ЛИТЕРАТУРА

1. Woolly P. and Newton F. — M. N., 1937, **97**, 531.
2. Gefferies G. T. — M. N., 1955, **115**, 6, 617.
3. Gefferies G. T. — M. N., 1956, **116**, 6, 629.
4. Е Ши-хуэй — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1961, **25**, 234.
5. Обашев С. О. — Изв. Астрофиз. ин-та АН Каз.ССР, 1959, **8**, 64.
6. Гуртовенко Э. А., Семенова Н. Н. — Изв. ГАО АН УССР, 1961, 4, 1, 31.
7. Соболев В. М. — Изв. ГАО АН СССР, 1958, 158, 12.
8. Яковкин Н. А. и Зельдина М. Ю. — АЖ, 1964, **41**, 5, 914.
9. Яковкин Н. А. и Зельдина М. Ю. — Солн. данные, 1964, 9, 62.
10. Яковкин Н. А. и Зельдина М. Ю. — АЖ, 1964, **41**, 2, 336.
11. Костик Р. И., Орлова Т. В. — Солн. данные, 1964, 3, 51.
12. Стоянова М. Н. — Солн. данные, 1964, 4, 45.
13. Hirayama T. — Pub. Astron. Soc. Japan, 1964, **16**, 2, 104.
14. Hirayama T. — Pub. Astron. Soc. Japan, 1968, **73**, 5, 2, 563.
15. Крат В. А. и Стоянова М. Н. — Изв. ГАО АН СССР, 1963, **23**, 173, 42.
16. Мороженко Н. Н. — ГАО АН УССР, 1963, 5, 1, 93.
17. Мороженко Н. Н. — В кн.: Спектрофотометрические исследования активных образований на Солнце, «Наукова думка», К., 1964.
18. Крат В. А. — Изв. ГАО АН СССР, 1964, **24**, 177, 56.
19. Кирюхина А. И. — АЖ, 1970, **47**, 5, 1019.
20. Яковкин Н. А. и Зельдина М. Ю. — АЖ, 1963, **40**, 5, 847.
21. Е Ши-хуэй — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1961, **25**, 180.
22. Полупан П. Н. — АЖ, 1971, **48**, 3.

THE ROLE OF ELECTRONIC IMPACT IN EXCITATION OF PROMINENCE LUMINESCENCE IN CA+ LINES

P. N. POLUPAN

Summary

The mechanism of electronic impact is of secondary significance in the prominence luminescence excitation in Ca^+ lines as compared with the resonance scattering of photospheric radiation. Its contribution changes considerably with the 1000° temperature change in the prominences (Tables 9 and 10).

Under conditions of the prominence average temperature the electronic processes provide 4—7% of radiated energy in the *K* and *H* lines, and combined action of the electronic impact and photospheric radiation through the metastable level 3d adds still 33—61% energy to the H and K lines (Table 8). Similar phenomenon is observed in the IR triplet as well.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЦЕНТР—КРАЙ СЛАБЫХ ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ. II. АСИММЕТРИЯ И ШИРИНЫ ЛИНИЙ

Э. А. Гуртовенко

Работа является продолжением начатого в 1968 г. исследования очень слабых фраунгоферовых линий [1].

Результаты наблюдений и обработки

Наблюдения проводились на двойном солнечном монохроматоре в ГАО АН УССР [2]. Принципы наблюдений и обработки в основном изложены в [1]. Отметим некоторые дополнения.

Начиная с 1969 г. при наблюдениях фиксируется направление перехода центр—край, что позволяет точно отождествить место положения щели на диске Солнца.

Упрощена методика обработки. При регистрации устанавливаются близкими отсчеты пера самописца в континууме близ линии и на ленте канала контроля прозрачности. Наложение синхронизированных реги-

строграмм от обоих каналов позволяет непосредственно использовать запись по каналу контроля прозрачности как линию отсчета на непрерывный спектр. Нетрудно показать, что ошибка δN нанесенной таким образом линии непрерывного спектра определяется соотношением $\delta N = x\frac{\Delta N}{N}$, где N — отсчет на континуум близ линии в делениях шкалы, ΔN — разность между отсчетом N и отсчетом на ленте регистрации прозрачности, а x — изменение отсчета вследствие флюктуаций прозрач-

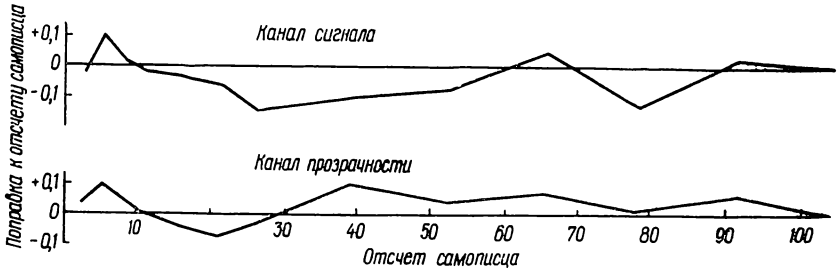

Рис. 1. Нелинейность комплекса усилительной и регистрирующей аппаратуры двойного монохроматора.

ности. Обычно $N \approx 100$, $\Delta N < 3$, и точность 0,1% вполне обеспечивается при небольших изменениях прозрачности.

С 1969 г. применяется новая более высококачественная усилительная аппаратура. При исследовании ее на нелинейность методом, описанным в [2] с дополнительным исследованием микрометра щели на приборе КПМ-3, не обнаружено ощутимых отклонений от нелинейности в пределах ±0,1% (рис. 1).

Согласно Роджерсону [3], профили линий с глубиной $d_0 < 20\%$ достаточно точно описываются формой коэффициента поглощения. Учитывая высокую точность наших наблюдений и возможность влияния насыщения, мы ограничились, как и прежде, в основном линиями с глубиной $d_0 < 10\%$. В настоящей работе использованы почти все такие линии в области λ 6000—6300 Å, свободные от бленд и теллурических линий, согласно последнему каталогу Ш. Мур. Особенно мы старались не пропускать линии редких и легких элементов, линии резонансные и с высокими потенциалами возбуждения, а также линии ионов. Отчасти по этой причине проведены наблюдения нескольких частично блендирующихся линий.

Эту программу наблюдений планировалось расширить на другие области спектра Солнца. Однако сейчас этот вопрос остается открытым в связи с тем, что многие линии не обеспечивают эффективного материала для всесторонних исследований фотосферы из-за их аномально большой ширины и асимметрии, обусловленной, по-видимому, сверхтонкой и изотопической структурой профилей линий (СТС).

Данные об использованных линиях представлены в табл. 1. Блендирующиеся линии отмечены знаками «—» и «=», расположенными над обозначением длины волны. Положение черточки слева или справа соответствует блендированию коротковолнового или длинноволнового крыла. Одна черточка означает едва ощутимое блендирование, две черточки — существенное блендирование крыла линии. Качество наблюдательного материала оценивается в новой пятибалльной шкале: 2 — плохое, 5 — отличное. В среднем для всех линий качество материала соответствует баллу 4.

Профили линий строились, как правило, по четырем регистрограммам — две в прямом и две в обратном направлениях регистрации.

Каталог профилей центр—край с подробными данными для каждой линии будет опубликован по окончании всей работы.

Оценка точности построения контуров линий [1] относится к одному «независимому» измерению, представляющему среднее из двух записей в прямом и обратном направлениях. Опыт показал, что различия между «прямой» и «обратной» записями практически нет. Поэтому оценку точности можно произвести по ошибке единичного измерения (δ), выведенной в результате усреднения отклонений отдельных записей от

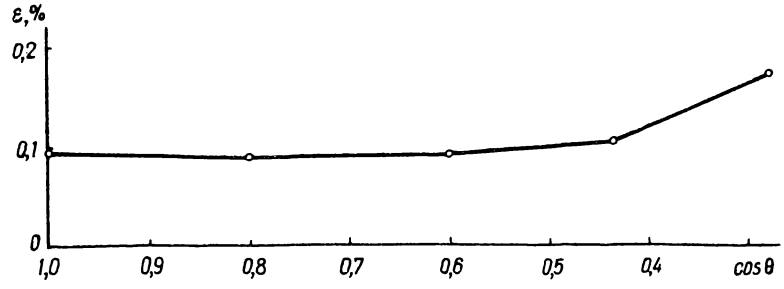

Рис. 2. Средние ошибки построения профилей линий по четырем регистрограммам.

среднего профиля линии. В табл. 2 приведены ошибки δ по данным Э. А. Гуртовенко и Н. Н. Кондрашовой [1], Р. Костика и Т. В. Орловой [4] и по данным, выведенным нами в 1969 г. по линиям λ 6188,9 и λ 6187,4 Å и в 1970 г. по линиям λ 6242,8, λ 6086,6 и λ 6025,7 Å. Усредненные данные ($\delta_{ср}$) для разных $\cos\Theta$ имеют несколько различный вес из-за разного количества использованных линий. Однако они четко показывают увеличение ошибки к краю диска. Величина $\delta_{ср}$, как видно из таблицы, относится в среднем к материалу с качеством балла 4. Ошибка результата (ε) оценивается из соотношения $\varepsilon = \frac{\delta_{ср}}{\sqrt{n}}$, где n — число измерений профиля линии. Величина $\varepsilon = \frac{\delta_{ср}}{\sqrt{4}}$, характерная для профилей линий, использованных в настоящей работе, представлена графически на рис. 2.

Ошибка полуширины определяется ошибкой ε и зависит также от глубины и ширины линии. Например, изменение относительной интенсивности в профиле близ $d = \frac{1}{2} d_0$ на величину $\varepsilon_d = \pm 0{,}15\%$ обуславливает в очень широких и мелких линиях, таких как λ 6052,6 SI, изменение полуширины h на величину $\approx \pm 6\ m$ Å. В более глубокой линии λ 6188,9 CoI это значение ε_d обуславливает ошибку $\varepsilon_h \approx \pm 3\ m$ Å. В узких и глубоких линиях, таких как λ 6177,253 NiI, соответствующее изменение h лежит в пределах $\pm 1\ m$ Å.

Другого рода ошибки носят неслучайный хаарктер и могут быть связаны с качеством функционирования аппаратуры, ошибками привязки к континууму и т. д. Учесть эти ошибки трудно. В какой-то степени показателем их величины может служить сравнение наблюдений одних и тех же линий в разные дни (табл. 3). Использовались общие линии по нашим наблюдениям, наблюдениям [4] и неопубликованным наблюдениям Н. Кондрашовой. Значения ε_d и ε_h представляют уклонения от средних по двум датам наблюдений. Среднее значение $\varepsilon_d = 0{,}13\%$ близко к величине ошибки ε для соответствующих значений $\cos\Theta$ (рис. 2). Средняя ошибка ε_h также соответствует величине случайной ошибки для достаточно широких и неглубоких линий, какими являются линии из табл. 3.

Дата наблюдения	Длина волны	Элемент	Пот. возб.	cos Θ = 1				cos Θ = 0,8			
				d_0, %	h, mÅ	τ_0	V_t, км/сек	d_0, %	h, mÅ	τ_0	V_t, км/сек
22.10.69	6239.361	Sc I	0.00	6,4	94	0,80	2,3	6,3	105	0,63	2,7
29.09.69	6111,652	V I	1,04	8,4	102	79	2,6	8,6	121	61	3,2
10.07.70	6251,825	V I	0,29	12,6	101	73	2,6	12,8	110	59	2,9
16.09 68	−6087,790	Si I	5,87	10,0	160	76	4,3	10,5	174	60	4,7
20.10.69	6177.253−	Ni I	1,83	14,1	75	72	1,8	13,9	89	58	2,2
20.10.69	=6177,535	Ni Ip	4,23	1,9	109+	84	2,9	2,2	129+	67	3,5
15.09.69	6043,40	Ce II	1,21	1,7	101	84	3,3	1,6	112	67	3,6
22.07.70	6198,655	Ni I	4,26	1,5	111	85	3,0	1,8	124	67	3,4
22.07.70	6199,186	V I	0,29	10,0	112	76	2,9	10,0	121	60	3,2
22.07.70	6199,508	Fe I	2,56	4,3	86	82	2,1	4,0	98	65	2,6
16.09.69	6086,673	Co I	3,41	2,9	129	83	3,5	3,1	117	66	3,1
29.09.69	6106,441=	Zr II	1,76	2,6	136+	85	3,9	2,9	125+	66	3,5
29.09.69	−6106,616−	Si I	5,61	7,4	120	79	3,0	7,4	129	63	3,3
29.09.69	6112.932=	Si I	5,61	6,9	114	80	2,7	6,9	130	63	3,3
29.09.69	−6113,329	Fe II	3,22	10,4	97	76	2,5	10,7	93	60	2,3
29.09.69	6105,132−	Fe Ip	4,55	11,8	87	75	2,2	11,0	103	60	2,7
29.09.69	−6105,785	Ni I	4,23	2,3	105	84	2,8	2,7	133	66	3,6
14.09.69	6034,038−	Fe Ip	4,31	8,2	82	79	2,0	8,0	92	62	2,3
14.09.69	=6034,227	Nd II?	1,54	0,9	104+	85	3,4	0,9	109+	68	3,7
10.08.70	6742,838	V I	0,26	8,0	100	78	2,6	8,3	109	62	2,8
12.09.69	6150,154	V I	0,30	7,2	138	84	3,8	7,8	139	62	3,8
12.09.69	6025,767	Ni I	4,23	4,8	94	81	2,4	4,7	99	65	2,6
09.08.68	6188,998	Co I	1,71	5,2	168	81	4,7	5,6	161	64	4,5
25.09.69	6067,638	Si I	5,08	2,3	118	84	2,9	2,4	146	67	3,8
09.08.68	6187,410	Fe Ip	2,83	3,9	74	82	1,7	3,5	77	66	1,8
25.09.69	6064,626	Ti I	1,05	8,2	83	78	2,0	7,7	94	62	2,3
16.09.69	6098,664	Ti I	3,06	4,5	79	81	1,8	5,6	105	64	2,7
12.09.69	6179,395	Fe II	5,57	3,2	103	83	2,7	2,7	119	66	3,2
12.09.69	6159,382	Fe I	4,61	11,4	90	75	2,3	11,4	94	59	2,4
16.07.68	6058,172	V I	1,04	1,9	116	84	3,1	2,2	144	67	3,9
19.08.68	6045,492	Fe II	6,21	1,7	118	84	3,2	1,4	118	67	3,2
08.08.68	6092,818	Ti I	1,89	3,9	83	82	2,0	3,8	90	65	2,2
16.08.68	6054,075	Fe I	4,37	9,5	79	77	1,9	9,4	92	61	2,3
19.08.68	−6046,015	S I	7,87	6,5	234	80	6,6	6,2	237	62	6,7
24.07.68	−6052,682	S I	7,87	6,0	207	80	5,8	5,7	196	64	5,4
08.08.68	6093,151	Co I	1,74	6,5	113	80	3,0	6,8	110	63	2,9
30.09.69	6135,370	VI	1,05	8,5	89	78	2,3	8,5	104	61	2,7
30.09.69	6135,775	Cr I	4.82	11,2	109	75	2,8	11,4	122	59	3,2
30.09.69	6133,977	Ni I	4,09	5,3	106	80	2,8	5,3	116	64	3,1
25.07.70	6320,429	La II	0,17	7,2	117	78	3,8	7,2	118	62	3,8
20.10.69	6155,706	Si I	6,52	5,3	108	81	2,5	5,3	118	64	2,8
20.10.69	6156,801	O I	10,74	4,0	124	82	2,6	3.7	128	65	2,8
20.10.69	6158,171	O I	10,74	2,5	137	83	3,1	2,0	147	67	3,4
04.08.70	6233,201	V I	0,28	4,2	95	81	2,6	3,7	103	66	2,6
04.08.70	6233,498	Fe II	5,48	3,5	124	82	3,3	2,9	152	66	4,2
02.07.70	−6304,324	Zr I?	0,54	4,0	132	82	3,8	3,9	153	65	4,3
02.07.70	6303,461	Fe I	4,32	5,7	88	80	2,2	5,0	107	64	2,8
02.07.70	6303,767	Ti I	1,44	7,6	86	78	2,0	7,3	93	63	2,3
29.09.69	6120,249	Fe I	0,91	5,1	89	81	2,2	4,9	100	64	2,6
29.09.69	−6121,006	Ti I	1,88	3,7	100	82	2,5	3,7	118	65	3,0
16.09.70	−6254,845	Si I	5,62	2,5	145	84	3,7	2,4	135	67	3,5

На основании этого сравнения можно сделать вывод о небольшом влиянии систематических ошибок. Основываясь на средней величине случайной ошибки, можно допустить, в редких случаях, максимальные ошибки в контуре линии порядка 0,3—0,4%.

Коррекция за инструментальный профиль для линий с глубиной

Таблица 1

cos Θ=0,6				cos Θ=436				cos Θ=0,28				Асимметрия (mÅ)		
d_0, %	h, mÅ	τ_0	V_t, км/сек	d_0, %	h, mÅ	τ_0	V_t, км/сек	d_0, %	h, mÅ	τ_0	V_t, км/сек	$A_ц$	$A_к$	$A_{ср}$
5,8	104	0,48	2,6	6,4	114	0,35	3,0	6,5	115	0,22	3,0	—10	0	— 1
9,3	136	46	3,7	9,5	142	33	3,9	10,5	144	21	4,0	— 6	0	— 4
13,0	117	43	3,1	14,2	121	31	3,3	14,6	135	20	3,7	— 1	0	0
10,5	171	45	4,6	10,8	178	32	4,8	10,8	170	21	4,6	+ 3	— 1	+ 2
14,1	98	42	2,6	14,8	104	31	2,8	16,3	99	20	2,6	+ 6	+ 8	+ 7
2,1	111+	50	2,9	1,9	101+	37	2,6	1,9	129+	24	3,5	—	—	—
1,7	134	51	4,4	1,7	129	37	4,2	1,6	153	24	4,9	+12	— 4	+ 1
1,9	118	50	3,2	1,8	117	37	3,2	1,5	110	24	3,0	— 8	+11	+ 1
10,0	127	45	3,4	10,7	137	33	3,7	11,4	136	21	3,7	+10	+11	+10
4,2	103	49	2,7	4,2	119	36	3,2	4,7	111	23	3,0	— 3	— 3	— 2
2,9	124	50	3,4	2,7	135	36	3,7	2,8	117	24	3,2	0	+ 3	+ 3
2,8	138+	50	3,9	2,8	151+	36	4,3	2,7	176+	24	5,0	—	—	—
7,5	132	47	3,4	7,3	135	34	3,5	7,1	126	22	3,2	—	—	—
7,6	149	47	3,9	6,8	143	34	3,7	6,9	135	22	3,5	—	—	—
10,4	107	45	2,8	9,1	114	33	3,0	8,5	119	22	3,2	+ 6	+ 5	+ 3
11,1	105	45	2,8	11,3	103	32	2,7	10,4	117	21	3,1	—	—	—
3,2	151	50	4,2	2,2	127	37	3,5	1,9	106	24	2,8	—	—	—
8,6	94	47	2,4	9,0	99	33	2,6	8,8	102	22	2,6	0	0	0
1,1	112+	51	3,7	1,3	112+	37	3,7	0,9	107+	24	3,6	—	—	—
8,5	114	46	3,0	9,7	115	33	3,1	10,4	127	21	3,4	+ 3	+15	+ 5
8,0	140	46	3,9	8,4	140	34	3,8	8,7	144	22	4,0	+12	— 6	+ 7
4,5	108	49	2,9	5,1	117	35	3,2	5,2	118	23	3,2	+ 3	+ 6	+ 3
6,2	170	47	4,8	6,9	165	35	4,7	8,4	180	22	5,1	+ 9	—12	+ 3
2,3	136	50	3,5	2,3	148	36	3,9	2,5	109	24	2,6	—13	—18	— 9
3,5	94	49	2,3	3,8	87	36	2,2	4,7	84	23	2,1	+ 4	0	+ 2
7,8	99	47	2,5	8,8	112	33	2,9	9,5	117	22	3,1	0	— 2	0
5,3	98	48	2,5	5,4	116	35	3,1	5,1	109	23	2,9	+ 8	— 1	+ 5
2,4	117	49	3,1	1,9	115	36	3,1	1,9	100	24	2,6	+13	+ 3	+ 6
11,4	106	44	2,8	11,5	113	32	3,0	11,1	117	21	3,1	+ 6	0	+ 3
2,3	173	50	4,8	2,7	150	36	4,2	2,9	153	24	4,2	— 7	—13	—13
1,5	127	51	3,4	—	—	—	—	—	—	—	—	+11	—	+11
3,9	106	49	2,7	4,6	106	35	2,8	4,8	106	23	2,8	+ 2	+ 3	+ 2
9,3	99	46	2,6	9,4	104	33	2,7	9,2	112	22	3,0	+16	+ 7	+13
6,1	244	48	6,9	5,9	241	35	6,9	—	—	—	—	—	—	—
5,3	198	48	5,5	3,9	217	36	6,1	2,7	222	24	6,2	—	—	—
7,6	114	47	3,1	9,6	121	33	3,3	9,9	125	22	3,4	+12	+ 4	+ 7
9,1	121	46	3,2	9,1	121	33	3,2	9,9	124	22	3,3	— 3	0	0
11,6	128	45	3,5	10,8	126	32	3,4	10,4	139	21	3,8	—13	— 8	—14
5,4	119	49	3,2	5,3	122	35	3,3	5,2	130	24	3,6	— 6	+ 6	0
7,4	117	47	3,9	7,8	122	34	4,0	8,0	126	22	4,2	+17	+10	+11
5,2	115	48	2,8	5,2	119	35	2,9	5,2	119	23	3,0	— 3	— 5	— 1
3,2	126	50	2,7	2,9	121	36	2,5	2,4	115	24	2,3	— 5	0	— 4
1,6	154	51	3,7	1,5	136	37	3,1	—	—	—	—	— 1	—	0
4,3	115	49	3,1	5,3	120	35	3,2	5,4	132	23	3,6	— 2	—11	— 4
3,0	147	49	4,1	3,1	141	36	3,9	2,5	164	24	4,6	+11	+22	+13
4,0	154	49	4,4	3,9	155	36	4,4	3,6	159	23	4,5	—	—	—
5,2	115	48	3,0	5,0	121	35	3,3	5,0	119	23	3,2	+ 5	+ 2	+ 3
7,3	110	46	2,8	8,2	106	33	2,7	8,5	104	22	2,7	0	— 5	— 2
4,8	108	48	2,9	5,6	113	35	3,0	7,1	104	22	2,8	+ 7	0	+ 4
3,6	115	49	3,0	3,9	118	36	3,1	4,2	112	23	2,9	—	—	—
2,9	130	50	3,4	2,4	142	36	3,7	2,4	165	24	4,4	—	—	—
												+ 2,8	+ 0,7	+ 2,0

$d_0 \leqslant 10\%$ не превышает 0,5%. Учет такой малой поправки не является крайне необходимым в настоящем исследовании. Однако, эту поправку мы ввели при помощи следующего приближенного способа. Известно, что поправка возрастает с глубиной и уменьшается с увеличением ширины линий. Разумно предположить, что по крайней мере для малых

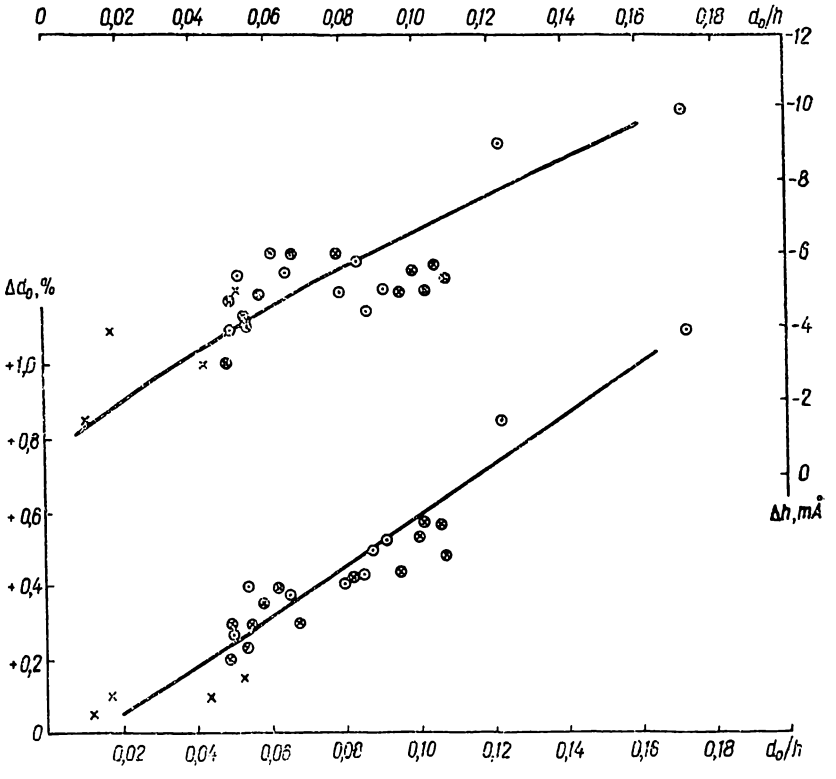

Рис. 3. Зависимость поправок коррекции за инструментальный профиль от параметра $\frac{d_0}{h}$.

⊙ — линии с полушириной $h<100$ mÅ; ⊕ — линии с полушириной $100<h<150$ mÅ; × — линии с полушириной $h>150$ mÅ.

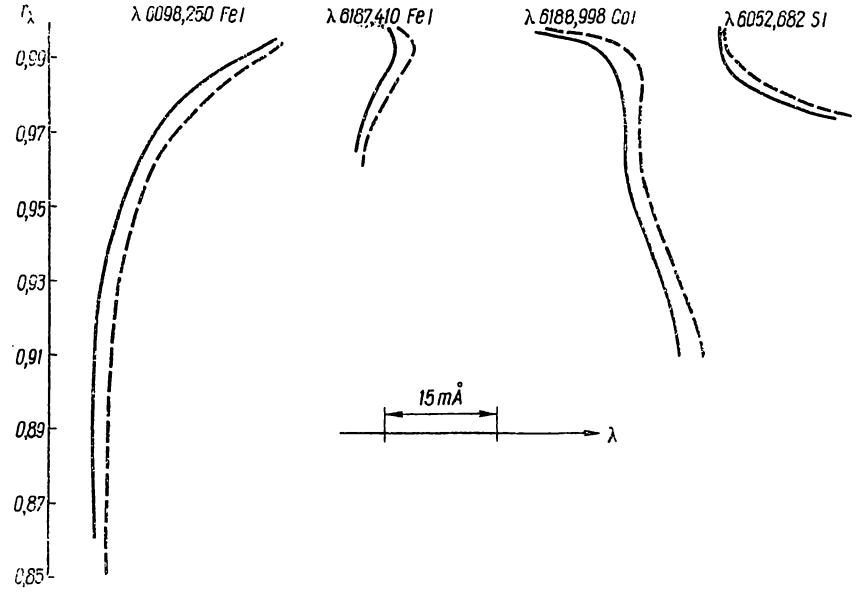

Рис. 4. Положение осей профилей некоторых линий в скорректированном за инструментальный контур (— — —) и нескорректированном (———) спектрах.

Таблица 2

Линия	cos θ									
	1		0,8		0,6		0,436		0,28	
	Качество материала	δ, %	Качество материала	δ, %	Качество материала	δ, %	Качество материала	δ, %	Качество материала	δ, %
6188,9 CoI	5	0,18	5	0,18	5	0,15	5	0,14	4	0,52
6187,4 FeI	4	0,17	4	0,14	4	0,14	4	0,14	3	0,46
6242,8 VI	4	0,22	4	0,25	4	0,35	4	0,31	4	0,42
6086,7 CoI	4+	0,14	4+	0,11	4+	0,13	4+	0,13	4+	0,19
6025,8 NiI	4	0,13	4	0,17	4	0,18	4	0,20	4	0,24
6046,0 SI, [1]	3+	0,20	3+	0,22	—	—	3+	0,24	—	—
Разные линии, [4]	3+	0,29	—	—	—	—	3+	0,38	—	—
Среднее		0,19		0,18		0,19		0,22		0,36

поправок (слабые линии) имеет место определенная зависимость между величиной поправки и параметром $\frac{d_0}{h}$. Мы использовали ряд линий с глубиной $2\% < d_0 < 14\%$, для которых были вычислены на ЭЦВМ скорректированные профили. Поправки в центральных глубинах Δd_0 и в полуширинах Δh для этих линий нанесены на рис. 3 в зависимости от $\frac{d_0}{h}$. Как видно, этот параметр достаточно однозначно определяет поправки для линий с разными ширинами.

Таблица 3

Линия	cos Θ	d_0, %	h, mÅ	d_0, %	h, mÅ	ε_{d_0}, %	ε_h, mÅ
		9. VIII 1968		11. IX 1969			
λ 6188,998 Co I	1,0	5,1	170	5,6	164	0,25	3,0
	0,8	5,5	164	5,7	163	0,10	0,5
	0,6	6,1	173	5,8	166	0,15	3,5
	0,44	6,7	168	6,7	192	0,05	12
		9. VIII 1968		11. IX 1969			
λ 6187,410 Fe I	1,0	3,7	78	3,6	74	0,05	2,0
	0,8	3,3	81	3,6	96	0,15	7,5
	0,6	3,4	97	3,5	96	0,05	0,5
	0,44	3,6	90	3,9	90	0,15	0
		9. VI 1968		25. IX 1969			
λ 6064,626 Ti I	1,0	7,2	84	7,7	89	0,25	2,5
	0,44	8,3	110	8,4	117	0,05	3,5
		24. VII 1968		16. IX 1969			
λ 6098,664 Ti I	1,0	5,2	92	4,8	83	0,20	4,5
	0,44	5,0	115	5,2	119	0,10	2,0
		27. VI 1968		22. X 1969			
λ 6239,361 Sc I	1,0	6,1	100	6,1	98	0,0	1,0
		24. VII 1968		12. IX 1969			
λ 6150,154 V I	1,0	6,5	136	7,0	142	0,25	3,0
		12. IX 1970		20. X 1969			
λ 6156,8 O I	1,0	4,1	125	3,9	126	0,10	0,05
	0,8	4,0	139	3,6	130	0,20	4,5
	0,6	3,2	136	3,1	128	0,05	4,0
	0,44	2,9	111	2,8	123	0,05	6,0
Среднее						0,13	3,6

Скорректированные на основании выведенных зависимостей значения полуширин h и центральных глубин d_0 представлены в табл. 1. Для линий, одно из крыльев которых блендировалось существенно, полуширина определялась по отметкам на центр линии и на неблендирующееся крыло. Соответствующие полуширины отмечены индексом «+».

Проведено также *сравнение асимметрии* скорректированных и нескорректированных профилей. На рис. 4 приведены оси симметрии двух узких (λ 6187,4 и λ 6098,2) и двух широких (λ 6188,9 и λ 6052,6) линий в нескорректированном и скорректированном за инструментальный профиль спектре. Как видно, изменение асимметрии несущественно. В то же время наблюдается значительное смещение ядра линии в сторону увеличения λ на $\sim 2\,m$Å, что объясняется асимметрией инструментального профиля двойного монохроматора ГАО АН УССР.

Асимметрия

Исследование асимметрии не являлось специальной целью настоящей работы, так как точность нанесения оси профиля для слабых линий невысокая, притом изучение асимметрии требует специального выбора линий и особой тщательности наблюдений. Однако имеющийся в нашем распоряжении материал разумно было использовать для изучения хотя бы некоторых особенностей асимметрии. С этой целью для профилей всех линий, полностью свободных от бленд, были построены их оси и произведено сравнение особенностей симметрии с рядом характеристик линий, как то: принадлежность химическому элементу или иону, величины потенциалов возбуждения и ионизации и т. д.

Качественный анализ асимметрии при переходе центр—край позволил выявить только следующие закономерности: 1) в общем преобладает положительная асимметрия (более пологое красное крыло); 2) асимметрия четче выражена для более глубоких линий, что вполне закономерно, так как в этих линиях диапазон оптических глубин при переходе от ядра к крыльям больше, чем в слабых линиях; 3) отмечается большая и во всех случаях положительная асимметрия для линий FeII.

Количественная асимметрия оценена следующим образом. Ось профиля аппроксимировалась прямой линией и определялась алгебраическая разность A отсчетов λ на эту ось в крыльях ($d \approx 0{,}1\,d_0$) и в центральной части ядра ($d \approx 0{,}9\,d_0$). Асимметрия в центре ($A_ц$) и на краю диска Солнца ($A_к$), а также асимметрия, усредненная для всех пяти положений на диске ($A_{ср}$), представлены в последних графах табл. 1. Результаты позволяют четко выявить преобладание положительной асимметрии со значительным уменьшением этого эффекта близ края диска. Это хорошо демонстрируется усреднением асимметрии по всем линиям (табл. 1, последняя строка).

Мы анализировали таким же способом данные Р. Костика и Т. Орловой [4], которые относятся к более интенсивным линиям *. В общем получены те же выводы. При этом эффект положительной асимметрии выявлен четче: в центре диска только одна линия имеет отрицательную асимметрию. В большей степени проявляется также уменьшение положительной асимметрии к краю диска, хотя «краевые» наблюдения в [4] относятся к $\cos\Theta = 0{,}44$. Соответствующие средние значения $A_ц$ и $A_к$ равны $+6{,}6$ и $+1{,}8\,m$Å.

Сравнивалась также асимметрия одних и тех же линий по наблюдениям в разные дни (рис. 5). На рисунке оси профилей, относящиеся к двум разным датам наблюдений, совмещены в наиболее глубоких

* Из анализа исключена линия λ 6238,39 FeII, на которую накладывается линия SiI.

частях профилей линий. Как видно, для некоторых линий различие асимметрии достигает 10 *m*Å. Для очень слабых линий с глубиной $d_0=3-5\%$ ошибка в определении ширины профиля линии может достигать нескольких *m*Å. Соответственно ось в этих участках профиля будет сдвигаться на половину величины этой ошибки. Можно допустить в нанесении оси профиля величину ошибки 2—3 *m*Å. Однако не следует приписывать ошибкам наблюдений различие асимметрии, наблюдающееся в некоторых случаях на рис. 5.

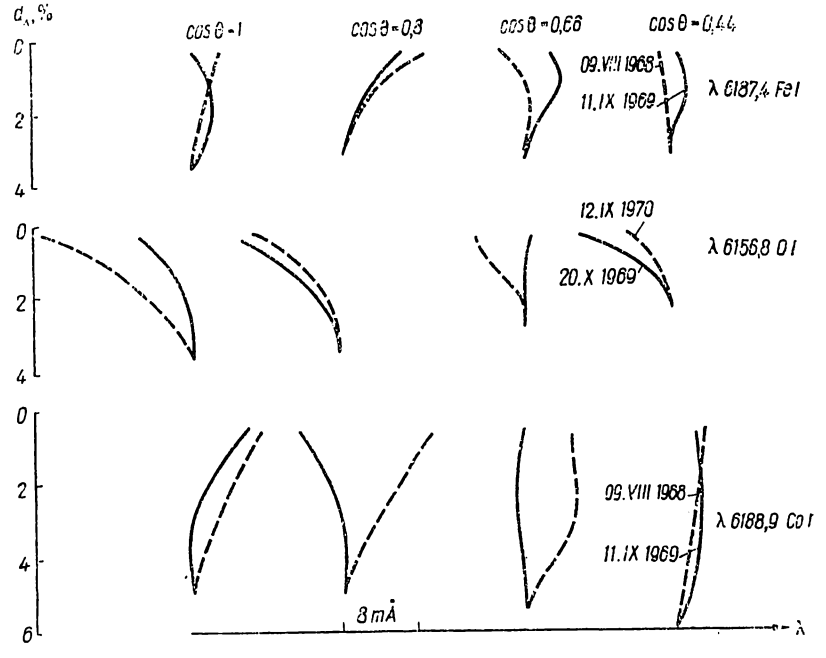

Рис. 5. Сравнение асимметрии линий по наблюдениям в разные дни.

Дискуссия. При составлении программы наблюдений мы не производили селекцию линий на предмет наличия сверхтонкой структуры. СТС обусловливается магнитным взаимодействием между ядром и электронной оболочкой атома. Линии изотопов, состоящих в примеси элемента, могут обладать своей структурой и, кроме того, давать изотопический сдвиг уровней по отношению к системе уровней главной компоненты элемента. Таким образом, эффект в общем может иметь очень сложный характер.

Результаты ряда вышедших недавно работ [5, 6] указывают на существенное влияние СТС на профили фраунгоферовых линий многих элементов, в частности Co I, V I, Mn I и др. Не подвержены влиянию СТС линии элементов, не имеющих в своем составе в заметных количествах изотопов и обладающих четными зарядовыми и атомными числами [7]. Согласно Абту [8], линии Si I, Ca I, Cr I, Fe I не расширяются, а линии Mg I, Zn I, Ti I, Ni I могут подвергаться ощутимому влиянию СТС, связанной с наличием изотопов. Холвегер [9] не допускает расширения линий Si I, Ti I, Cr I и Fe I. Несомненно, профили многих линий табл. 1 подвержены влиянию СТС. Сравнительно большие ошибки в определении асимметрии для очень слабых линий также искажают эффект асимметрии, который связан с полем скоростей и температурными неоднородностями в фотосфере. С другой стороны, большое различие в асимметрии для разных линий является, по-видимому, реальным фактом. Оно имеет место по крайней мере при объяснении асимметрии бегущей звуковой волной [10].

Перечисленные обстоятельства затрудняют экспериментальное исследование характера асимметрии, обусловленной физическими неоднородностями фотосферы. Если предположить, что влияние СТС исключается в статистике, то наблюдающийся эффект преобладания положительной асимметрии должен отражать реально существующую физическую ситуацию в фотосфере. Расчеты Р. Костика [10] также выявляют в большинстве случаев положительную ассиметрию и подтверждают наблюдающееся уменьшение асимметрии к краю. Последний эффект вполне закономерен при распространении бегущей звуковой волны в радиальном направлении. Однако подобный эффект должен иметь место также при объяснении асимметрии конвективными движениями.

Большая и только положительная асимметрия у ионов железа, возможно, связана с эффектом СТС. Другое возможное объяснение — особенности образования линий Fe II в условиях фотосферы. Линии Fe II отличаются от других линий табл. 1 наибольшим потенциалом ионизации и большой разностью потенциала ионизации и возбуждения (10—12 *эв*). Единственная линия в табл. 1 с подобной характеристикой λ 6320,429 La II имеет столь же большую и положительную асимметрию ($\approx \pm 11$ *mÅ*). Возможная связь такого рода асимметрии с величиной разности потенциалов ионизации и возбуждения потребует дальнейшей проверки.

Заслуживает еще внимания различие асимметрии по наблюдениям в разные дни. Если этот эффект реальный и наблюдается только для очень слабых линий, то он может объясняться крупномасштабными фотосферными движениями на больших глубинах ($\tau_0 \approx 1$). В этом случае следует ожидать различия асимметрии по наблюдениям в разные дни в крыльях интенсивных линий. Возможно также изменение со временем характеристик мелкомасштабного поля скоростей, что будет вызывать изменение асимметрии всей линии в данном участке диска Солнца.

Эти предположения потребуют тщательной проверки путем исследования асимметрии одних и тех же линий в разные даты, а также в разных участках диска Солнца.

Ширины линий

Под термином «ширина линий» мы будем понимать наблюдаемую полуширину, исправленную за инструментальные ошибки и тепловую скорость движения поглощающих атомов. В конкретном случае эквивалентом этой полуширины может быть турбулентная скорость на заданной оптической глубине в направлении луча зрения.

Увеличение ширины слабых линий при переходе к краю является в настоящее время достоверным наблюдательным фактом. Однако особенности различия ширины фраунгоферовых линий разных элементов или даже разных линий одного элемента пока еще не исследованы. В первую очередь целесообразно изучить особенности различия ширины разных линий в центре диска и характер изменения ширины этих линий при переходе центр—край.

Можно предположить следующие причины различия ширины линий: 1) влияние сверхтонкой и изотопической структуры; 2) неправильная оценка оптической глубины τ_0 эффективного слоя образования линии; 3) наличие в фотосфере мелкомасштабных макроскопических областей с большой разницей температур. В этом случае одни линии преимущественно образуются в горячих областях, другие — в холодных.

Характер изменения ширины линий центр—край дает дополнительный материал для обсуждения 1—3-го пунктов.

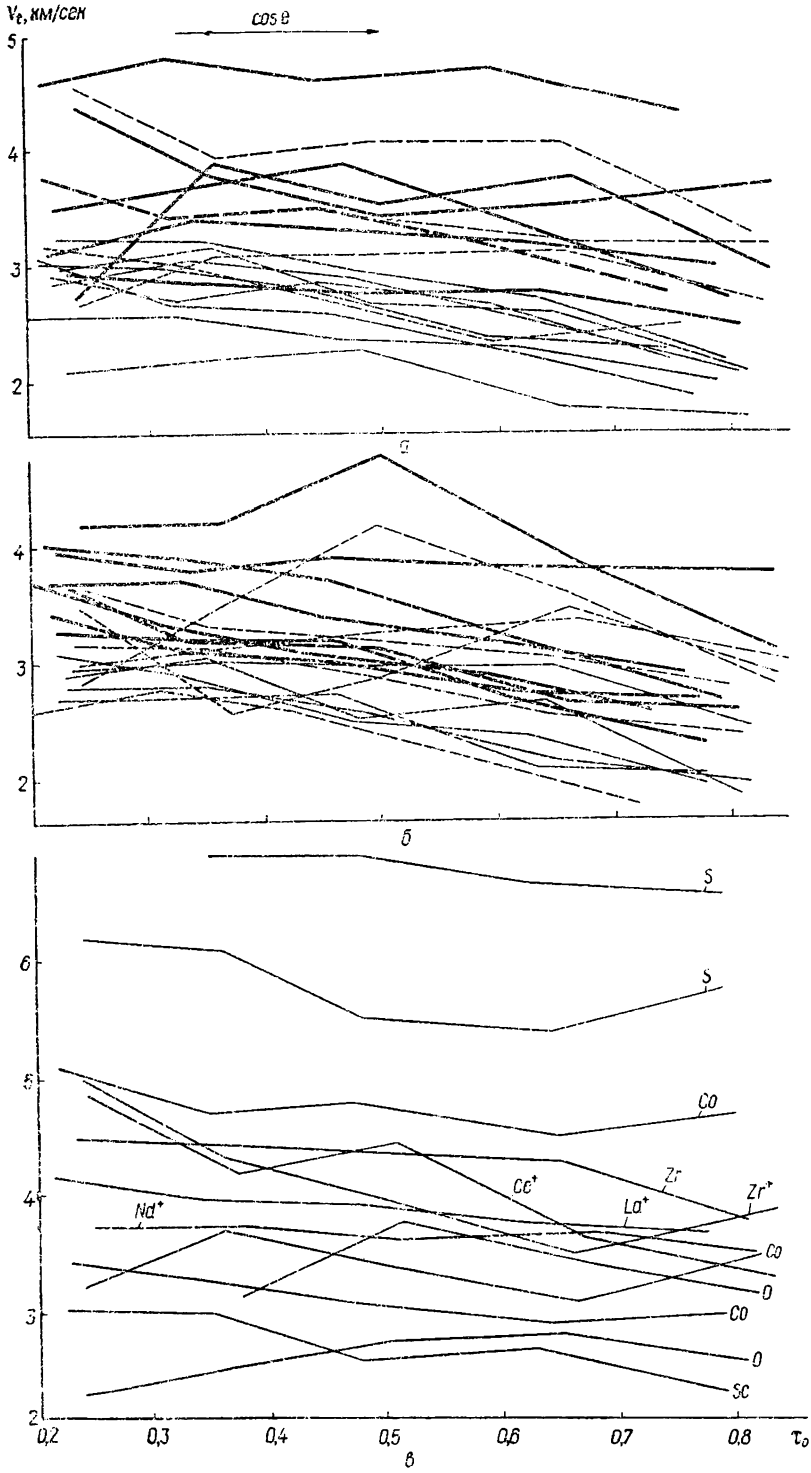

Рис. 6. Турбулентные скорости при переходе центр—край:
а — по линиям Fe I (———), Fe II (— — —), Si I (———), Cr I (— — —); *б* — по линиям Ti I (———), Ni I (— — —), V I (———); *в* — по линиям остальных элементов табл. 1.

В табл. 1 приведены оптические глубины τ_0 в континууме для $\lambda = 5000$ Å, относящиеся к половине центральной интенсивности, а также соответствующие значения турбулентных скоростей V_t. На рис. 6 результаты представлены графически: а) для линий, которые, согласно Абту [8], не имеют СТС, а также линий Fe II; б) для линий V I, Ni I и Ti I; в) для всех остальных линий, в основном линий редких элементов. Ход V_t с τ_0, усредненный отдельно по линиям Fe I, Fe II, Ti I, Si I, Ni I, V I и по всем остальным линиям, представлен на рис. 7.

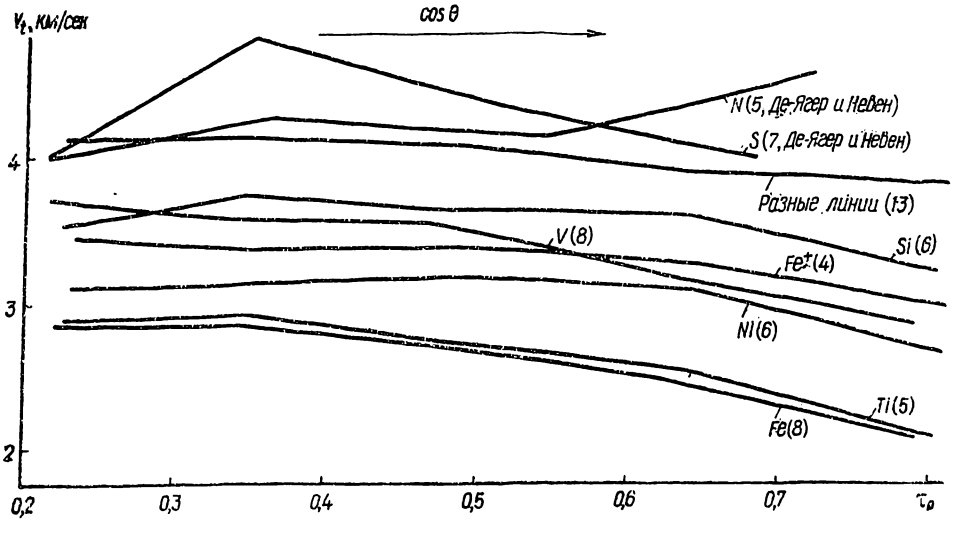

Рис. 7. Средние турбулентные скорости по линиям разных элементов. Возле каждого элемента в скобках указано количество измеренных линий.

Анализ данных позволяет отметить следующие общие закономерности.

1. Увеличение V_t к краю диска, отмеченное в [1], а также в других более ранних работах, четко подтверждается на настоящем материале. Все линии обнаруживают эту тенденцию. Некоторые отклонения отдельных измерений от общей закономерности наблюдаются для немногих линий, в основном очень слабых ($1{,}5\% < d_0 < 3\%$), полуширины которых определяются менее точно.

2. Увеличение V_t к краю менее резко выражено для более широких линий. Это особенно отчетливо видно на рис. 7 по результатам усреднения V_t для большого числа широких линий разных элементов.

3. Четко проявляется уменьшение градиента роста V_t по мере перехода к краю. Ширина всех линий в среднем достигает максимума близ $\cos\Theta = 0{,}35$ и далее практически не изменяется. Для линий Si I отмечается спад V_t близ края диска.

4. Измерения по линиям Fe I и Ti I дают одинаковые результаты. Ширины этих линий наименьшие и изменение их при переходе центр—край выражено наиболее четко.

Дискуссия. 1. *Влияние СТС.* Данные наших наблюдений позволяют допустить отсутствие эффекта СТС для линий Fe I и Ti I. Линии Si I и единственная наблюденная нами линия Cr I λ 6135,775 значительно шире линий титана и железа. К сожалению мы не наблюдали линий Ca I.

Линии Sc I, согласно [8], подвержены влиянию СТС. Тем не менее, наблюденная нами линия Sc I λ 6239,34 имеет ширину такого же по-

рядка, как и линии железа, титана. Линии Ni I в среднем также широкие, хотя в отдельности они имеют самые разнообразные ширины.

Линии других элементов ведут себя по-разному, и в общем они значительно шире линий Fe I и Ti I. Большая ширина линий Co I и V I объясняется влиянием СТС. Действительно, согласно расчетам Гайде [5], эффект СТС для этой группы линий может вдвое увеличивать их реальную ширину. Линии ионов редких земель, а также линии Zr I и Zr II имеют большие и очень близкие ширины (рис. 8), хотя не все из

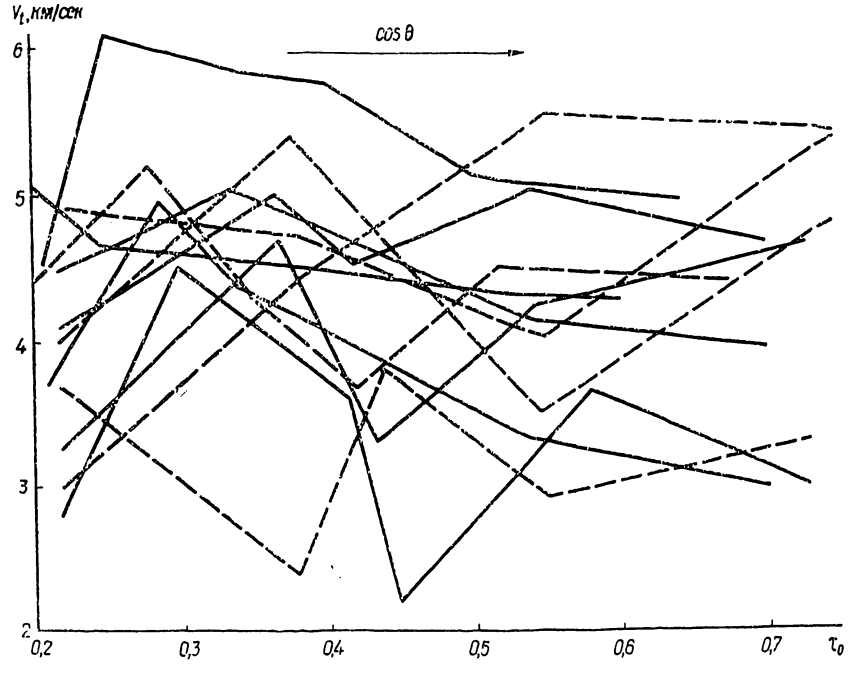

Рис. 8. Турбулентные скорости по линиям S I (——), N I (— — —) (наблюдения де Ягера и Невена [11]).

этих элементов обладают нечетными атомными и зарядовыми числами. Большая ширина линий Fe II по сравнению с Fe I может указывать на появление эффекта СТС у ионов железа. Поведение двух линий O I весьма неопределенно. Потребуются еще дополнительные наблюдения линий кислорода.

Обращает на себя внимание исключительно большая ширина линий S I. Эти линии могут быть расширены только из-за наличия изотопных примесей элемента, так как у серы четные зарядовое и атомное числа. К сожалению, мы вынуждены были включить эти частично блендирующиеся линии в обработку из-за отсутствия других более подходящих линий. Однако только блендированием не может объясняться столь большая ширина этих линий. Поэтому для уточнения данных о ширине линий S I мы воспользовались наблюдениями де Ягера и Невена [11] в области спектра близ λ 8680 Å. В цитируемой работе имеются наблюдения очень слабых линий серы и азота. Контуры этих линий были обработаны так же, как и линии табл. 1. Соответствующие значения V_t представлены на рис. 8, а их средние значения представлены на рис. 7. Разброс отдельных измерений на рис. 8 очень большой, однако общая картина (рис. 7) представляется такой же, как и по нашим данным для наиболее широких линий. Большая ширина линий серы подтверждается. Столь же широки линии азота.

Меньший рост V_t для широких линий при переходе центр—край легко объясняется влиянием СТС. Действительно, в простейшем случае, если действие СТС подобно допплеровскому расширению, то наблюдаемая турбулентная скорость $V_t^2=(V_t')^2+c^2$, где c — расширение, обусловленное СТС и не изменяющееся при переходе центр—край, а V_t' — реальная турбулентная скорость. Очевидно, что при возрастании параметра c абсолютное изменение V_t будет уменьшаться.

Эффект уменьшения градиента роста V_t при приближении к краю диска отражает, по-видимому, особенности мелкомасштабного поля скоростей в фотосфере. Сам эффект не дает достаточно данных для определения параметров этого поля скоростей.

Реальная ширина линий в фотосфере и характер ее изменения при переходе центр—край может быть оценена пока только по данным измерений линий Fe I и Ti I. Возможная интерпретация эффекта центр—край в рамках анизотропных зависящих от глубины турбулентных движений выражена кратко в нашей предыдущей работе [1]. Если же допустить независящее от глубины поле анизотропных турбулентных движений, то по линиям Fe I и Ti I получим: $V_t^{tang}=2{,}9$ *км/сек*, $V_t^{rad}=2{,}0$ *км/сек*.

Эти значения можно считать наиболее правдоподобными для такой модели поля турбулентных скоростей.

2. *Ошибки в оценке оптической глубины* могут вызываться как неточностью метода оценки τ_0, так и отличием функции источника от функции Планка.

Ошибки применяемого нами метода (см., например, [12]) не превышают несколько сотых в оцениваемой величине τ_0. Эмпирическое определение функции источника [13, 14, 15] показывает, что в диапазоне глубин $0{,}2<\tau_0<1$ отождествление функции источника с функцией Планка не вызывает в оценке τ_0 ошибки, превышающей 0,05. Такого порядка ошибки не могут заметно повлиять на ход V_t с τ_0 как вследствие изменения шкалы τ_0, так и вследствие ошибочно оцениваемых по τ_0 температурных поправок в измеряемых полуширинах линий.

3. *Наличие больших температурных неоднородностей.* В последнее время в ряде работ Шилли и Чэпмэна [16, 17] указывается на возможность существования в фотосфере мелких областей (LGR) с большими магнитными полями и, возможно, с большим различием других физических характеристик по сравнению с окружающей средой.

Если допустить существование областей с высокой температурой, то следует ожидать большой ширины в первую очередь у линий с высокими потенциалами возбуждения и малым атомным весом элемента, т. е. в данном случае у линий Si I, O I, S I, N I. Линии всех этих элементов, за исключением кислорода, действительно очень широкие. С другой стороны, чтобы привести ширину линий Si I (рис. 7), которые не должны иметь СТС, к ширине линий Fe I и Ti I, необходимо допустить температуру порядка 10 000°. Наличие отдельных областей в фотосфере с такой высокой температурой мало правдоподобно. Однако большая ширина линий Si I является реальным фактом. Именно поэтому Бэлл и Мэлтцер [18], интерпретируя наблюдаемую ширину линий Si I, C I и Fe I в рамках температурного расширения при одинаковой турбулентной скорости, получили в фотосфере температуру порядка 10—11 тысяч градусов.

Основные выводы

1. Асимметрия очень слабых линий весьма разнообразна. В значительной степени это разнообразие может быть связано со сверхтонкой структурой многих линий. Однако в среднем преобладает положитель-

ная асимметрия (пологое красное крыло), которая почти исчезает близ края диска Солнца. Качественно эти данные согласуются с теоретической интерпретацией асимметрии [10] бегущей звуковой волной.

2. Наблюдения одних и тех же линий в разные даты указывают на возможное изменение асимметрии со временем.

3. Турбулентные скорости (V_t), вычисленные по ширинам линий элементов Sc I, V I, Si I, Ni I, Ce II, Fe I, Co I, Zr I, Zr II, Fe II, Nd II, Ti I, S I, Cr I, N I, La II, O I, обнаруживают большое разнообразие. Однако для всех линий проявляется эффект увеличения ширины к краю диска. Наименьшие и очень близкие значения ширин (V_t) у линий Ti I и Fe I. Эти линии дают также наиболее четкий и максимальный по величине эффект центр—край. Возрастание V_t к краю диска прекращается близ $\cos\Theta=0{,}35$. Очень широки линии легких элементов S I, Si I, N I.

4. Ошибками в оценке глубины образования линий нельзя объяснить аномально большую ширину линий. Если объяснять ширину некоторых линий наличием высокотемпературных областей в фотосфере, в этих областях следует ожидать температуры, неправдоподобной для физических условий в фотосфере на уровне образования фраунгоферовых линий.

5. Эффект сверхтонкой и изотопической структуры в значительной степени изменяет форму и ширину профилей многих фраунгоферовых линий. Однако еще мало сведений о влиянии СТС, в частности нет четкого критерия для оценки величины эффекта или принадлежности тех или других линий к категории подвергаемых влиянию СТС.

Количественные фотосферные исследования, связанные с измерениями и расчетом профилей фраунгоферовых линий, могут быть в значительной степени ошибочны из-за влияния сверхтонкой и изотопической структуры.

Исследование профилей слабых фраунгоферовых линий будет продолжаться.

Автор благодарит В. Аврамчука и Л. Цыруль за помощь в обработке материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртовенко Э. А., Кондрашова Н. Н. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 9. «Наукова думка», К., 1970.
2. Гуртовенко Э. А. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 8. «Наукова думка», К., 1969.
3. Rogerson J. — Astrophys. J., 1957, **125**, 275.
4. Костик Р. И., Орлова Т. В. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 9. «Наукова думка», К., 1970.
5. Heide K. — Z. Astrophys., 1968, **69**, 220.
6. Holweger H., Oertel K. B. — Astron. and Astrophys., 1971, **10**, 434.
7. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов, ГИФМЛ, М., 1963, § 91.
8. Abt A. — Astrophys. J., 1952, **115**, 199.
9. Holweger H. — Z. Astrophys., 1967, **65**, 365.
10. Костик Р. И. — Настоящий сборник.
11. Jager C., de, Neven L. — Bull. Astr. Inst. Netherlands, Suppl. **1**, 8, 325.
12. Dunn A. R., Oson E. C. — Solar Phys., 1971, **16**, 272.
13. Jager C., de, Neven L. — Solar Phys., 1968, **3**, 159.
14. Altrock R. C. — Solar Phys., 1969, **7**, 3.
15. Гуртовенко Э. А., Федорченко Г. Л. — Настоящий сборник.
16. Sheeley N. R. — Solar Phys., 1967, **1**, 171.
17. Chapman G. A., Sheeley N. R. — Solar Phys., 1968, **5**, 442.
18. Bell B., Meltzer A. — Smith. Contr. Aph., 1959, **3**, 5, 39.

THE CENTRE-TO-LIMB CHANGE OF THE FAINT FRAUNHOFER LINE PROFILES
II. ASYMMETRY AND WIDTH OF THE LINES

E. A. GURTOVENKO

Summary

The profiles of fifty very faint Fraunhofer lines are studied. The accuracy of the observations and data processing are analyzed.

Asymmetry of the lines is highly diversive. The predominance of the asymmetry with the sloped red wing appears to be the only regularity. This effect almost disappears near the limb.

Turbulent velocities V_t as deduced from the lines of various elements differ essentially. But the lines of all the elements show an increase in their width toward the limb. This effect is less for the wide lines.

The anomalously large width for most lines may be explained only by the hyperfine and isotopic structure (HFS). The Fe I and Ti I lines are the narrowest, they seem to be not influenced by HFS. For the supposed model of the anisotropic depth-independent velocity field the Fe I and Ti I lines give the following V_t=components: $V_t^{rad}=2.0\frac{km}{sec}$, $V_t^{tang}=2.9\frac{km}{sec}$.

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕЛ-САТЕЛЛИТОВ ПО СРЕДНИМ РАССТОЯНИЯМ В СИСТЕМАХ СОЛНЦА, ЮПИТЕРА, САТУРНА И УРАНА

Ю. К. Гулак

Вопросу о распределении тел-сателлитов по средним расстояниям от центрального тела в Солнечной системе посвящено много работ [1, 2, 3 и др.]. Их авторы стремились в основном описать наблюдаемую картину, используя для этого те или иные теоретические предпосылки. Меньше внимания уделялось анализу накопленных данных наблюдений с целью выявления неизвестных ранее «эмпирических» закономерностей, которые могли бы представить некоторый интерес. В этой статье излагаются результаты такого анализа.

1. Обычно когда говорят о распределении тел-сателлитов по средним расстояниям от Солнца, принимают во внимание лишь большие планеты, помещая в районе кольца астероидов одно компактное гипотетическое образование. Очевидно, в этом косвенно сказывается влияние правила Боде—Тициуса, сыгравшего важную роль в открытии малых планет.

Известно, что астероиды распределены по большим полуосям орбит далеко не равномерно. На одних расстояниях наблюдаются резкие сгущения орбит, на других, наоборот, глубокие минимумы, а иногда и полное отсутствие орбит. Эти области, так называемые люки, разделяют общее кольцо астероидов на ряд отдельных колец.

Довольно четко выделяются кольца с границами (в *а. е.*): I — 1,850—1,950; II — 2,160—2,310; III — 2,310—2,490; IV — 2,510—2,820; V — 2,830—2,900; VI — 2,915—3,080; VII — 3,080—3,250; VIII — 3,350—3,460; IX — 3,905—4,005 *.

Если усреднить значения больших полуосей a_n в кольце, т. е. найти величину $a_0=\frac{\Sigma n a_n}{N}$, где N — число астероидов в кольце, и затем представить единую картину распределения по средним расстояниям боль-

* К IX кольцу отнесены два астероида со средним расстоянием 3,69 *а. е.*