

УДК 523.98

## Проявления аномальной дисперсии в солнечных спектральных линиях со сложной структурой расщепления

*А.В. Баранов, С.Г. Можаровский*

Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН, Уссурийск, Россия  
*baranov@utl.ru*

Поступила в редакцию 13 октября 2009 г.

**Аннотация.** Теоретические расчеты и прямые измерения показывают, что в центре ряда спектральных линий со сложным расщеплением есть инверсии профилей круговой поляризации.

SHOWING OF ANOMALY DISPERSION IN THE SOLAR SPECTRAL LINES WITH COMPLEX STRUCTURE OF SPLITTING, *by A. V. Baranov, S. G. Mozarovsky.* Theoretical calculation and directly measurement show that in the center of some spectral lines with complex structure of splitting take place Stokes profile inversion.

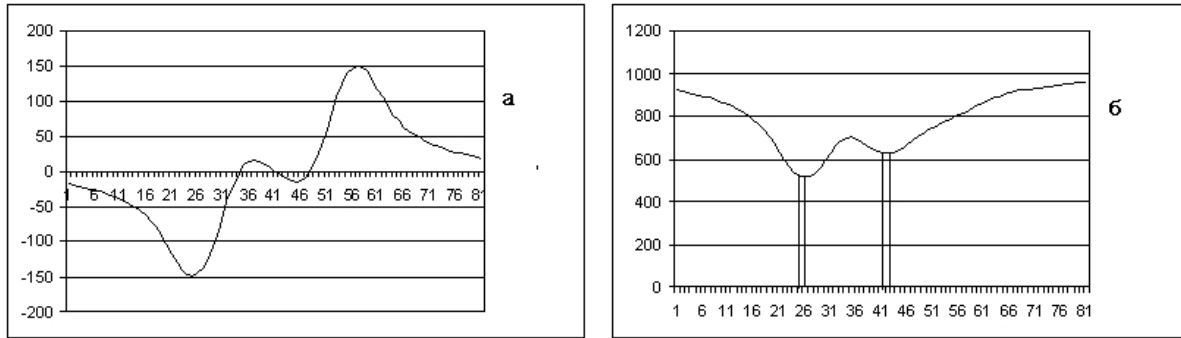
**Ключевые слова:** Солнечные пятна, магнитные поля, спектральные линии, профили Стокса

---

Целью данной работы являлось рассмотрение проявления аномальной дисперсии в солнечных пятнах вблизи центров магнитоактивных линий с различной структурой расщепления.

Аномальное поведение магнитоактивных линий в спектрах солнечных пятен известно довольно давно. На это первым указал А.Б. Северный (1959). Теоретическое объяснение проявлений аномальной дисперсии вблизи центров в относительно сильных линиях с большим фактором Ланде было дано Д.Н. Рачковским (1962). В семидесятые годы аномальное поведение параметров Стокса вблизи центров магнитоактивных линий интенсивно изучалось. При этом возникла некоторая неопределенность в истолковании объекта исследований. В спектрах солнечных пятен было отмечено явление, которое получило название смещение  $\pi$ -компонента, а так же были отмечены и некоторые другие особенности. Их сущность заключается в том, что при наблюдениях спектров пятен с поляризационной оптикой в линиях с большим расщеплением наблюдаются, как правило, два экстремума интенсивности. Один по своему положению примерно соответствует (расположен дальше от центра линии по длине волны) положению  $\sigma$ -компонента, второй, близкий к  $\pi$ -компоненту – несколько смещен от центра линии в сторону, противоположную положению  $\sigma$ -компонента. Ни тот, ни другой экстремум с реальными положениями  $\pi$ - и  $\sigma$ -компонентов не совпадают. Появление смещенного экстремума вблизи  $\sigma$ -компонента обусловлено взаимным наложением компонент расщепления линии, хорошо проявляется при анализе формы параметра круговой поляризации данной линии  $r_V$  и проявляется до тех величин расщепления, при которых взаимодействие компонент отсутствует. Для случая слабого магнитного поля этот эффект рассмотрен нами в (Баранов, 2005).

У центра спектральной линии отмечаются особенности, связанные как с проявлениями аномальной дисперсии, так и со смещением центрального компонента  $(r_V + r_I)$ -профиля в спектре круговой поляризации (не  $\pi$ -компонента!). Сказанное поясняет рис. 1., где приведены рассчитанные для типичных значений  $H$  и  $\gamma$ -профили линий. Анализируя рисунок можно видеть, что рассчитанные



**Рис. 1.** На рис. *a* дан  $r_V$ -профиль линии Fe I 630.25 нм с изменениями в центре линии, вызванными действием аномальной дисперсии.  $H$  полагалась равной 2600 Э,  $\gamma=60^\circ$ . На рис. *b* приведен  $(r_V + r_I)$ -профиль той же линии при тех же  $H$  и  $\gamma$ . Вертикальными чертами на рисунке отмечены (слева направо): положение экстремального значения  $r_V$ -профиля, истинное положение  $\sigma$ -компонента, истинное положение центра линии (и центра  $\pi$ -компонента) и положение экстремума  $(r_V + r_I)$ -профиля. По вертикальной оси значения даны в тысячных долях интенсивности непрерывного спектра, по горизонтальной оси значения выражены в пикселах (1 пиксел = 16 мÅ). Положение центра линии соответствует пикселу за номером 41

смещения компонентов расщепления линии Fe I 630.25 нм относительно истинных положений  $\pi$ - и  $\sigma$ -компонентов имеют характерную величину 16 мÅ. Отметим, что для рассчитываемой линии подбором значений  $H$ ,  $\gamma$ ,  $Lg(gf)_i$  и  $g_i$  можно получить рассчитанные смещения  $(r_V + r_I)$ -профиля примерно до 40 мÅ.

**Таблица 1.** Приведены последовательно: элемент, длина волны линии, потенциал возбуждения ее нижнего уровня, силы осцилляторов, глубина образования линии в тени пятна и в фотосфере. В последней колонке даны эффективные факторы Ланде

Эл-т	$\lambda_i$ , нм	$E_i$ , эВ	$Lg(gf)_i$	$h_i$	$h_{ip}$	$g_i$
Fe I	621.34	2.22	-2.58	-125	-306	2
V I	621.38	0.30	-1.84	-110	-192	1.495
Fe I	621.93	2.20	-2.39	-140	-326	1.667
Fe I	623.26	3.65	-1.22	15	-258	2
Fe I	626.51	2.18	-2.57	-130	-316	1.583
Fe I	627.02	2.86	-2.64	-15	-224	0.5
Fe I	628.06	0.86	-4.37		-304	1.45
Fe I	629.10	4.73	-0.69		-192	1.5
Fe I	629.78	2.22	-2.74		-300	1.0
Fe I	630.15	3.65	-0.56	-110	-286	1.667
Fe I	630.25	3.69	-1.14	10	-264	2.5
Fe I	632.27	2.59	-2.37	-110	-285	1.5
Cr I	633.01	0.94	-2.49	-205	-202	1.833
Fe I	633.68	3.69	-0.75	-80	-283	2

Для 12 спектральных линий железа, одной линии ванадия и одной линии хрома (данные о них приведены в таблице 1), расположенных в диапазоне  $\lambda\lambda$  621.3–633.7 нм, выполнены решения

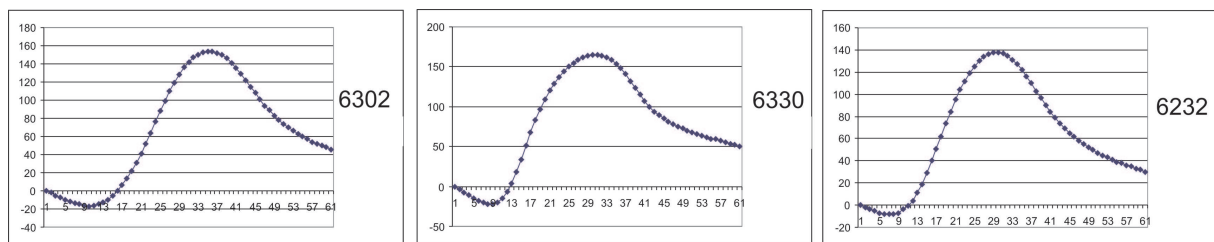
уравнений переноса излучения с учетом аномальной дисперсии. Использована модель солнечного пятна Книра. Расчет велся для значения напряженности магнитного поля 2400 и 2800 Э, углы наклона силовых линий полагались равными 60° и 75°.

Проведенные расчеты показали, что профили круговой поляризации имеют инверсию вблизи центра линии FeI λ 630.2 нм (амплитуда A = 1.5 %). Из остальных линий наиболее заметную инверсию V-профиля имеют линии FeI λ 623.2 нм (A = 0.6 %) и CrI λ 633.0 нм (A = 1.9 %). Обе они имеют значительные факторы Ланде (2 и 11/6 соответственно) и компактные группы π- и σ-компонентов. Видно, что у линии хрома глубина инверсии сравнима (и при заданных параметрах для расчета даже больше) с глубиной инверсии γV-профиля линии FeI λ 630.2 нм, хотя размер областей инверсии у последней больше. Данные, характеризующие инверсии различных спектральных линий, приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Величина A - максимальная величина инверсий γV-профиля, L - размер области инверсий в мÅ

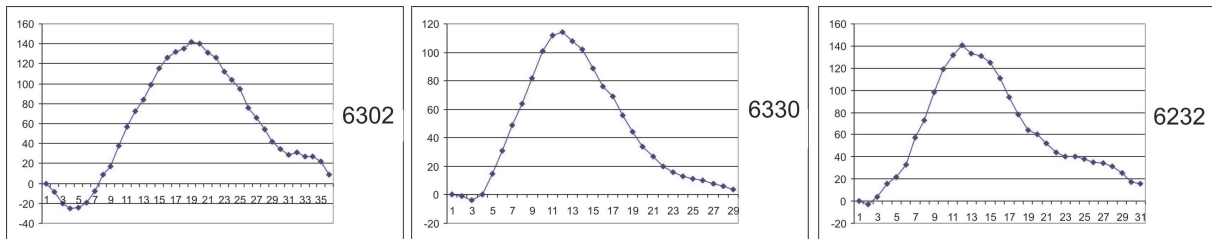
Линия, λ, нм	H=2400 Э,		H=2600 Э,		H=2800 Э,		H=2800 Э,	
	γ = 60°		γ = 75°		γ = 60°		γ = 75°	
	A,%	L,mÅ	A,%	L,mÅ	A,%	L,mÅ	A,%	L,mÅ
623.2	0.6	22	0.5	28	0.8	24	0.6	21
626.5	0.3	11	0.3	18	0.4	13	0.3	30
628.0	0.4	10	0.3	15	0.5	15	0.4	20
630.2	1.5	34	1.0	39	1.7	39	1.0	43
632.3	0.2	10	0.2	15	0.4	12	0.3	18
633.0	1.9	10	1.1	30	2.2	23	1.3	31

Кроме этих линий еще пять имеют указания на инверсии γV-профиля. Это линии FeI λ 626.5 нм (A = 0.3 %), FeI λ 628.0 нм (A = 0.4 %), FeI λ 623.2 нм (A = 0.3 %). Количественные значения глубин инверсий приведены для значений H = 2600 Э, γ полагалось равным 60°. При H = 2600–2800 Э и γ = 75° очень слабая (A = 0.1 %) инверсия отмечается у линии FeI λ 621.9 нм, не имеющая центрального π-компонента расщепления.



**Рис. 2.** Профили линий с рассчитанной наибольшей инверсией γV-профиля. Обозначения те же, что и на рис. 1

Расчеты показали, что сколько-нибудь заметных особенностей в центре не имеет линия FeI λ 627.0 нм с триплетным расщеплением и малым фактором Ланде g = 0.5. Нет явных признаков инверсий γV-профиля у линий FeI λλ 621.3 и 633.7 нм. Они имеют большой эффективный фактор Ланде (g = 2), но их структура расщепления – ((2), 3,5))/2 – такова, что их π-компоненты находятся далеко от центра линий и сколько-либо заметный эффект показывать не могут. Но на их



**Рис. 3.** Экспериментальные профили линий, имеющих максимальные значения инверсии. Обозначения те же, что на рис. 1

расчетных профилях на значительном расстоянии от центра линии есть депрессии (не инверсии!)  $\gamma_V$ -профиля, которые, по-видимому, обусловлены действием аномальной дисперсии.

Таким образом, инверсии профилей Стокса круговой поляризации могут наблюдаться во многих спектральных линиях, имеющих более-менее значительные факторы Ланде, компактные группы компонентов расщепления и эквивалентные ширины в пятне порядка 50 mÅ и более.

Экспериментальный материал (Баранов, Лазарева, 2006) в основном подтверждает приведенные выше расчеты. Наиболее заметные проявления инверсии  $\gamma_V$ -профиля в указанном спектральном диапазоне имеют (в соответствии с теоретическими расчетами) линии FeI  $\lambda$  630.2 нм ( $A = 2.0\%$ ), CrI  $\lambda$  633.0 нм ( $A = 1.0\%$ ) и FeI  $\lambda$  623.2 нм ( $A = 0.6\%$ ). В скобках приведены максимальные измеренные значения  $A$ . Отметим, что измерения относятся к внутренней полутени пятна. С учетом конечного спектрального разрешения спектрографа и фотоматериалов, это находится в соответствии с теоретически рассчитанными величинами. Методически, если за центр линии принимать не половину расстояния между одинаковыми значениями  $\gamma_V$ -профиля, а точку лежащую на середине расстояния между пиками  $\gamma_V$ -профиля, для линий CrI  $\lambda$  633.0 нм и FeI  $\lambda$  623.2 нм, можно получить величины инверсий, близкие к рассчитанным. Однако следует отметить, что указания на инверсию профилей Стокса круговой поляризации показывают наблюдения в линии FeI  $\lambda$  633.68 нм, имеющей у центра линии величину  $A \sim 0.2\%$ . Природа этого не совсем понятна, но, вероятно, связана с наличием в пятне элементов тонкой структуры (Могилевский и др., 1967; Обридо, 1985). Возможность этого следует из анализа экспериментальных профилей Стокса линии FeI  $\lambda$  630.2 нм (Лозицкий и Коломиец, 2006). Вопрос требует дальнейшего анализа с использованием линий со структурой расщепления, аналогичной структуре расщепления линии FeI  $\lambda$  633.68 нм.

Работа выполнена при поддержке Программы № 16 Президиума РАН и грантов ДВО РАН 09-I-P7-01, 09-II-CO-02-002 и 09-III-A-02-49.

## Литература

- Баранов А.В. // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2005. С. 3. (Тр. УАФО. Т. 8. Вып. 8.)
- Баранов А.В., Лазарева Л.Ф. // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2006. С. 20. (Тр. УАФО. Т. 9. вып. 9.)
- Лозицкий В.Г., Коломиец Д.Г. // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Владивосток: Дальнаука. 2006. С. 79. (Тр. УАФО. Т. 9. Вып. 9.)
- Могилевский Э.И., Демкина Л.Б., Июшпа Б.А., Обридо В.Н. // Development of Solar Active Region. IAU Sump. №. 35./ Ed. Kiepenheuer K.O. Dordrecht: Budapest. 1967. P. 215.
- Обридо В.Н. // Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука. 1985. С. 256.
- Рачковский Д.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1962. Т. 28. С.259.
- Северный А.Б. // Астрон. журн. 1959. Т. 36. С. 126.