20.6 ± 0.1 | | H β |

1024 × 1024 пиксела в третьем порядке куде-спектрографа 2-м телескопа системы Ричи-Кретьена-Куде. Область для Ca II бралась от λ 3898 до λ 3967 Å, а для Mg II — от λ 4447 до λ 4550 Å. Для обработки спектров использовались стандартные процедуры IRAF.² Спектры CAO были получены на 6-м телескопе БТА на эшелле-спектрометре НЭС, оборудованном матрицей ПЗС 2048 × 2048 пикселей [4], с разрешением $R = 43\,000$, в спектральном диапазоне $\lambda\lambda$ 4226–5654 Å, и на Основном звездном спектрографе (ОЗСП), оборудованном зеемановским анализатором и камерой 2048 × 2048 пикселей, с разрешением $R = 15\,000$, в спектральном диапазоне $\lambda\lambda$ 4453–4695 Å. Для обработки спектров CAO использовались пакет программ Zeeman, основанный на наборе процедур ESO MIDAS [5], и пакет REDUCE [6].

Для вычислений синтетических спектров, дефактных профилей линий Ca II λ 3933 Å и Mg II λ 4481 Å и для определения содержания элементов путем сравнения с наблюдаемыми линиями была использована программа Synspec [7, 8].

ЛТР-модели атмосфер были интерполированы по сетке моделей Кастелли и Куруча [9]. Данные по атомным линиям были взяты из базы VALD [10–13]. Значения эффективных температур и ускорений сил тяжести на поверхности были получены с использованием программ UVBYBETA [14] и TEFFLOGG [15] по данным $uvby\beta$, взятым из SIMBAD. Отличия химического содержания, там где они указаны, выражены относительно солнечного химсостава [16].

²IRAF распространяется Национальной обсерваторией оптической астрономии (NOAO), управляемой Ассоциацией университетов для исследований в астрономии (AURA) в рамках совместного соглашения с Национальным научным фондом США (NSF).

Лучевые скорости были определены методом кросс-корреляции [17] с использованием синтетических спектров в качестве шаблона.

3. АНАЛИЗ

3.1. HD 8837

HD 8837 (HR 422, HIP 6823, $V = 6.60$, A0 III, $RV = -21$ км/с, [18]) является звездой с оболочкой и с *возможной* H β эмиссией [19]. Яшек и др. [20] отметили ядра в линиях H β –H14, Ca II, Fe II, и Ti II. Хьюб [21] измерил шесть значений лучевой скорости в пределах от -8 до $+6$ км/с, а Левато и др. [22] получили лучевые скорости от -10.9 до $+1.9$ км/с для разных групп линий на одном спектре. Палмер и др. [23] приводят $v \sin i = 135$ км/с для линии Ca II на λ 3933 Å, а Вольф и Престон [24] получили $v \sin i = 35$ км/с по линии Mg II на λ 4481 Å. Уесуги и Фукуда [25] приводят $v \sin i = 95$ км/с.

Из набора $uvby\beta$ -индексов, приведенных в SIMBAD, мы получили $T_{\text{eff}} = 10\,720$ К и $\log g = 2.92$, для которых по сетке Кастелли и Куруча [9] была интерполирована модель атмосферы и вычислен синтетический спектр.

Имеющиеся спектрограммы приведены в Таблице 1. Сравнение теоретического спектра с наблюдаемым показано на Рис. 1а, где $v \sin i = 255$ км/с лучше всего соответствует линии Mg II на λ 4481 Å. Чтобы достичь соответствия между наблюдаемыми и синтетическими профилями линии Mg II, нам нужно или увеличить значение микротурбулентной скорости до примерно 3.5 км/с, или увеличить величину содержания магния в пять раз, как в случае на Рис. 1а. На Рис. 1б и 1с также показан синтетический спектр для увеличенного значения микротурбулентности. В этом случае линии поглощения значительно глубже, что в

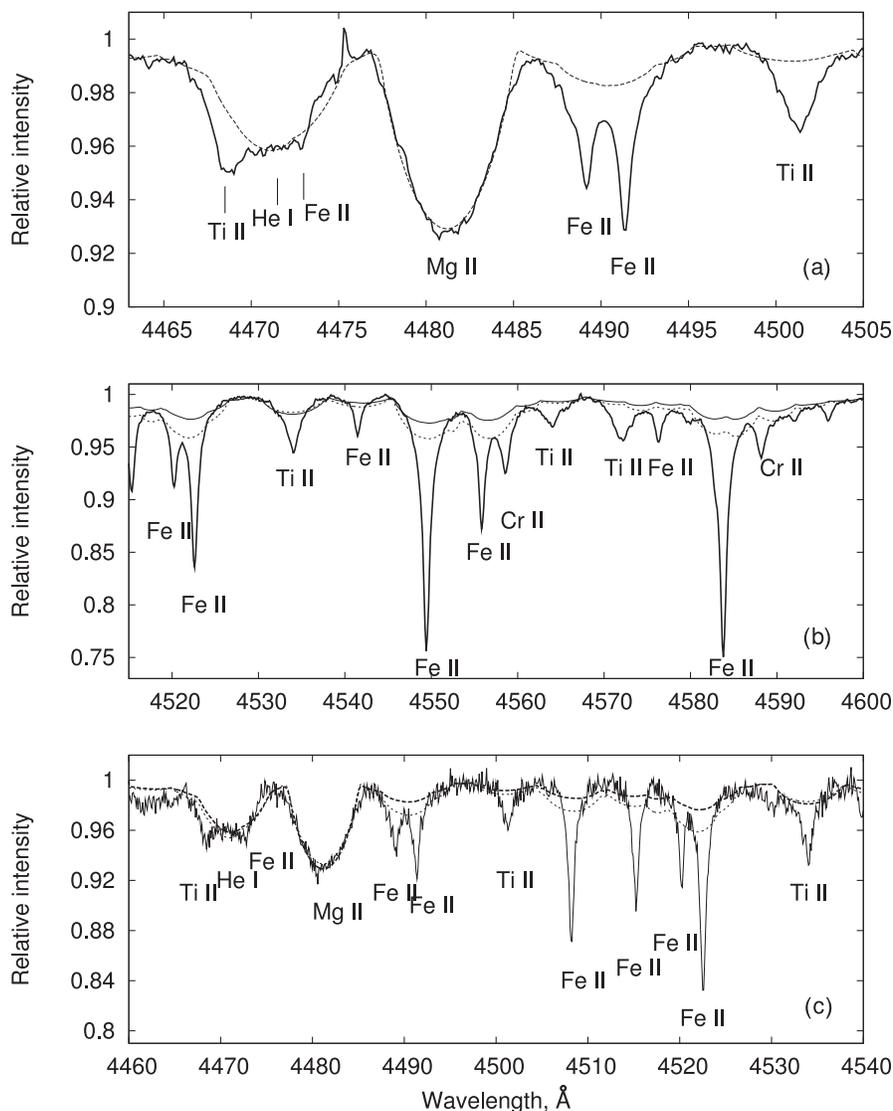


Рис. 1. Спектр HD 8837. (а) Спектр ОЗСП в области $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$, $v \sin i = 255 \text{ км/с}$; толстая линия — наблюдаемый спектр, штриховая — синтетический. Содержание магния увеличено в пять раз. На нижних панелях показано сравнение синтетических спектров для двух значений микротурбулентной скорости, $\zeta = 0 \text{ км/с}$ (тонкая линия) и $\zeta = 3.5 \text{ км/с}$ (пунктир), со спектром ОЗСП (b) и со спектром НАО (c).

основном приводит к разногласию в крыльях более сильных линий. Однако, нельзя забывать о возможности того, что переналожение линий вследствие вращения приводит к подавлению континуума, что не может быть в полной мере учтено при обработке спектрограмм. Это хорошо продемонстрировано на Рис. 1с, где спектр НАО в области Mg , будучи короче и с более низким отношением S/N , хуже аппроксимируется обоими синтетическими спектрами, что наиболее выражено в основном в области между $\lambda 4505$ и $\lambda 4540 \text{ \AA}$.

Можно различить три типа профилей спектральных линий на примере ОЗСП спектра:

- 1) *ядра*, как у Fe II около $\lambda 4490 \text{ \AA}$, характерные для спектров звезд с оболочками;
- 2) *нормальные* фотосферные профили, уширенные вращением звезды, как линия Mg II ;
- 3) *комбинированные*, как профиль Ti II на $\lambda 4502 \text{ \AA}$, с пиком, но без *ядра*, непохожие, таким образом, на предыдущие два типа.

Также примечательно несоответствие между наблюдаемым и вычисленным профилями блендированной спектральной детали около линии гелия на $\lambda 4471 \text{ \AA}$. С другой стороны, линия нейтрального

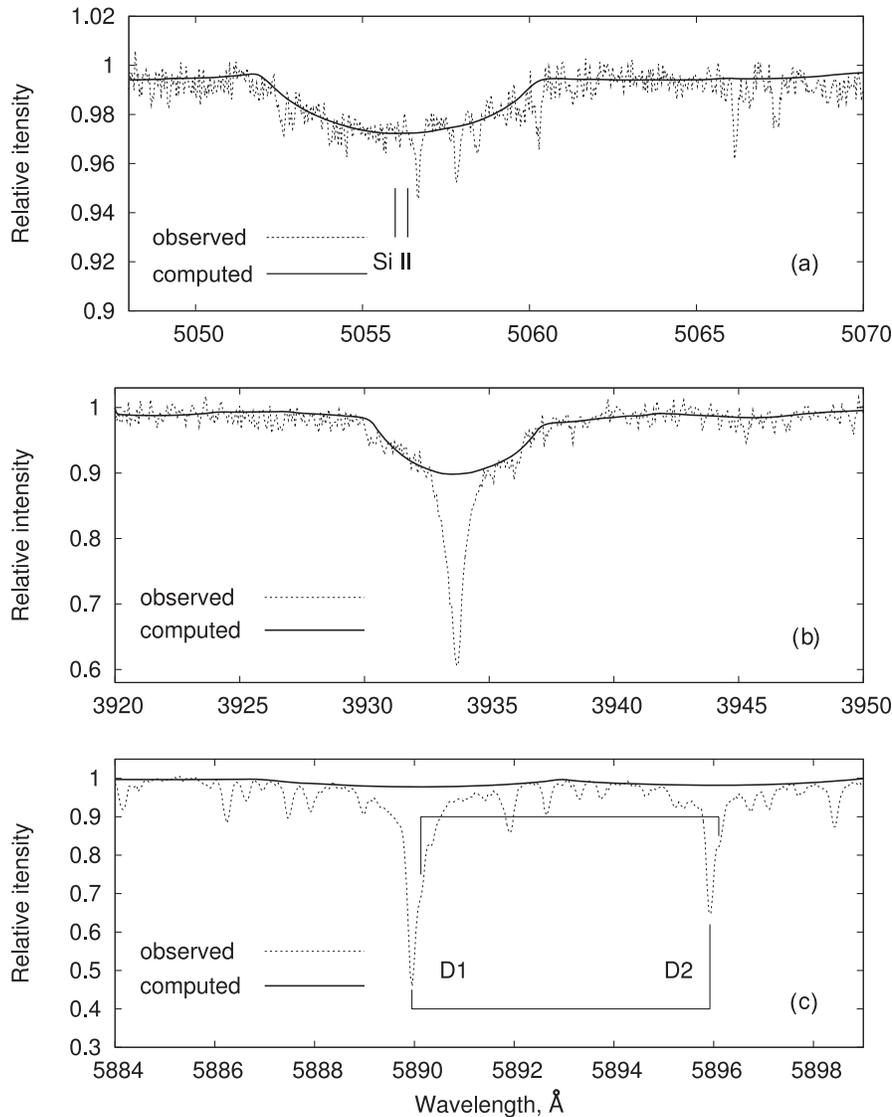


Рис. 2. Хорошо выраженные фотосферные линии в спектре HD 8837: (a) Si II $\lambda 5056 \text{ \AA}$, $v \sin i = 245 \text{ км/с}$; (b) Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$, $v \sin i = 255 \text{ км/с}$; (c) изгиб в длинноволновом крыле линий натрия D1 и D2.

гелия на $\lambda 5875 \text{ \AA}$ отсутствует на нашем спектре НЭС.

Помимо Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$, на имеющихся у нас спектрах присутствует еще одна чисто фотосферная линия, а именно, Si II на $\lambda 5056 \text{ \AA}$ (Рис. 2a). Еще одна хорошо обозначенная фотосферная линия — Ca II на $\lambda 3933 \text{ \AA}$, с ядром (Рис. 2b). Величина проекции скорости вращения $v \sin i = 255 \text{ км/с}$, полученная по линии магния, подходит также для профиля линии Ca II, в то время как для линии Si II подходит $v \sin i = 245 \text{ км/с}$. Что касается глубины линий и отношения S/N , то разница не слишком велика. Для линии Ca II была проведена коррекция содержания в 2.3 раза.

Наиболее отличительная особенность в спектре

этой звезды — это абсорбционные ядра, в основном линий Fe II. Кроме них, необычные ядра присутствуют в H β , Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ и в линиях Na I D1, D2. Однако, мы не обнаружили эмиссию в H β , упомянутую Эггеном [19], на наших спектрах НЭС. При этом, тщательное изучение линий натрия выявило иное их происхождение. Несмотря на то что они сравнимы по глубине с линиями Fe II, линии натрия значительно уже. В то время как у линий железа полуширина составляет примерно $\text{FWHM} \approx 0.9 \text{ \AA}$, полуширина линии натрия равна приблизительно 0.2 \AA , что соответствует разрешению спектра НЭС на этой длине волны. На Рис. 2c показана часть спектра вокруг линий натрия. Помимо узости этих двух линий, в длинноволновой

Таблица 2. Список спектров HD 47964 и измеренные наблюдаемые параметры

| Спектр | HJD | Область | S/N | EW(int), mÅ | EW [34], mÅ | RV(int) км/с | RV(star), км/с | Примечания |
|--------|-----------|------------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| | 2450000+ | | | | | | | |
| MSS | 4845.4180 | Mg II λ 4481 Å | 1100 | | | | 12.8 ± 0.2 | |
| NAO | 4843.4968 | Mg II λ 4481 Å | 170 | | | | 0.6 ± 0.3 | |
| | 6320.4984 | Mg II λ 4481 Å | 158 | | | | 19.6 ± 1.3 | |
| NAO | 4843.5366 | Ca II λ 3933 Å | 91 | 21 | 23.1 | 8 | 5.2 ± 0.9 | RV(λ 3933 Å) |
| | 6320.5298 | Ca II λ 3933 Å | 65 | 24 | | 18 | 16.2 ± 1.0 | RV(λ 3933 Å) |
| | 6322.3321 | Ca II λ 3933 Å | 73 | 18 | | 18 | 16.7 ± 0.8 | RV(λ 3933 Å) |
| NAO | 5941.3959 | D1 5890 Å A/B | 169 | 59/76 | 125.9 | 6/18 | 13.5 ± 1.9 | RV(λ 5875 Å) |
| | | D2 5896 Å A/B | | 32/49 | 69.5 | 6/17 | | |
| | 6320.4709 | D1 5890 Å A/B | 166 | 56/72 | | 8/20 | 20.3 ± 2.0 | RV(λ 5875 Å) |
| | | D2 5896 Å A/B | | 35/51 | | 9/20 | | |

части профилей также присутствует явный изгиб на расстоянии примерно 10 км/с. Узкие полуширины FWHM свидетельствуют о межзвездном происхождении этих линий, что также подтверждается отношением их эквивалентных ширин. Согласно критерию Паунзена и др. [35], из отношения эквивалентных ширин этих двух линий, которое составляет $EW(D1)/EW(D2) \approx 2$, можно заключить, что линии образуются в оптически тонкой, т.е. межзвездной, среде.

Величины лучевых скоростей, представленные в Таблице 1, определялись методом кросс-корреляции. Значения $RV(\text{star})$ относятся к “фото-сферным” линиям Mg II, Si II и Ca II, а $RV(\text{core})$ — к ядрам линий Fe II, Ca II и H β . Принимая во внимание происхождение линий натрия, совпадение лучевой скорости, полученной по линиям D1 и D2 с теми, что получены из Si II λ 5056 Å и H β , чисто случайно.

3.2. HD 47964

HD 47964 (HR 2461, HIP 31992A, $V = 5.79$, B8 III, [18]). Значения проекции скорости вращения $v \sin i$, полученные по линиям Ca II λ 3933 Å и Mg II λ 4481 Å, для этой звезды различаются. Палмер и др. [23] приводят $v \sin i = 95$ км/с для линии кальция, а Вольф и Престон [24] дают $v \sin i = 50$ км/с для линии магния. Мы также нашли $v \sin i = 45$ км/с у Строма и др. [27], 49 км/с у Лефевра и др. [28], 63 км/с у Паунзена и др. [26] и 54 км/с у Ниёмчуры и др. [29]. Имеющиеся у

нас спектры приведены в Таблице 2. Два зеемановских спектра были последовательно получены на ОЗСП, они не показывают значительного магнитного поля, поэтому их можно сложить с результирующим $S/N = 1100$.

В базе SIMBAD приводятся три набора индексов *wby* и один индекс H β , откуда мы получили значения T_{eff} в диапазоне 12 330–12 400 К и $\log g$ в диапазоне 3.42–3.44. Кроме того, Паунзен и др. [26] получили $T_{\text{eff}} = 12 418 \pm 100$ К с помощью Δa фотометрии, Ниёмчура и др. [29] приводят $T_{\text{eff}} = 12 300$ К и $\log g = 3.2$ по бальмеровским линиям, а Лефевр и др. [28] получили $T_{\text{eff}} = 11 500 \pm 1000$ К, пользуясь автоматизированным методом подгонки линий гелия и кремния, и $\log g = 3.01 \pm 0.2$ по линиям Бальмера с поправкой на центробежные силы.

Мы использовали модель с $T_{\text{eff}} = 12 360$ К, $\log g = 3.43$, интерполированную по сетке моделей атмосфер Кастелли и Куруча [9]. Вычисленные спектры с нулевой микротурбулентностью хорошо соответствуют наблюдаемым спектрам НАО и спектрам ОЗСП в области Mg II. Содержание элементов, идентифицированных в области Mg II, было скорректировано в 0.2–8 раз. Линии углерода, алюминия и марганца были найдены только в области Ca II. Проекция скорости вращения $v \sin i = 60$ км/с. Тогда как три из четырех определений температуры и силы тяжести не сильно различаются, величина, полученная Лефевром и др. [28], значительно ниже. Таким образом, мы вычислили спектры для $T_{\text{eff}} = 11 500$ К, $\log g = 3.0$ и $\xi = 0$ км/с, и также были приняты схожие коррекции химсостава. В Таблице 3 мы приводим

Таблица 3. Химический состав HD 47964 относительно солнечных содержаний, $\log(N/N_{\odot}) = 12$

| Элемент | $T_{\text{eff}} = 12\,360$, | $T_{\text{eff}} = 11\,500$, | Ниемчура и др. [29] | Солнечные | Примечания |
|---------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------|--|
| | $\log g = 3.43$ | $\log g = 3.00$ | | | |
| He | -0.07 | +0.11 | +0.03 | 10.93 | |
| C | -0.13 | -0.13 | -0.26 | 8.39 | C II $\lambda\lambda$ 3918.968, 3920.681 Å |
| N | -0.47 | -0.47 | | 7.78 | |
| O | +0.16 | +0.16 | +0.17 | 8.66 | |
| Mg | +0.05 | 0.00 | | | |
| Al | -0.17 | -0.52 | | 6.37 | Al II λ 3900.675 Å |
| Si | -0.57 | -0.52 | -0.50 | 7.51 | |
| P | +0.07 | +0.07 | | 5.36 | |
| S | -0.54 | -1.00 | -0.16 | 7.14 | |
| Ar | 0.00 | 0.00 | | 6.40 | |
| Ca | -0.10 | 0.00 | +0.28 | 6.31 | |
| Ti | +0.92 | +0.68 | +0.43 | 4.90 | |
| Cr | +0.05 | -0.22 | +0.20 | 5.64 | |
| Mn | +1.1: | +1.1: | +0.32 | 5.39 | Mn II $\lambda\lambda$ 3917.318, 3943.598, 3943.858 Å |
| Fe | -0.05 | -0.22 | -0.36 | 7.45 | |

различия в содержании элементов относительно солнечного содержания, а также результаты Ниемчуры и др. [29]. Дефицит и сверхобилие химических элементов в нашей работе и в работе [29] согласуются. Солнечные значения взяты из работы Гревесе и др. [30].

3.2.1. Доминирующие линии

Диапазоны длин волн на всех имеющихся у нас спектрах короткие, самый длинный, полученный на ОЗСП, покрывает участок длиной в 240 Å. В спектрах можно найти всего несколько сильных линий, таких как Ca II λ 3933 Å, He I 4471 и 5875 Å, Mg II λ 4481 Å и Fe II 4549 Å. Есть глубокие узкие линии D1 и D2 межзвездного происхождения.

На Рис. 3а мы сравниваем синтетический спектр, вычисленный для модели $T_{\text{eff}} = 12\,360$ К, $\log g = 3.43$, с наблюдаемым спектром в области линии Mg II λ 4481 Å. Содержания гелия и магния были немного скорректированы: в 0.9 и 1.4 раза соответственно; $v \sin i = 58$ км/с. В то время как слабые линии Fe II совпадают идеально, нельзя

не заметить дополнительные абсорбции между линиями Ti II и He I и в крыльях линии Mg II. Более того, детальное изучение профиля линии Mg II λ 4481 Å показывает несоответствие вычисленного и наблюдаемого профилей, что показано на Рис. 3б. Тогда как в центре вычисленный профиль совпадает с наблюдаемым, на расстоянии 0.5 Å от центральной длины волны он глубже, а затем пересекает наблюдаемый профиль около континуума. Дополнительная абсорбция в крыльях обсуждается в следующей главе.

Линия He I λ 5875 Å, наблюдаемая в спектре НАО, показана на Рис. 4а в сравнении с синтетической, вычисленной с немного скорректированным значением $v \sin i = 52$ км/с.

Однако, наиболее любопытен профиль линии Ca II λ 3933 Å (Рис. 4б). По глубине линия сравнима с Mg II λ 4481 Å, но она несопоставимо уже в ядре. Более того, пик сдвинут относительно центра линии Ca II λ 3933 Å.

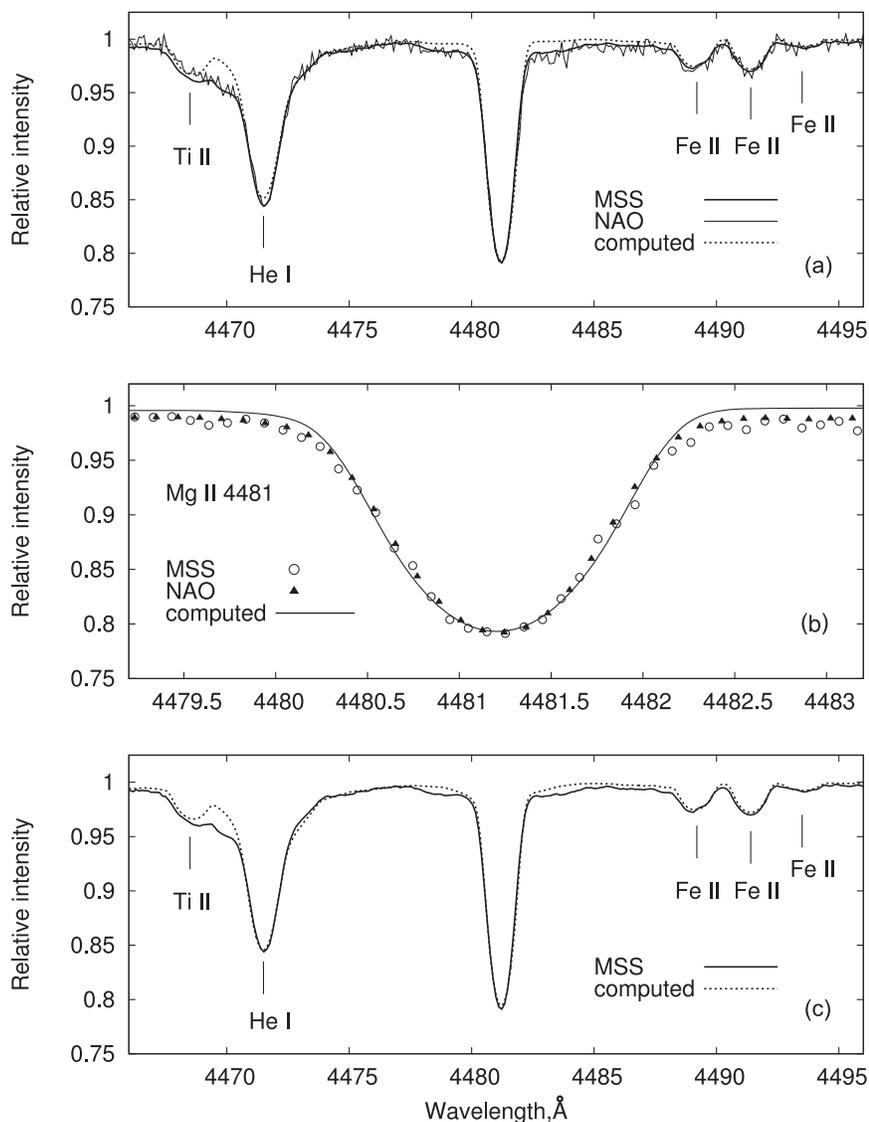


Рис. 3. Линия $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$ в спектре HD 47964: (a) сравнение двух наблюдаемых спектров с синтетическим при $T_{\text{eff}} = 12360 \text{ K}$, $\log g = 3.43$; (b) $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$ в деталях; (c) аппроксимация спектра ОЗСП составным спектром (рассчитанным), подробнее см. в тексте.

3.2.2. Двойственность

С помощью спутника Hipparcos было обнаружено, что HD 47964 — новая астрометрическая двойная с компонентами, удаленными на $0''.2$ по позиционному углу 312° [31, 32]. Согласно [31], у компонентов одинаковое собственное движение, а разность блеска составляет $\Delta V_T = 2.8$. Если эти две звезды представляют собой физическую пару, то с такой разностью блеска отношение вклада компонентов в V -диапазоне должно быть больше или равно $0.93 : 0.07$ в зависимости от разности цвета компонентов. Принимая во внимание отношение $S/N = 1100$ спектра ОЗСП, некоторые признаки наличия второй звезды должны быть заметны в

спектре. Мы попытались выявить их путем суммирования теоретического спектра звезды В8 III со спектром звезды другого спектрального типа.

Для оценки спектрального класса другой звезды мы должны учесть светимость звезды В8 III, поэтому нельзя просто использовать разность блеска, как в случае, если бы обе звезды принадлежали главной последовательности. Разность блеска дает отношение их светимостей 13.18. Программа UVBYBETA дает $R = 3.74 R_\odot$ для HD 47964. Пользуясь уравнением

$$\begin{aligned} \log 13.18 &= \log(L^A/L^B) \\ &= 2 \log(R^A/R^B) + 4 \log(T_{\text{eff}}^A/T_{\text{eff}}^B), \end{aligned} \quad (1)$$

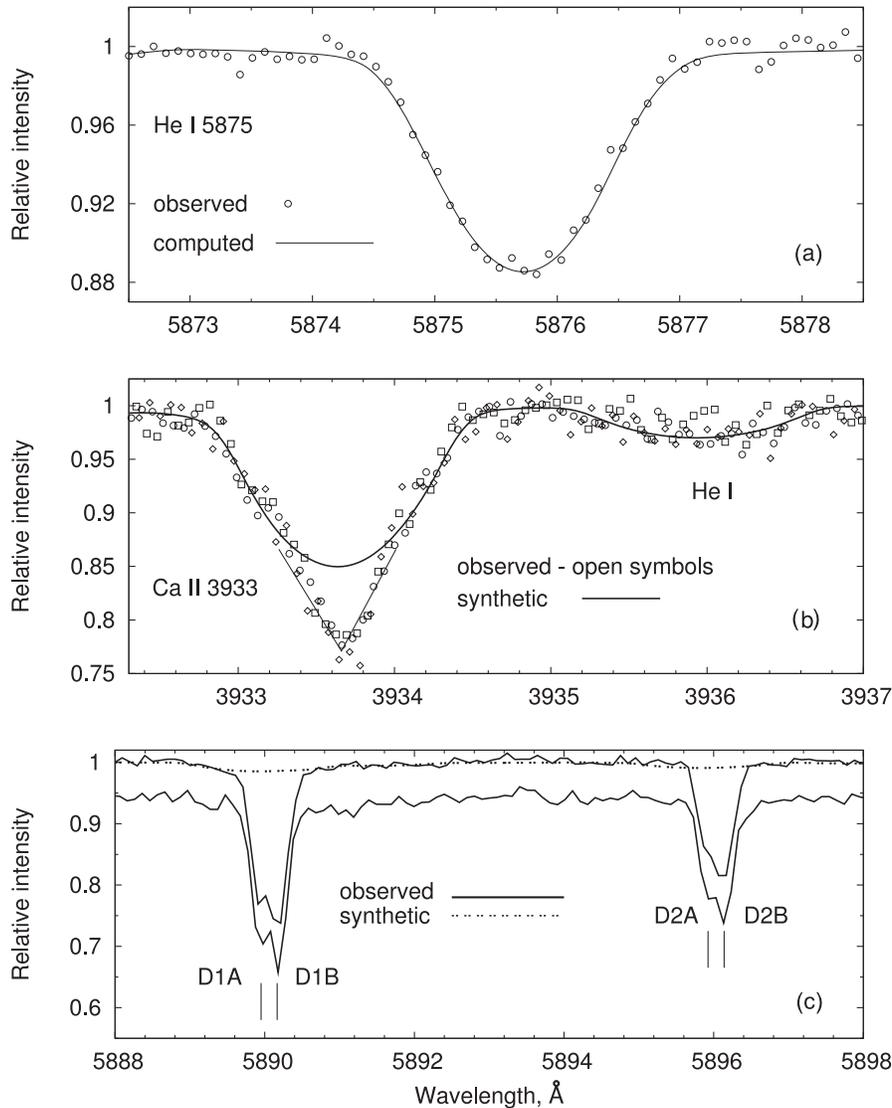


Рис. 4. HD 47964. (а) Линия He I на λ 5875 Å. Вычисленный спектр составлен из спектров B8 III и A4 V. Здесь $v \sin i$ для спектра B8 III составляет 52 км/с. (б) Линия Ca II на λ 3933 Å. Синтетический спектр — это спектр B8 III уширенный на $v \sin i = 56$ км/с. Три наблюдаемых спектра смещены на соответствующую величину лучевой скорости звезды. Треугольник схематически показывает межзвездную абсорбцию. (в) Линии натрия D1 и D2. Расщепление межзвездных абсорбционных линий четко видно на обоих спектрах. Для наглядности второй спектр смещен по ординате на 0.05. Спектры смещены на величину лучевой скорости компонента А.

где индексы А и В соответствуют звезде спектрального класса B8 III и второй звезде соответственно, получим комбинацию из радиуса и эффективной температуры для второй звезды (принадлежащей главной последовательности): $R = 1.9 R_{\odot}$ и $T_{\text{eff}} = 8400$ К, что соответствует спектральному классу A4 V. Согласно калибровке спектральных классов МК [33], для поверхностной силы тяжести звезды A4 главной последовательности получим $\log g = 4.26$.

С этими параметрами, солнечным содержанием элементов и несколькими значениями $v \sin i$ вплоть

до 150 км/с мы вычислили спектр A4 V и просуммировали его с вычисленным спектром яркого компонента, используя соотношение 0.93 : 0.07. Большинство линий в спектре B8 III принадлежат однократно ионизованным металлам, а в спектре A4 V также присутствуют линии нейтральных металлов, которые должны проявляться в составном спектре. Однако, две блендированные линии Ni I и Fe I на λ 4459.1 Å, а также линии Fe I на λ 4476.1 Å и Ca I на λ 4585.9 Å, возникающие в спектре A4 V и невидимые в спектре B8 III, отсутствуют в наблюдаемой области Mg II. Это, одна-

ко, не противоречит наблюдениям, если принять значение $v \sin i \approx 150$ км/с, полученное Ройером и др. [38] для звезд А4–А6 главной последовательности. С таким значением проекции скорости вращения и предполагаемым отношением светимостей компонентов умеренно сильные и слабые линии исчезают. С другой стороны, дополнительная абсорбция в крыльях линии Mg II в наблюдаемом спектре может быть вызвана вкладом от сильной и широкой линии Mg II, возникающей в быстро вращающемся компаньоне А4 V. Для пробы мы рассчитали спектр А4 V с $v \sin i = 150$ км/с; однако, даже со спекулятивно сильно завышенным (в 10 раз) содержанием магния нам не удалось добиться согласия между составным В8 III + А4 V и наблюдаемым спектрами (Рис. 3с). Более того, дополнительная абсорбция гораздо шире, чем в случае с $v \sin i \approx 150$ км/с. Еще больше против наличия спектра А4 V в наблюдаемом спектре свидетельствует линия кальция на $\lambda 3933$ Å. Эта линия очень сильна в спектре звезды А4 V, и даже если звезда вращается со скоростью $v \sin i = 150$ км/с, ее центральная глубина достигает почти 0.4 в относительной интенсивности. При суммировании со спектром В8 III для получения составного спектра это дает заметные крылья, которых нет в наблюдаемом спектре. Это несоответствие остается в силе даже если предположить, что спектр В8 более синий, чем спектр А4, что дает отношение светимостей 0.96 : 0.04. Итак, мы не нашли следов звезды, обнаруженной спутником Hipparcos, в имеющихся у нас наблюдениях.

3.2.3. Межзвездные линии

И все же самые глубокие линии поглощения — это линии натрия D1 на 5889.951 Å и D2 на 5895.924 Å (Рис. 4с). У обеих линий имеется более слабая составляющая на более коротких волнах, а линия D1 очевидно раздвоена, что предполагает наличие двух разных межзвездных источников их возникновения. Мы схематически нарисовали треугольники с полушириной, соответствующей разрешению спектра (0.27 Å), аппроксимирующие наблюдаемый профиль D1. Используя эти треугольники, мы измерили эквивалентные ширины линий и оценили лучевые скорости компонентов. Результаты представлены в Таблице 2, где “А/В” в колонке 3 относятся к значениям, разделенным косой чертой в колонках 5 и 7.

Согласно Паунзену и др. [26], отношение $EW(D1)/EW(D2) = 2$ указывает на межзвездное происхождение этих линий. Таким образом, усредненные отношения 1.7 и 1.5 для систем А и В предполагают межзвездное происхождение этих

абсорбций в спектре HD 47964. Их относительные лучевые скорости различаются примерно на 11 км/с.

На Рис. 4b мы приводим линию Ca II на $\lambda 3933$ Å. Наблюдаемый профиль этой линии в своей широкой верхней части совпадает с теоретическим, уширенным на величину проекции скорости вращения (примерно 56 км/с). Центральная часть хорошо описывается треугольником. И хотя явного раздвоения не наблюдается из-за значительно меньшего отношения S/N , полуширина треугольника $FWHM \approx 0.35$ Å соответствует разности лучевых скоростей компонентов, упомянутой выше, и разрешению 0.18 Å в данной спектральной области. Другой критерий, а именно отношение $EW(Ca \lambda 3933 \text{ Å})/EW(D1+D2) = 0.2$, также подтверждает межзвездное происхождение рассматриваемых линий.

HD 47964 наблюдалась Уэлшем и др. [34]. Они не упоминают возможную двухкомпонентную природу этих межзвездных линий. Однако, наши измерения совокупных эквивалентных ширин этих линий,

$$EW(D1 A) + EW(D1 B) = 135 \text{ mÅ},$$

$$EW(D2 A) + EW(D2 B) = 81 \text{ mÅ},$$

$$EW(Ca II \lambda 3933 \text{ Å}) = 34 \text{ mÅ},$$

учитывая точность нашей оценки, согласуются с измерениями Уэлша и др. [34], а именно,

$$EW(D1) = 125.9 \text{ mÅ},$$

$$EW(D2) = 69.5 \text{ mÅ},$$

$$EW(Ca II \lambda 3933 \text{ Å}) = 23.1 \text{ mÅ}.$$

В то время как значения лучевой скорости звезды в области Mg II $\lambda 4481$ Å, полученные по многим умеренно сильным, слабым и очень слабым линиям, четко определены благодаря высоким отношениям S/N , значения в областях Ca II и D1, D2 из-за отсутствия спектральных линий получены только по двум доминирующим линиям Ca II $\lambda 3933$ Å и He I $\lambda 5875$ Å (Таблица 2).

3.3. HD 183986

HD 183986 (HR 7419, ADS 12545A, HIP 95953, $V = 6.25$, В9.5 III [18]) является самым ярким компонентом визуальной тройной звезды. Компоненты В и С слабее на 13^m9 и 13^m5 и удалены на $22''27$ и $27''95$ от компонента А соответственно [36]. В SIMBAD приводятся шесть значений переменной

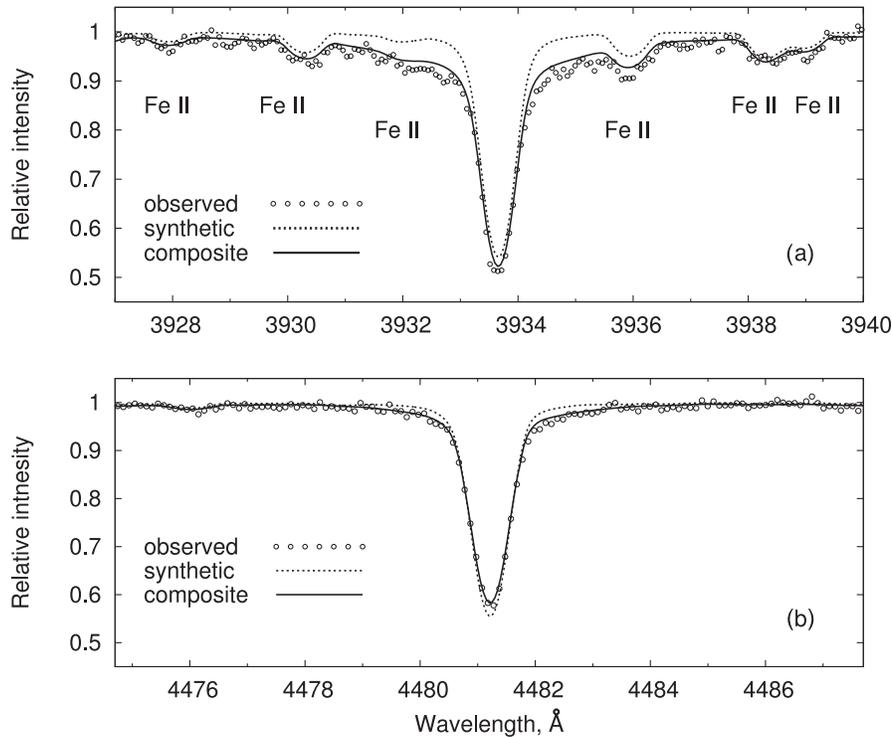


Рис. 5. Наблюдаемые спектры HD 183986 в областях линий Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ и Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ и их аппроксимации теоретическими спектрами, составленными как спектры B9.5 III + A5 V, уширенными на $v \sin i = 30$ и 150 км/с .

лучевой скорости в диапазоне от 1.3 до 19 км/с. Измеренные проекции скорости вращения простираются от 20 км/с [37] до 100 км/с [23]. Хоффлейт и Уоррен [18] приводят 65 км/с для линии Ca II на $\lambda 3933 \text{ \AA}$, Вольф и Престон [24] определили 30 км/с для линии Mg II на $\lambda 4481 \text{ \AA}$.

В базе SIMBAD представлены два идентичных набора *uvby*-индексов и четыре значения $H\beta$. С помощью программ UVBYBETA и TEFFLOG мы получили $T_{\text{eff}} = 10\,600 \text{ K}$, $\log g = 3.65$ и, пользуясь этими параметрами, интерполировали модель по сетке [9]. Синтетический спектр был рассчитан для нулевой микротурбулентной скорости, солнечного содержания элементов и $v \sin i = 30 \text{ км/с}$. На Рис. 5а показана часть спектра около линии Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$. Показан наблюдаемый спектр НАО, который, хотя и с меньшим S/N , имеет более высокое разрешение. Профиль линии кальция на синтетическом спектре очень хорошо аппроксимирует наблюдаемый в пределах ядра; однако, он не соответствует наблюдаемому профилю в крыльях. То же самое верно для спектра в области Mg $\lambda 4481 \text{ \AA}$ (Рис. 5б). В этом рисунке предполагается, что на основной спектр накладываются более широкие линии другой звезды. Широкие крылья линии кальция указывают на более холодную звезду: по мере продвижения вниз вдоль главной

последовательности линия Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ становится сильнее, а линия магния Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ — нет, поэтому значение $v \sin i$ второй звезды должно быть достаточно высоким, чтобы уширить крылья линии магния в той же степени, что и в случае линии кальция. Мы попробовали спектр с $T_{\text{eff}} = 8200 \text{ K}$, $\log g = 4.2$, что соответствует звезде на главной последовательности в середине спектрального класса А, используя нулевую микротурбулентность, солнечное содержание и $v \sin i = 150 \text{ км/с}$. Это значение проекции скорости вращения подходит для звезды середины класса А главной последовательности, так как согласно Ройеру и др. [38] для звезд главной последовательности

Таблица 4. Список спектров HD 183986 и измеренные наблюдаемые параметры

| Спектр | HJD | Область | S/N | RV(star) |
|--------|-----------|--|-------|----------------|
| | 2450000+ | | | км/с |
| MSS | 5021.3264 | Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ | 640 | 7.4 ± 0.2 |
| NAO | 5468.2364 | Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ | 178 | -6.3 ± 0.2 |
| NAO | 5468.2751 | Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ | 75 | -6.2 ± 0.3 |
| NES | 5109.2993 | $\lambda\lambda 4800\text{--}6200 \text{ \AA}$ | 114 | 22.1 ± 0.3 |

Таблица 5. Сводка полученных результатов

| Звезда | $v \sin i$, км/с | | | | Примечания |
|-----------|-------------------|------|---------------|--------|---|
| | [23] | [24] | данная работа | другие | |
| HD 8837 | 135 | 35 | 245–255 | 95 | нет эмиссии в $H\beta$, межзвездные линии раздвоены |
| HD 47964 | 95 | 50 | 52–58 | 45–63 | двойная Hipparcos, не обнаружена в наших спектрах B8 III+A4 V |
| HD 183986 | 100 | 30 | 30 | 20–65 | новая SB2, B9.5 III+A5 V |

класса A4–A6 $v \sin i = 144$ км/с с дисперсией ± 56 км/с. Из большого количества звезд A5 V в Каталоге ярких звезд [18] мы выбрали HR 3662 как пример с $v \sin i = 157$ км/с. С помощью программы UVBYBETA и индексов $uvby\beta$, приведенных в базе SIMBAD, мы получили $M_V = 2.17$ для HR 3662 и $M_V = 0.22$ для HD 183986, то есть $\Delta M_V = 1.95$. Для оценки разности блеска в U -диапазоне для линии Ca II $\lambda 3933$ Å и в B -диапазоне для линии Mg II $\lambda 4481$ Å мы используем индексы UBV , а именно, $(U - B) = 0.09$, $(B - V) = 0.19$ для HD 3662 и $(U - B) = -0.12$, $(B - V) = -0.035$ для HD 183986 (SIMBAD). Тогда разность блеска в области U равна $\Delta M_{UV} = \Delta M_V + \Delta(U - V) = 1.95 + 0.435 = 2.385$, что приводит к отношению светимостей $0.9 : 0.1$. Для области B мы аналогично получаем $\Delta M_{BV} = 2.26$, из чего следует отношение светимостей $0.89 : 0.11$. После суммирования этих двух синтетических спектров для каждой из двух линий, используя соответствующее отношение светимостей и нулевые относительные лучевые скорости, мы получили теоретический спектр, отмеченный как “composite” на Рис. 5а и 5б. Его соответствие наблюдаемому спектру удовлетворительно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали три звезды из нашего списка (Зверко и др. [1]), для которых значения проекции скорости вращения, определенные по линиям Ca II на $\lambda 3933$ Å и Mg II на $\lambda 4481$ Å, расходятся. Мы определили эффективные температуры и поверхностные силы тяжести, пользуясь опубликованными данными $uvby\beta$ фотометрии и, где необходимо, уточнили значения химического состава. Сравнивая теоретические и наблюдаемые профили доминирующих линий в их спектрах, мы оценили значения проекции скорости вращения $v \sin i$. Мы также использовали наши спектры для определения лучевых скоростей этих звезд. В Таблице 5 мы приводим результаты нашего исследования.

Одна из звезд, HD 8837, является звездой с оболочкой, для которой мы не подтверждаем найденную ранее эмиссию в $H\beta$. Узкие линии натрия

D1 и D2 имеют межзвездное происхождение, а искривление в их красных крыльях предполагает наличие двух систем межзвездных облаков, расположенных в направлении на эту звезду. Мы сделали три оценки лучевой скорости в диапазоне примерно от -3 до -20 км/с, связанные с тремя датами наблюдений. Сравнивая профили линий, возникающих в фотосфере, мы получили $v \sin i \approx 250$ км/с, что значительно выше представленных ранее значений. Переменность лучевой скорости и эпизодическое появление эмиссии в $H\beta$ указывают на некоего рода активность в системе HD 8837.

Двойственность HD 47964, хотя и была обнаружена спутником Hipparcos, не подтверждена спектроскопически в наших наблюдениях. Следуя данным Hipparcos, мы оценили, что компаньон — звезда главной последовательности A4. Отсутствие следов ее спектра в наших наблюдениях может указывать на возможную крайне высокую проекцию скорости вращения, которая уширяет линии компаньона до крайне малых глубин. Однако, нельзя исключить, что объект — широкая затменная двойная, которая была в фазе покрытия во время нашего наблюдения. Мы нашли раздвоенные межзвездные линии натрия D1 и D2 и асимметричный межзвездный компонент линии Ca II $\lambda 3933$ Å. Проекция скорости вращения составляет около 55 км/с.

HD 183986 — новая двойная SB2, у которой убедительно видны следы спектра компаньона в широких крыльях линий Ca II $\lambda 3933$ Å и Mg II $\lambda 4481$ Å. Таким образом, мы сделали вывод о наличии компаньона и получили, что это звезда класса A5 V с $v \sin i \approx 150$ км/с. Величина проекции скорости вращения главного компонента, который мы обозначили HD 183986 Aa, была оценена в 30 км/с. К ранее известным значениям переменной лучевой скорости мы прибавили три новых измерения в диапазоне от -6 до $+22$ км/с.

БЛАГОДАРНОСТИ

При проведении этого исследования использовалась база данных SIMBAD (CDS, Страсбург, Франция) и база атомных данных VALD

(Венский университет, Австрия). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Болгарского национального научного фонда DO 02-85 и DO 02-362, грантов Института астрономии для поддержки наблюдений (ИИ, ИС, ИБ), Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-02-00009), и программы Президиума РАН “Эволюция звезд и галактик” (ИР, ДК, ЕС). ЮЗ благодарит Р. Комзика за поддержку программного обеспечения. Астрономический институт Словацкой академии наук предоставил компьютерное и инструментальное оборудование. Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- J. Zverko, J. Žižňovský, I. Iliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 325 (2011).
- J. Zverko, I. Iliev, I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **67**, 57 (2012).
- J. Zverko, I. Iliev, I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 57 (2013).
- V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *Journ. Opt. Technology* **76**, 87 (2009).
- D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
- N. E. Piskunov and J. A. Valenti, *Astronom. and Astrophys.* **385**, 1095 (2002).
- I. Hubeny, T. Lanz, C. S. Jeffery, *Newsletter on analysis of astronomical spectra* No. 20 (1994).
- J. Krtička, PhD Thesis (Masaryk University, Brno, 1998).
- F. Castelli and R. L. Kurucz, *ASP Conf. Ser.* **288**, A20 2003.
- N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
- T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, F. Kupka, and W. W. Weiss, *Baltic Astronomy* **6**, 244 (1997).
- F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
- F. Kupka, T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, et al., *Baltic Astronomy* **9**, 590 (2000).
- T. Moon and M. M. Dworetsky, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **217**, 782 (1985).
- B. Smalley and M. M. Dworetsky, *Astronom. and Astrophys.* **293**, 446 (1995).
- N. Grevesse, M. Asplund, and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **130**, 105 (2007).
- J. Zverko, J. Žižňovský, Z. Mikulášek, and I. Kh. Iliev, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **37**, 49 (2007).
- D. Hoffleit and J. H. Warren, *The Bright Star Catalogue*, 5th revised ed. (1991).
- O. J. Eggen, *Astrophys. J. Suppl.* **55**, 597 (1984).
- M. Jascheck, C. Jaschek, and Y. Andriolat, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **72**, 505 (1988).
- D. P. Hube, *Mem. R. Astr. Soc.* **72**, 233 (1970).
- H. Levato, S. Malaroda, C. Jaschek, and M. Jaschek, *Astronom. and Astrophys.* **299**, 163 (1995).
- D. R. Palmer, E. N. Walker, D. H. P. Jones, and R. E. Wallis, *R. Obs. Bull.* **135**, 385 (1968).
- S. C. Wolff and G. W. Preston, *Astrophys. J. Suppl.* **37**, 371 (1978).
- A. Uesugi and I. Fukuda, *Revised Catalogue of Stellar Rotational Velocities* (1981).
- E. Paunzen, A. Schnell, and H. M. Maitzen, *Astronom. and Astrophys.* **444**, 941 (2005).
- S. E. Strom, S. C. Wolff, and D. H. A. Dror, *Astronom. J.* **129**, 809 (2005).
- K. Lefever, J. Puls, T. Morel, et al., *Astronom. and Astrophys.* **515**, A74 (2010).
- E. Niemczura, T. Morel, and C. Aerts, *Astronom. and Astrophys.* **506**, 213 (2009).
- N. Grevesse, M. Asplund, A. J. Sauval, and P. Scott, *Astrophys. and Space Sci.* **328**, 179 (2010).
- J. Dommangeat and O. Nys, *Astronom. and Astrophys.* **363**, 991 (2000).
- C. Fabricius, E. Hog, V. V. Makarov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **384**, 180 (2002).
- A. N. Cox, *Allen's Astrophysical Quantities*, 4th edition (Los Alamos, 1999), p. 381.
- B. Y. Welsh, R. Lallement, J.-L. Vergely, and S. Raimond, *Astronom. and Astrophys.* **510**, A54 (2010).
- E. Paunzen, U. Heiter, I. Kh. Iliev, et al., *Recent Res. Dev. Astronom. and Astrophys.* **1**, 1, (2003).
- G. P. Kuiper, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **6**, 1 (1961).
- H. A. Abt, H. Levato, and M. Grosso, *Astrophys. J.* **573**, 539 (2002).
- F. Royer, J. Zorec, and A. E. Gómez, *IAUS* **224**, 109 (2004).

**Stars with Discrepant $v \sin i$ as Derived from the Ca II λ 3933 Å and Mg II λ 4481 Å Lines.
IV. HD 8837—a Shell Star, HD 47964 and HD 183986—New Binaries**

J. Zverko, I. Romanyuk, I. Iliev, D. Kudryavtsev, I. Barzova, E. Semenko, I. Stateva

Axial rotation of a star plays an important role in its evolution, physical conditions in its atmosphere, and appearance of its spectrum. We have analyzed CCD spectra of three stars for which their projected rotational velocity remarkably differs when derived from the Ca II λ 3933 Å and Mg II λ 4481 Å lines. We derived effective temperatures and surface gravities using published $uvby\beta$ photometries and computed synthetic spectra. Comparing observed line profiles of the two lines with the computed ones, we estimated values of $v \sin i$. We also derived radial velocities by means of the cross-correlation function. HD 8837 is known to be a shell star with pronounced narrow absorption cores in the Balmer lines as well as in the strong metal lines; however, we do not confirm the emission component in the core of H β . HD 47964 has been discovered by Hipparcos to be a double. However, in our spectra we do not find traces of the other star. Based on the Hipparcos data, we estimated that the other star would be a main sequence A4 star with an extremely high rotational velocity resulting in wiping out any traces of spectral lines of the companion. HD 183986 is known to be a triple star. However, we have found a manifestation of a so far not discovered companion of the component HD 183986 A and estimated it as a main sequence A5 star having $v \sin i$ of about 150 km/s.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: rotation—stars: individual: HD 8837, HD 47964, HD 183986*