

А.В. Баранов, С.Г. Можаровский

ПРОБЛЕМА АНОМАЛЬНОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛИНИЙ VI λ 6058.1 Å И λ 6111.6 Å В СПЕКТРАХ ТЕНИ ПЯТЕН

На спектрограммах пятна отмечены две линии ванадия – VI λ 6058.13 Å и λ 6111.64 Å – с необычным, аномальным расщеплением. Есть явные отличия видимого расщепления этих линий от теоретических. Линия VI λ 6058 Å имеет пять компонент расщепления вместо четырех, а линия VI λ 6111 Å – четыре вместо двух.

Предпринят ряд попыток выяснить условия, при которых возникает аномальное расщепление.

Разница теоретических и лабораторных факторов Ланде для линий VI λ 6058 Å и 6111 Å невелика, поэтому аномалия расщепления не может объясняться нарушениями рассел-саундерсовской связи.

Расщепление линий ванадия на четыре и пять компонент с расположением пиков интенсивности, соответствующим наблюдаемому, можно получить, если предположить, что нижний уровень этих линий расщеплен, т.е. его фактор Ланде равен не 0, а $-4/3$. При этом расположение компонент в профиле интенсивности получает объяснение, однако для получения совпадающих профилей приходится брать угол наклона поля к лучу зрения γ , на 45° отличный от угла, подобранного для триплета Ti I λ 6064.6 Å.

Сделана попытка описать видимое расщепление линий влиянием аномальной дисперсии [1]. Но и она не приводит к желаемому результату.

Еще одна возможность объяснить ситуацию – кроссовер-эффект. И здесь есть определенные трудности. Чем меньше фактор Ланде используемой линии, тем сильнее должны быть искажены наблюдаемые профили Стокса этих линий, чего в явном виде не наблюдается. Более того, сложно предположить, что кроссовер-эффект проявляется только в двух избранных линиях, никак не проявляясь в других.

Чтобы рассмотреть расщепление этих линий с учетом круговой поляризации, использован атлас спектра тени пятна, полученный в 1972 г. Харви [21]. Рассмотрены и другие линии, имеющие тот же самый либо идентичный

по конфигурации нижний уровень перехода. Получено, что все отчетливо наблюдаемые в спектре пятен линии с нижним уровнем $3d4(^5D)4s\ a^4D_{1/2}$ с энергией уровня $8413,00\text{ см}^{-1}$ имеют аномалию расщепления. Другие линии с конфигурацией $a^4D_{1/2}$ аномалий в структуре расщепления не проявляют.

Учета известных из таблиц Куруча [22] данных о сверхтонком расщеплении линий $\text{VI } \lambda\ 6058\ \text{Å}$ и $\lambda\ 6111\ \text{Å}$ также не дал объяснения аномальному расщеплению.

ВВЕДЕНИЕ

Спектральный диапазон $\lambda\ 6056\text{--}6180\ \text{Å}$ несколько наблюдаемых сезонов использовался в Уссурийской астрофизической обсерватории (УАФО) для получения спектрограмм. В этом диапазоне больше других привлекает внимание линия $\text{VI } \lambda\ 6058.13\ \text{Å}$. Она имеет относительно небольшую интенсивность в пятне, но показывает самое большое расщепление. Кроме того, эта линия расщеплена на пять компонент, что наблюдается для всех более-менее крупных пятен. Мы замечали это в сотнях визуальных наблюдений и на множестве полученных спектрограмм. Интенсивность линии $\text{VI } \lambda\ 6058.13\ \text{Å}$ невелика, она сопоставима с интенсивностью молекулярных blends, однако бочкообразная форма, характерная для магнитоактивных линий с большим расщеплением, когда от центра пятна к полутеням расщепление падает, доказывает, что компоненты не являются молекулярными blends. На четыре компоненты в достаточно сильном поле расщеплена линия $\lambda\ 6111.64\ \text{Å}$. Проблема состоит в том, что согласно структуре расщепления этих линий, они должны иметь четыре для $\lambda\ 6058.13\ \text{Å}$ и две для $\lambda\ 6111.64\ \text{Å}$ компоненты расщепления соответственно. В результате численного расчета профилей Стокса для моделей тени для разнообразных входных параметров также получается профиль интенсивности с четырьмя и двумя пиками, в том числе и при учете известных данных сверхтонкого расщепления ванадия. На сегодняшний день этой аномалии нет объяснения. В данной работе мы показываем, какие факторы **не могут** привести к такому расщеплению, каковы особенности аномалий, проявляются ли они для каких-либо других линий.

ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ VI L 6058 Å И L 6111 Å

Отметим, что в литературе аномалия расщепления интересующих нас линий была впервые кратко описана в работе Дж. Бурмана [12], в дальнейшем этот вопрос никто не рассматривал.

Линии ванадия VI λ 6058.13 Å и λ 6111.64 Å принадлежат к одному мультиплету 34 (переход $a^4D-z^4P^0$) в таблицах [18] (см. табл. 1). Эти две линии имеют один и тот же нижний атомный уровень $3d^4(^5D)4s a^4D_{1/2}$ с энергией уровня 8413,00 см⁻¹ и фактором Ланде $g = 0$. Структура зеемановского расщепления, согласно данным о линиях и лабораторным значениям факторов Ланде, уровней отображена на рис. 1 и в табл. 1.

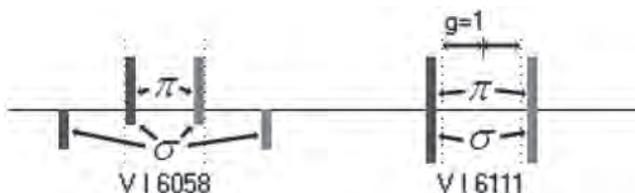


Рис. 1. Вверх от оси абсцисс показаны положения по длине волны π -компонент расщепления линий и их относительная интенсивность, пропорциональная высоте отрезков, вниз – то же самое для σ -компонент расщепления. Пунктирные линии показывают расщепление, соответствующее фактору Ланде $g = \pm 1$

Таблица 1

Структура зеемановского расщепления уровней

Длина волны, Å	Переход	Дробь Рунге	Относительные интенсивности	$g_{\text{eff(LS)}}$	$g_{\text{eff(Lab)}}$
6058,13	$a^4D_{1/2} - z^4P_{1/2}^0$	$\frac{(13)39,13}{15}$	$\frac{(4)3,1}{16}$	2,167	2,138
6111,64	$a^4D_{1/2} - z^4P_{1/2}^0$	$\frac{(4)4}{3}$	$\frac{(1)1}{4}$	1,333	1,270

Дробь Рунге отображает взаимное расположение компонент, которое было бы в случае идеальной Рассел–Саудерсовской (LS) связи.

Отклонения от LS-связи можно оценить, сравнив теоретический эффективный фактор Ланде линий $g_{\text{eff(LS)}}$ со значением $g_{\text{eff(Lab)}}$, посчитанным для лабораторных значений факторов Ланде верхнего и нижнего уровней.

ПРИМЕР НАБЛЮДЕНИЙ ЛИНИЙ VI L 6058 Å И L 6111 Å

Методика наблюдений, фотометрии и расчетов

Приведем пример нашего наблюдательного материала, подтверждающего аномалию. Серия наблюдений была получена 13.05.1985 г UT 22 h для пятна № 26 согласно бюллетеню «Солнечные данные». Площадь пятна $S = 425$ м.д.п., напряженность поля составляла 3100 Э, полярность S , согласно патрульным наблюдениям, в линии FeI λ 6302 Å. Наблюдения проводились в Уссурийской астрофизической обсерватории (УАФО ДВО РАН) на телескопе АЦУ-5 со спектрографом АСП-20 в 4-м порядке дифракционной решетки с плотностью 600 штрихов/мм. Щель спектрографа составляла 0,040 мм, обратная дисперсия – 2,5 мм/Å. Размер изображения на щели 11,7 "/мм. Теоретическая разрешающая способность $R = \lambda/\Delta\lambda = 600 \cdot 150 \cdot 4 = 3\ 600\ 000$, практическая $R = 250\ 000$ и соответственно $\Delta\lambda$ для λ 6100 Å составляет около 25 мÅ. Наблюдения проводились фотографически без использования анализаторов поляризации. В серии 13.05.1985 г. получено 6 спектров в диапазоне λ 6056–6173 Å, пленка – Тип-17, экспозиция – 1 с.

Фотометрия была проведена на микроденситометре АМД-1 Института Солнечно-Земной физики, г. Иркутск (бывший СибИЗМИР) в 1986 г. Для фотометрии использованы три спектрограммы с наилучшим изображением, результаты сохранены в виде нормированных графиков профилей линий.

Расчеты проводились с помощью нашего универсального программного комплекса SunWorld (см. [10]) для таблично заданной модели фотосферы (тени) в предположениях истинного поглощения, ЛТР и с учетом аномальной дисперсии. Алгоритмы расчета такого класса программных комплексов, как SunWorld или SPANSAT [5], наиболее полно изложил Ланди дель-Иммоченти Е. [16].

Сравнение наблюдений и расчетов

Фотографические и визуальные наблюдения показывают отчетливые отличия картины расщепления этих линий от теоретических. Такая же, как у нас, структура расщепления описана у Дж. Бурмана [12]. На рис. 2 приведен результат фотометрии – один из разрезов по центру пятна, а на рис. 3 – результат расчета профилей Стокса по модели тени.

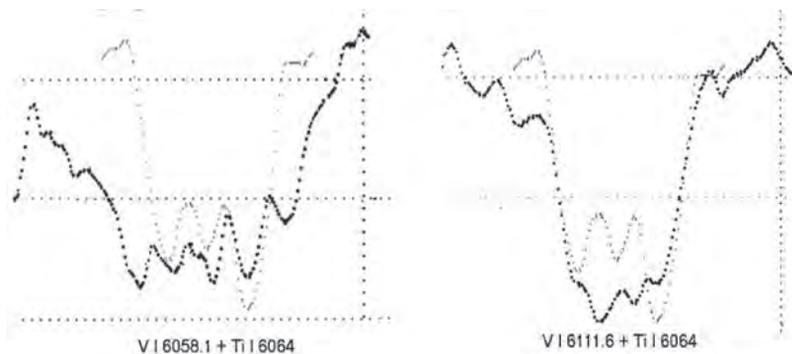


Рис. 2. Профиль Стокса интенсивности линий VI λ 6058 Å и VI λ 6111 Å на фоне приведенного для сравнения профиля триплета TI λ 6064 Å. По оси абсцисс цена деления составляет 20 мÅ. Шкала интенсивностей линии VI λ 6058 Å растянута относительно шкал двух других линий

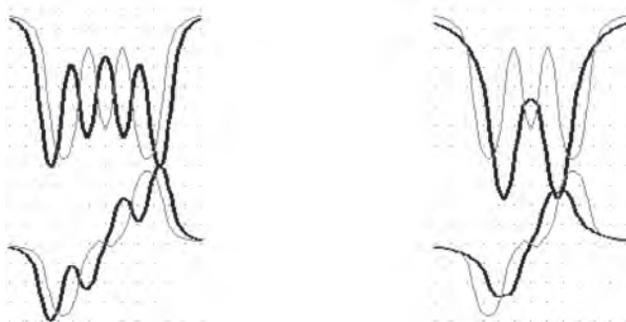


Рис. 3. Профили Стокса интенсивности и круговой поляризации тех же линий. По оси абсцисс цена деления составляет 40 мÅ, по оси ординат цена деления зависит от линии. Расчет проведен для модели тени Штельмахера–Вира [15], напряженность поля $H = 3100$ Э, $\gamma = 15^\circ$, микротурбулентная скорость $V_{mi} = 0$

Из сравнения рис. 2 и 3 очевидно, что линия VI λ 6058 Å имеет пять компонент расщепления вместо четырех, а линия VI λ 6111 Å – четыре вместо двух. Величину расщепления компонент можно оценить, сравнив ее с расщеплением известной триплетной линии TiI λ 6064 Å, у которой фактор Ланде $g = 2,0$.

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ОБЪЯСНЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОЙ АНОМАЛИИ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛИНИЙ VI L 6058 Å И L 6111 Å

Мы рассмотрели следующие варианты объяснения наблюдаемого аномального расщепления.

Отклонения от связи Рассела–Саундерса

Приведем для всех уровней теоретические G_{Calc} и лабораторные G_{Lab} значения факторов Ланде, взятые из таблиц Куруча [22] (табл. 2).

Таблица 2

Значения факторов Ланде атомных уровней

Элемент	Уровень	G_{Calc}	G_{Lab}	Отклонение, %	λ , Å
VI	(5D)4p a ⁴ D _{1/2}	0	0	0	Общий
VI	(5D)4p z ⁴ P _{1/2}	8/3	2,540	–4,8	6111
VI	(5D)4p z ⁴ P _{3/2}	26/15	1,710	–1,3	6058

Как видно из табл. 2, лабораторные значения отличаются от теоретических несущественно. Таким образом, отклонения от LS-связи слишком малы, чтобы объяснить наблюдаемую аномалию расщепления.

Изменение фактора Ланде уровня a⁴D_{1/2} от 0 до величины –4/3

Если принять предложение одного из авторов, А.В. Баранова, о том, что фактор Ланде общего нижнего уровня a⁴D_{1/2} равен не 0, а –4/3, то картина расщепления изменится (рис. 4). Подставив эту структуру

расщепления в программу расчета профилей, можно подобрать параметры расчета так, чтобы получить картину достаточно правдоподобную для профиля интенсивности (рис. 5).

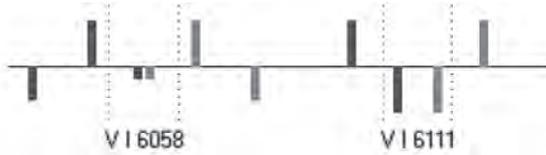


Рис. 4. Структура зеемановского расщепления уровней. Пояснения см. в подписи к рис. 1

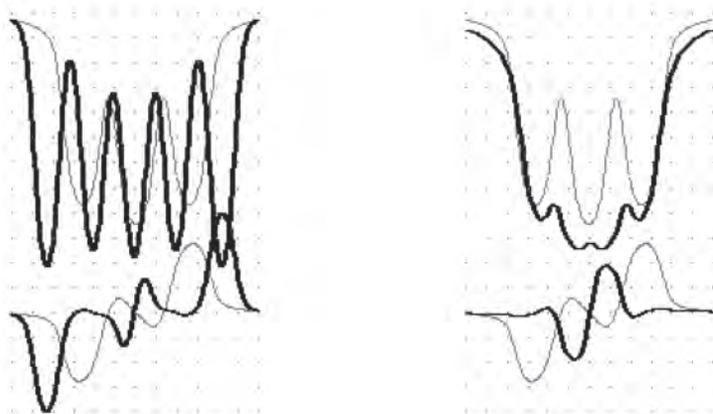


Рис. 5. Профили Стокса интенсивности и круговой поляризации линий V I λ 6058 Å и λ 6111 Å на фоне приведенного для сравнения профиля триплета Ti I λ 6064 Å для фактора Ланде нижнего уровня, равного $-4/3$ вместо 0. Наклон поля к лучу зрения $\gamma = 60^\circ$

Из рис. 5 видно, что мы получили требуемые пять компонент для линии 6058 и четыре компоненты для линии 6111. Отметим, что узость компонент линии 6058 можно устранить, если увеличить микротурбулентную скорость в расчете или учесть сверхтонкую структуру расщепления (СТС) ванадия. Но согласовать угол поля к лучу зрения $g = 15^\circ$ для по линии титана λ 6064 и угол $g = 60^\circ$ для линий ванадия можно, если только каким-то образом поменять местами p - и s -компоненты в

структуре расщепления на рис. 4. Это требует отказаться от предположения, что $G_{\text{LOW}} = -4/3$ вместо $G_{\text{LOW}} = -0$. То же самое следует из анализа имеющихся профилей Стокса V для линий 6058 и 6111.

Влияние аномальной дисперсии

Сделана попытка объяснить наблюдаемое расщепление линий влиянием аномальной дисперсии [4, 9, 11, 18]. Поскольку в 4-м порядке решетка в значительной мере работает как линейный поляризатор, то можно было бы ожидать, что при наблюдениях без поляроидной оптики мы все-таки будем иметь на спектрограмме картинку, отражающую некоторую совокупность профилей Стокса линий, а не чистый профиль интенсивности.

В [3] нами было показано, что у ряда линий со сложной структурой расщепления есть заметные искажения γ_V -профилей, обусловленные аномальной дисперсией. Для изучаемых линий был выполнен ряд расчетов, целью которых было найти максимальные проявления указанного эффекта при разумных значениях параметров поля и среды, в которой линии образуются. Или, иными словами, мы провели исследования максимума инверсии γ_V -профилей в областях длин волн, близких к положению p -компонент данных линий.

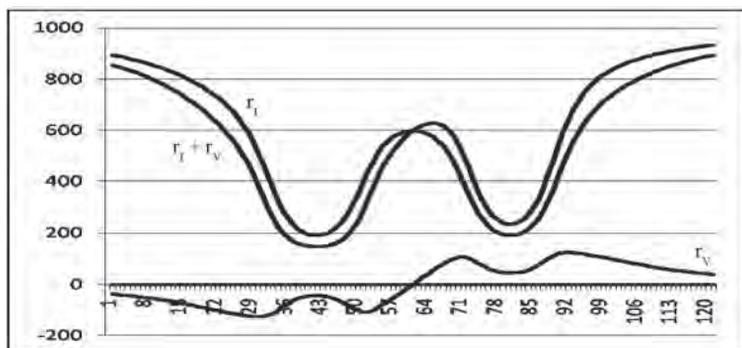


Рис. 6а. Профили Стокса линии VI λ 6011 Å. Приведены профили Стокса r_I , r_V . Профиль r_Q для данной линии совпадает с линией абсцисс. По оси абсцисс приведены номера пикселей (1 пиксел – 4 mÅ), по оси ординат – интенсивность непрерывного спектра в тысячных долях. Приведена и сумма r_I и r_V -профилей. Параметры, принятые при расчете: модель тени пятна Цваана [20], $\cos(\theta) = 0,7$, $H = 3000$ Э, $\gamma = 45^\circ$, микротурбулентная скорость $V_{mi} = 0,5$ км/с. Глубина «ямок» на r_V -профилях достигает 7,3% (амплитуда инверсии r_V -профилей $\approx 3,6\%$)

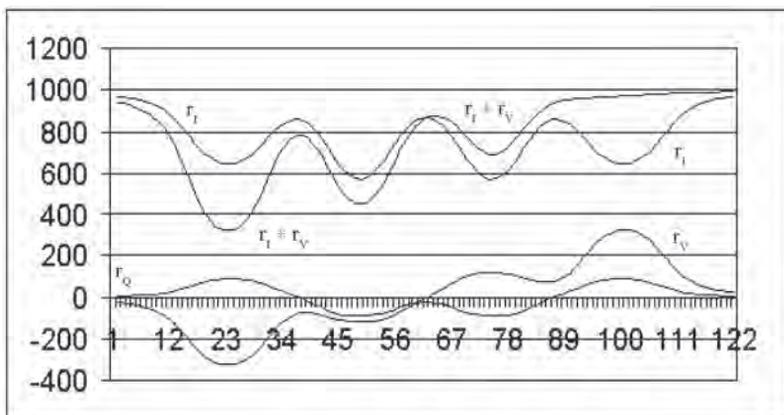


Рис. 6б. Профили Стокса линии VI λ 6058 Å. Обозначены те же величины, что и на рис. 6а. Принятые при расчете параметры: модель тени пятна Цваана [20], $\cos(\theta) = 0,7$, $H = 3500$ Э, $\gamma = 40^\circ$, микротурбулентная скорость $V_{\text{ми}} = 0,5$ км/с. Глубина «ямок» на r_V -профилях оценить трудно, но качественно амплитуда инверсии r_V -профилей $\geq 2\%$

Из рассмотрения рис. 6 а, б ясно, что попытка объяснить наблюдаемое расщепление линий влиянием аномальной дисперсии не приводит к каким-либо заметным эффектам в профиле интенсивности линий.

Кроссовер-эффект

Есть еще одна возможность объяснения наблюдаемых профилей – кроссовер-эффект [1, 2, 7, 10–14].

Напомним, что кроссовер-эффект был открыт именно при изучении звездных спектров и присутствует в спектре Солнца как звезды [13], т.е. является достаточно общей характеристикой для фотосфер звезд.

В работе [2] одним из авторов анализировались профили Стокса линий в спектре солнечного пятна группы 289 СД от 03.08.89 г.

В части полутени, удаленной от центра солнечного диска, r_V -профили не антисимметричны, как это следует из теории. r_I -профили практически симметричны относительно центров линий, за исключением частей профилей, находящихся в центре линий. В этих ме-

стах «красная» часть профиля обычно глубже «фиолетовой». В части полутени, близкой к центру диска, при «нормальном» r_V -профиле в 82% случаев «фиолетовые» s -компоненты линий глубже, за счет чего r_1 -профиль несимметричен.

Асимметрию r_1 -профиля можно объяснить наличием в верхних слоях атмосферы пятна потоков вещества с большими скоростями и малым полем. Найденные особенности были расценены как два разных типа кроссовер-эффекта. Пятно находилось в спокойной фазе развития. Кроссовер-эффект в этом виде – явление вполне типичное для пятен. Можно предполагать, что слой поля скоростей, вызывающего асимметрии, сравним по глубине со слоем образования линий, следовательно, движущийся компонент компактен.

Однако и здесь уже намечаются определенные трудности. Чем меньше фактор Ланде используемой линии, тем сильнее (при наложении друг на друга профилей линии, образующихся в разных элементах с разной лучевой скоростью) должны быть искажены наблюдаемые профили Стокса этих линий [1]. Этого на рис. 6а, по крайней мере, в явном виде не отмечается.

В общем, достаточно сложно предположить, чтобы кроссовер-эффект действовал только на две избранные линии, не затрагивая остальные. Это заставляет отказаться от объяснения наблюдаемой аномалии расщепления с помощью кроссовер-эффекта.

ПОИСК ДРУГИХ ЛИНИЙ С АНОМАЛЬНЫМ РАСЩЕПЛЕНИЕМ

Итак, все рассмотренные выше варианты не могут объяснить природу аномального расщепления. Проанализируем общие условия возникновения аномалии.

Анализ линий 34 мультиплета нейтрального ванадия

Мы рассмотрели другие линии 34 мультиплета ванадия, которые присутствуют на нашем наблюдательном материале (табл. 3).

Рассмотрение экспериментального материала для оставшихся четырех линий из табл. 3 не выявило у них каких-либо явных аномалий расщепления.

Таблица 3

λ , Å	ε_i , эВ	D_{ph}	W_{ph} , mÅ	Переход	g_{eff}
6111.633	1,04	0,084	10	1/2–1/2	1,27
6058.113	1,04	0,020	3,0	1/2–3/2	2,14
6135.360	1,05	0,086	8,9	3/2–1/2	0,85
6081.421	1,05	0,129	12	3/2–3/2	1,45
6119.505	1,06	0,221	19	5/2–3/2	1,08
6090.184	1,08	0,324	31	7/2–5/2	1,14

Примечание. l – длина волны линии в Å, ε_i – потенциал возбуждения нижнего уровня перехода в эВ, D_{ph} – глубина и эквивалентная ширина в фотосфере в mÅ, g_{eff} – эффективный фактор Ланде.

Анализ линий с той же или аналогичной электронной конфигурацией нижнего уровня

Следующим шагом был поиск линий, имеющих тот же самый нижний уровень либо уровень, аналогичный по конфигурации электронов (5D) $4s\ a^4D_{1/2}$ в списках Куруча [22]. Получилось примерно 50 линий VI, MnI и CrII. Если из них исключить слабые и сильно блендированные линии, остается сравнительно небольшой список линий (табл. 4).

Таблица 4

Список линий, подобных VI I 6111 Å и I 6058 Å

l , Å	Элемент	E_L , см	J_L	Уровень	E_U , см	J_U	Уровень
4257.655	MnI	23818,87	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	47299,29	1/2	(5D) $4p\ y^4P$
4284.093	MnI	23818,87	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	47154,51	3/2	(5D) $4p\ y^4P$
4761.524	MnI	23818,87	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	44814,73	3/2	(5D) $4p\ z^4F$
5604.931	VI	8413,00	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	26249,48	3/2	(5D) $4p\ y^4D$
5626.018	VI	8413,00	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	26182,63	1/2	(5D) $4p\ y^4D$
8144.559	VI	8413,00	1/2	(5D) $4s\ a^4D$	20687,76	3/2	(4F) $sp\ z^4D$

Примечание. l – длина волны в Å, E_L – энергия нижнего атомного уровня в см⁻¹, E_U – энергия верхнего атомного уровня в см⁻¹, J – квантовое число J (общий момент атома, равный векторной сумме орбитального L и спинового S моментов атома).

Для анализа расщепления этих линий мы использовали данные из атласа спектра пятна, полученного в марте 1972 г. Харви [21] (рис. 7а)

Теоретические структуры расщепления линий из табл. 4 показаны на рис. 7б :

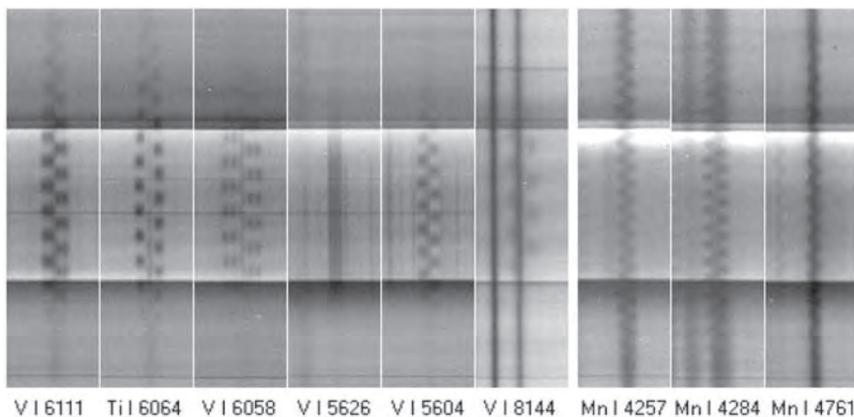


Рис. 7а. Некоторые линии из атласа Харви, в том числе приведенные в табл. 4. Наблюдения выполнены с помощью поляроидной мозаики

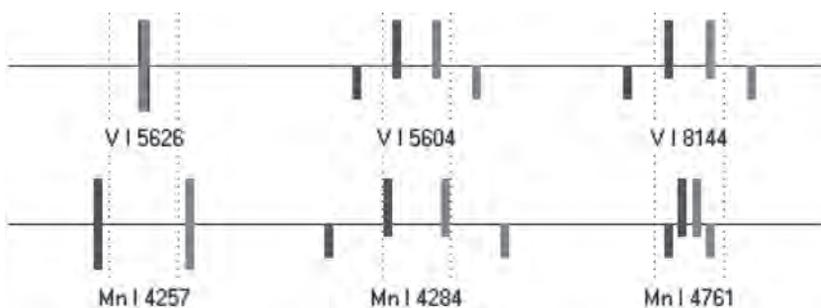


Рис. 7б. Схемы теоретических расщеплений линий из табл. 4. Пояснения см. в подписи к рис. 1

По спектрограммам атласа Харви [21] были сделаны измерения расщеплений интересующих нас линий в пикселах атласа (табл. 5).

Таблица 5

Измерения расщеплений

Линия	Крайний σ -компонент			Внутренний σ -компонент		
	Пиксели	G_{Harvey}	$G_{\text{Theor.}}$	Пиксели	G_{Harvey}	$G_{\text{Theor.}}$
TiI 6064	14	1,99	1,99	–	–	–
FeI 6302	20	2,48	2,49	–	–	–
FeI 5250	23	3,08	3,00	–	–	–
VI 6058	24	3,41	2,57	12	1,70	0,86
VI 6111	15	2,07	1,27	6	0,83	–*
VI 5626	7	1,25	0	–	–	–
VI 5604	14	2,52	1,76	7	1,26	0,59
VI 8144	13(eff)	1,35	1,50	–	–	–
MnI 4284	12(eff)	2,08	2,17	–	–	–
MnI 4257	6	1,87	1,73	–	–	–

Примечание. Прочерк данные отсутствуют, либо их нельзя получить (расщепление невозможно измерить), * – единственный случай, когда теоретические данные не существуют, а экспериментальные данные есть.

Здесь линия TiI 6064 Å используется как опорная для вычисления факторов Ланде остальных линий. Линии FeI λ 6302 Å и FeI λ 5250 Å приведены для оценки достоверности метода. По спектрограммам Харви визуально были оценены расстояния между s -компонентами в точках (пикселах) изображения. По этим расстояниям в точках были вычислены факторы Ланде G_{Harvey} . Для сравнения рядом приведены теоретические значения $G_{\text{Theor.}}$. Для линий VI λ 6058, 6111 и 5604 Å измерялись оба s -компонента, крайний и внутренний. Для линий VI λ 8144 Å и MnI λ 4284 Å разделить компоненты на спектрограмме не удалось, поэтому использованы усредненные эффективные значения.

Анализ табл. 5 показывает, что все линии нейтрального ванадия с нижним уровнем $(^5D)4s\ a^4D_{1/2}$ и верхним уровнем, который начинается с $(^5D)4p$, показывают аномальную структуру зеемановского расщепления, которая не укладывается ни в какие теории и не может быть объяснена отклонением от LS-связи. Наличие сразу четырех линий с аномальным расщеплением исключает ошибку в идентификации, воз-

можною при массовых измерениях и расчетах структур линий [20].

В то же время линии марганца аномалий не показывают, так же как и линия VI λ 8144 Å, у которой верхний уровень (4F)sp $z^4D_{3/2}$ лежит на другой электронной оболочке.

Выводы

Можно заметить следующее.

Измеряемые структуры расщепления VI λ 6058 Å и VI λ 5604 Å подобны так же, как подобны их теоретические структуры расщепления. Интенсивности обеих s-компонент примерно одинаковы, тогда как теоретические интенсивности различаются в три раза. Соотношение факторов Ланде внешней и внутренней компонент равно 2:1. По центру линий наблюдается неполяризованная по кругу компонента, хотя ее там быть не должно.

Линия VI λ 5626 Å по зеемановской структуре не должна иметь расщепления. Однако наблюдается три компоненты, у которых отсутствуют даже следы круговой поляризации, т.е. это не могут быть σ -компоненты. Согласно нашим визуальным наблюдениям, величина расщепления линии VI λ 5626 Å не связана с величиной напряженности поля.

У линии VI λ 6111 Å присутствуют две s-компоненты примерно равной интенсивности с соотношением факторов Ланде примерно 5:2, хотя, согласно теоретической структуре, должна быть только одна s-компонента.

Таким образом, можно констатировать, что структура расщепления линий VI λ 6058, 6111, 5604 и 5626 Å существенно отличается от структуры, предсказанной атомной теорией. Для прояснения вопроса необходимы лабораторные измерения зеемановского расщепления указанных линий в сильном магнитном поле.

Анализ сверхтонкого расщепления как возможной причины аномалии

Как известно, для линий ванадия характерно расщепление на компоненты сверхтонкой структуры. Согласно данным, приведенным в обширных таблицах Куруча [22], линии VI λ 6058 Å и λ 6111 Å распадаются на независимые от магнитного поля компоненты, параметры которых приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры компонент СТС линий VI λ 6058 Å и λ 6111 Å

Длина волны	Относительная интенсивность	Длина волны	Относительная интенсивность
6058.115	0,156	6058.157	0,344
6058.126	0,164	6111.622	0,109
6058.126	0,055	6111.622	0,328
6058.140	0,117	6111.662	0,328
6058.140	0,164	6111.662	0,234

Как видно из рис. 8, учет данных табл. 6 качественно не изменяет картины, остаются те же четыре компоненты линии VI λ 6058 Å, только теперь они более размыты, а не такие узкие, как на рис. 2. Для линии λ 6111 Å СТС компоненты собираются в два пика с расстоянием между компонентами 40 мÅ и отношением интенсивностей 0.44:0.56, что хорошо видно в расчетном профиле.

Сравнивая рассчитанную с учетом табл. 6 линию VI λ 6111 Å на рис. 8 с ее фотометрическим профилем на рис. 2, можно заметить, что пиков с расстоянием 40 мÅ между вершинами в экспериментальном материале не наблюдается. Это дает основание предположить, что данные об СТС интересных нас линий в таблицах Куруча недоста-

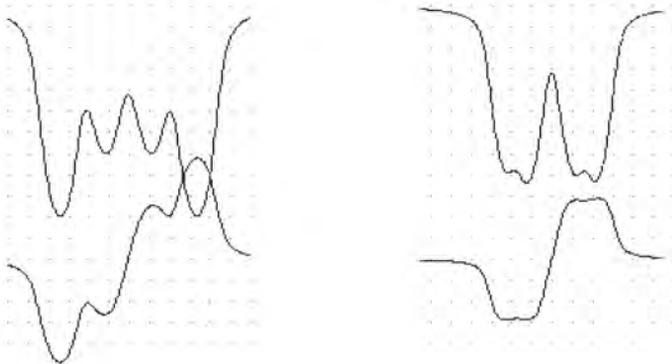


Рис. 8. Учет сверхтонкого расщепления для линий VI λ 6058 Å и VI λ 6111 Å. Параметры расчета те же, что и на рис. 3

точные и не верны, так как и в спокойной фотосфере профили линии VI λ 6111 Å также не показывают следов возмущения от раздвоения профиля с характерным размером 40 mÅ.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 12-I-0-02-038, 12-II-0-02-006 и 12-III-A-02-011.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В. Некоторые особенности кроссовер-эффекта в спектре солнечных пятен // Солнечные данные. 1975. № 5. С. 77–82.
2. Баранов А.В., Баранова Н.Н., Лазарева Л.Ф. Особенности кроссовер-эффекта в полутени солнечного пятна. Результаты наблюдений // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 24–35. (Тр. УАФО, т. 11, вып. 11).
3. Баранов А.В., Лазарева Л.Ф., Можаровский С.Г. Инверсии наблюдаемых профилей круговой поляризации в спектральных магнитоактивных линиях различных элементов // Всероссийская конференция «Солнечная и солнечно-земная физика». СПб. 2–8 октября 2011 г. Труды. 2011. С. 109–113.
4. Баранов А.В., Можаровский С.Г. Проявления аномальной дисперсии в солнечных спектральных линиях со сложной структурой расщепления // Изв. КрАО. 2010. Т. 106. № 1. С. 235–238.
5. Гадун А.С., Шеминова В.А. SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении // Препр. ИТФ АН УССР. 1988. 37 с.
6. Григорьев В.М., Демидов М.Л., Пещеров В.С., Жигалов В.В. Кроссовер-эффект в спектре Солнца как звезды. 2002. (Григорьев В.М. Частное сообщение).
7. Григорьев В.М., Кац И.М. Кроссовер- и магнитооптические эффекты в спектре солнечных пятен // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физ. Солнца. Иркутск, 1970. Вып. 15, С. 37–46.
8. Гусейнов М.Дж. О природе кроссовер-эффекта в спектрах солнечных пятен // Изв. КрАО. 2002. Т. 98. С. 17–26.
9. Демкина Л.Б., Обридко В.Н. Аномалии в зеemanовском триplete в спектре солнечного пятна // Физика солнечных пятен. М.: Наука, 1976. С. 58–62.
10. Можаровский С.Г. Зависимость профилей Стокса от температуры моделей фотосферы // АЖ. 1992. Т. 69. С. 368–376.
11. Рачковский Д.Н. Эффекты магнитного вращения в спектральной линии // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. 1962. Т. 28. С. 259–270.
12. *Buurman J.* Spectral lines suitable for sunspot investigations // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1974. Vol. 15. № 1. P. 35–47.
13. *Golovko A.A.*, The Crossover Effect in Sunspots and the Fine Structure of Penumbra // *Solar Phys.* 1974. Vol. 37. P. 113–125.

14. *Grigoriev B.M., Katz I.M.* The Crossover and Magneto-Optical Effects in Sunspot Spectra // Solar Phys. 1972. V. 22. P. 119–128.
15. *Grigoriev B.M., Katz I.M.* Magnetoactive lines in the medium with the velocity gradient // Solar Phys. 1975. Vol. 42. P. 21.
16. *Landi Degl'Immocenti E.* MALIP – a programme to calculate the Stokes parameter of magnetoactive Fraunhofer lines // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1976. Vol. 25. № 2. P. 379–390.
17. *Moore C.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J.* The solar spectrum from 2935 Å to 8770 Å. Second revision of Rowland's preliminary table of Solar spectrum wavelengths. Washington, 1966. 349 p.
18. *Stellmacher G., Wiehr E.* The Deep Layers of Sunspot Umbrae // Astron. & Astrophys. 1975. Vol. 45. P. 69–76.
19. *Wittmann A.* On Magneto-Optical Effects in Sunspots // Solar Phys. 1971. Vol. 20, № 2. P. 365–368.
20. *Zwaan C.* Structure of sunspots. II: A Continuum Model Atmosphere for Dark Umbral Cores // Solar Phys. 1974. Vol. 37. P. 99–111.
21. <ftp://vso.nso.edu/pub/polatlas/> (A photographic spectral atlas of a sunspot between 3813 and 9182 angstroms by *J. W. Harvey*).
22. <http://kurucz.harvard.edu/LINELISTS/GFHYPHER100/> Kurucz's Linelists.
23. <http://www.astro.uu.se/~vald/php/vald.php> (The Vienna Atomic Line Database (VALD)).