

УДК 523.9

## О качестве измерений общего магнитного поля Солнца: факты, проблемы, гипотезы

*В.А. Котов, Т.Т. Цап*

Крымская астрофизическая обсерватория, пос. Научный, Крым 98409

Поступила в редакцию 14 мая 2004 г.

**Аннотация.** В 2001 – 2003 гг. общее магнитное поле, ОМП, Солнца в КраО измерялось по двум линиям поглощения железа,  $\lambda 524.7$  и  $\lambda 525.0$  нм, с факторами Ланде  $g = 2$  и  $3$  соответственно. Коэффициент регрессии для 316 пар “одновременных” суточных значений ОМП по двум линиям равен 0.85; однако он существенно изменился при переходе от 2001 г. к 2003 г. (от 0.69 к 0.88).

Рассмотрено также более 13 тыс. измерений ОМП, выполненных за последние 36 лет в четырех обсерваториях по линии 525.0 нм. Показано, что результаты разных лет и разных магнитографов значительно расходятся. Коэффициенты линейной регрессии изменяются иногда более чем вдвое, что трудно приписать инструментальным или солнечным причинам. Плохо согласуются и измерения, выполненные на разных инструментах по двум линиям Fe I. Сделан вывод, что различия обусловлены изменением структуры поля фотосферы и квантовой природой света. Наилучшее приближение к правильному ОМП дает усреднение данных разных инструментов. Приведены списки новых крымских измерений за 2002 – 2003 гг. и средняя кривая изменения ОМП с главным периодом вращения 26.898 сут (показывающая значительную асимметрию N– и S-полярностей).

ON THE QUALITY OF MEASUREMENTS OF THE SOLAR MEAN MAGNETIC FIELD: FACTS, PROBLEMS, HYPOTHESES, *by V.A. Kotov and T.T. Tsap*. In 2001–2003 the mean magnetic field, MMF, of the Sun was measured in the CrAO by the two absorption lines of iron,  $\lambda 524.7$  and  $\lambda 525.0$  nm, with Lande factors  $g = 2$  and  $3$  respectively. The regression coefficient for 316 pairs of “simultaneous” MMF daily values as measured in these two lines is equal to 0.85; it changed however significantly between 2001 and 2003 data (0.69 and 0.88, correspondingly).

More than 13 thousand, in total, daily MMF records obtained at four observatories in the 525.0 nm line during last 36 years are also analysed. It is shown that the results of different years and various magnetographs differ substantially from each other. The linear regression coefficients vary sometimes by more than twice; this can hardly be explained by instrumental or solar causes only. There are also remarkable discrepancies between MMF values measured by different instruments in those two spectral lines of neutral iron. It is concluded that the discrepancies are caused by changes of the structure of photospheric magnetic fields and quantum nature of light itself. The best approximation of the true MMF value can be obtained by averaging of measurements performed with the use of several instruments. The lists of the Crimean MMF measurements 2002 – 2003 are presented, together with the average MMF curve plotted for the main rotation period 26.898 d (demonstrating strong asymmetry between N and S polarities).

**Ключевые слова:** Sun, magnetic field

---

## 1 Введение

Накопление новых наблюдательных фактов в физике Солнца последние три десятилетия опережает развитие теории. К фактам следует отнести такие “макрофизические” явления, как 11-летний цикл активности, дефицит нейтрино, тонкая структура магнитного поля, механизм нагрева короны, мелкомасштабные фотосферные “диполи”, пекулярное вращение глубоких солнечных недр, активные долготы, глобальные колебания фотосферы, секторная структура общего магнитного поля, ОМП, Солнца и разброс напряженностей поля, измеренного по разным спектральным линиям, или  $\delta$ -эффект (Говард, Стенфло, 1972; Стенфло, 1973; Демидов и др., 2002).

На основе различия напряженностей, измеренных по разным линиям, в 70-е годы прошлого века сделан вывод о сверхтонкой структуре поля “спокойной” фотосферы – наличии элементов/фибрил/жгутов/волокон/трубок размером менее 0.5 угл.сек. и концентрированным полем 1.0 – 1.5 Гс (Говард, Стенфло, 1972; Стенфло, 1973). Сильное поле приводит к “насыщению” сигнала магнитографа; увеличение же температуры в “элементах” ведет к ослаблению глубины линии и к дополнительному падению сигнала (для линий с низким потенциалом возбуждения, в частности, для Fe I  $\lambda 525.022$  нм с фактором Ланде  $g = 3$ ).

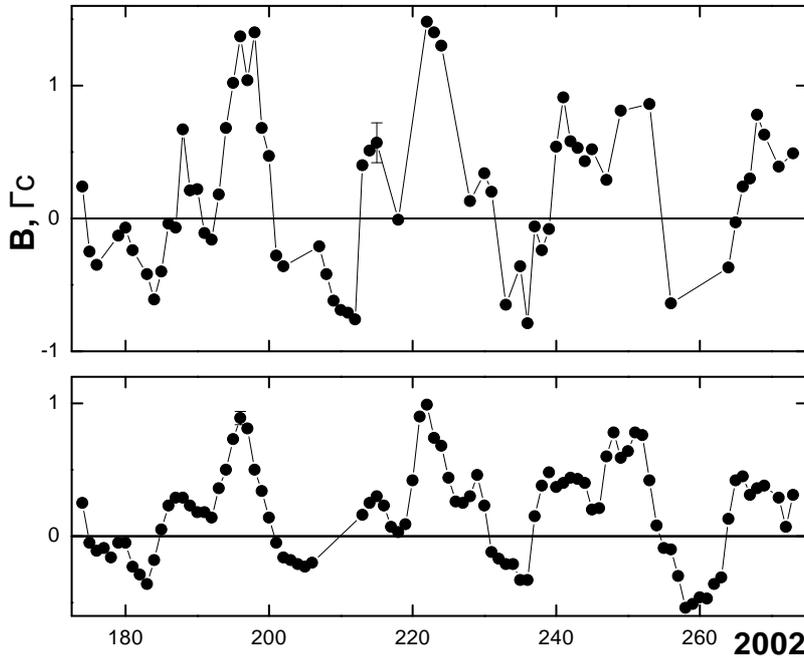
Недавно Демидов и др. (2002), измерив ОМП по разным линиям, стимулировали интерес к качеству измерений магнитного поля Солнца (аналогичная проблемная ситуация имеет место и у других магнитных звезд). По надежным и статистически обоснованным измерениям ОМП можно пытаться ответить на вопрос, что определяет разброс: (1) само Солнце, с его сверхтонкой магнитной структурой, насыщением магнитографа в элементах сильного поля и расхождением силовых линий с высотой, или (2) чисто инструментальные причины, или дело – (3) в природе самого света (имеется в виду квантовая нелокальность фотонов: эффекты “сцепления” и “слияния” фотонов, экспериментально доказанные недавно в лабораториях, см. Бувместер и др., 1997, Сантори и др., 2002, а также принцип неопределенности Гейзенберга), или (4) комбинация указанных причин.

Измерения ОМП Солнца как звезды, начатые в 1968 г. в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО = СгАО; Северный, 1969; Котов и др., 1998с), обычно ведутся по фотосферной линии поглощения 525.0. Уже опубликовано более 13 тыс. суточных значений ОМП, с напряженностью  $B$ , полученных за последние 36 лет в четырех обсерваториях: КрАО, Обсерватории Маунт-Уилсон, ОМУ, Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ = WSO) Стэнфордского университета и Саянской солнечной обсерватории (ССО, Иркутск). Подробнее о методе измерений и самих данных см. Шеррер (1973, 2004), Шеррер и др. (1977), Григорьев и Демидов (1987), Котов и др. (1998с, 2002).

В свете от всего диска Солнца регистрируется продольный эффект Зеемана, для чего применяется солнечный магнитограф Бэбкока. Напряженность ОМП пропорциональна магнитному потоку через видимую полусферу Солнца с весовой функцией, определяемой потемнением диска к краю. Это, по существу, *магнитный разбаланс* фотосферы: превышение потока одной полярности над потоком другой полярности.

Измерения ОМП могут прояснить ситуацию с  $\delta$ -эффектом. Главное то, что в таких исследованиях (а) Солнце – точнее, его видимая полусфера, – выступает как “стандарт” для разных инструментов, (б) все регулярные измерения, обсуждаемые здесь, сделаны по одной и той же линии, 525.0, или (в) по одной и той же паре линий, 525.0 и Fe I  $\lambda 524.706$  нм,  $g = 2$ . Измерения, выполненные в течение данных УТ-суток разными инструментами, считаем “одновременными”, т.к. изменение ОМП за сутки, как правило, мало.

При наблюдениях ОМП имеем дело со *слабым* эффектом Зеемана, при заведомом отсутствии инструментальных нелинейных эффектов, – если отвлечься от насыщения, обусловленного потенциальными элементами сильного поля. Подчеркнем, что измеряется круговая поляризация в крыльях линии, чувствительной к магнитному полю. А это подразумевает однозначное соответствие между степенью поляризации и напряженностью продольного поля, – с точностью до  $\delta$ -эффекта, погрешностей калибровки, случайных ошибок и влияния асимметрии профиля линии (Демидов и др., 2002). Измерения ОМП поэтому могут пролить свет на причину расхождений данных разных магнитографов: связано ли это с магнитной активностью Солнца, со сверхтонкой структурой его



**Рис. 1.** Ход ОМП с 23 июня по 30 сентября 2002 г. по измерениям в КраАО, вверху, и СОУ, внизу (точки, соединенные отрезками прямых линий). По горизонтали – порядковый номер суток, вертикальными черточками указаны типичные ошибки

магнитного поля, с особенностями инструментов или, например, с природой самого света, физикой “фотонов” и актом измерения?

## 2 Регулярные измерения ОМП, 1968 – 2003 гг.

Информация о всех массивах ОМП за 36 лет содержится в табл. 1, где  $N$  – число суточных значений ОМП,  $S$  – стандартное отклонение. Ранее обращалось внимание на возможную зависимость сигнала от положения выходных щелей магнитографа. Поэтому в таблице приводим и расстояния выходных щелей фотометров, отсчитываемые от центра линии при измерениях ОМП ( $A - B$  – интервал крыльев линии, где регистрировалась поляризация,  $C$  – расстояние между центром этого интервала и центром линии).

**Таблица 1.** Сведения о массивах ОМП

Обсерватория	Интервал, гг.	$N$	$S$ , Гс	$A-B$ , пм	$C$ , пм
Крым	1968–2003	2261	0.69	3.5 – 9.0	6.3
Маунт–Уилсон	1970–1982	2457	0.67	0.9 – 8.4	4.7
Стэнфорд	1975–2003	8550	0.42	0.9 – 8.4	4.7
Саяны	1982–1993	313	0.77	1.4 – 5.6	3.5

Данные КраАО за 2001 г. опубликованы Ханейчуком и др. (2003). Однако для некоторых дат мы уточнили положение нуля-пункта магнитографа, поэтому в табл. 2 приводим 26 исправленных значений за 2001 г. Списки 316 новых, еще не публиковавшихся, крымских данных 2002 – 2003 гг. даются в табл. 3 и 4.

Суммарное число измерений – четырех обсерваторий – равно  $N = 13581$ , но только часть данных, при совпадении дат, можно подвергнуть корреляционному анализу. Никакие поправочные коэффициенты и факторы насыщения не вводились (кроме п. 12, с нормировкой массивов для получения общего временного ряда 1968 – 2003 гг.). Положительные  $B$  отвечают N-полярности, неопределенности же всюду соответствуют стандартной ошибке  $\pm 1\sigma$ .

**Таблица 2.** Исправленное ОМП за 2001 г. (КраО, линия 525.0,  $N = 26$ )

Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс
сентябрь		сентябрь		октябрь		октябрь		октябрь		ноябрь	
11	0.50	21	-0.15	2	-0.04	9	-0.31	26	-0.30	4	-1.10
14	-0.24	22	-0.07	3	0.32	10	-0.54	27	-0.76	8	0.20
16	0.18	23	0.29	4	0.28	18	-0.04	28	-0.52	9	0.42
19	-0.50	24	0.58	5	0.18	19	0.37				
20	-0.60	27	0.92	8	-0.57	25	-0.02				

**Таблица 3.** Измерения ОМП в 2002 г. (КраО, линия 525.0,  $N = 157$ )

Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс
март		май		июнь		июль		август		октябрь	
15	-0.91	1	-0.27	3	0.01	12	0.18	23	-0.36	6	0.97
17	-1.63	2	-0.11	10	0.30	13	0.68	24	-0.79	10	-0.87
18	-1.31	3	-0.08	13	-0.06	14	1.02	25	-0.06	12	-1.00
20	-0.50	4	0.09	14	0.46	15	1.37	26	-0.24	21	0.63
22	0.01	5	0.65	15	0.58	16	1.04	27	-0.08	22	0.89
30	0.93	6	0.62	16	0.83	17	1.40	28	0.54	23	0.34
31	1.29	8	-0.31	17	0.39	18	0.68	29	0.91	26	0.05
апрель		9	-0.75	18	1.06	19	0.47	30	0.58	ноябрь	
1	0.79	10	-0.84	20	1.33	20	-0.28	31	0.53	1	1.07
2	0.15	11	-0.89	21	0.69	21	-0.36	сентябрь		8	-0.88
3	-0.28	12	-0.59	22	0.53	26	-0.21	1	0.43	13	-1.41
4	-0.32	13	0.22	23	0.24	27	-0.42	2	0.52	14	-1.18
5	-0.34	14	0.29	24	-0.25	28	-0.62	4	0.29	15	-0.30
10	-0.91	15	0.47	25	-0.35	29	-0.69	6	0.81	16	0.16
11	-0.94	16	0.41	28	-0.13	30	-0.71	10	0.86	17	0.78
12	-0.98	17	0.38	29	-0.07	31	-0.76	13	-0.64	18	0.59
15	-1.01	18	0.20	30	-0.24	август		21	-0.37	19	0.83
16	-0.54	19	0.25	июль		1	0.40	22	-0.03	21	0.31
17	0.48	20	0.69	2	-0.42	2	0.51	23	0.24	22	0.35
18	0.42	21	0.67	3	-0.61	3	0.57	24	0.30	23	0.10
22	0.27	22	1.03	4	-0.40	6	-0.01	25	0.78	27	1.10
23	0.22	23	1.02	5	-0.04	10	1.48	26	0.63	декабрь	
24	0.79	25	0.52	6	-0.07	11	1.40	28	0.39	1	-0.10
26	0.86	26	0.07	7	0.67	12	1.30	30	0.49	3	-0.86
27	0.76	27	-0.61	8	0.21	16	0.13	октябрь		5	-0.77
28	0.99	29	-0.62	9	0.22	18	0.34	1	0.28		
29	0.52	июнь		10	-0.11	19	0.20	3	1.04		
30	0.16	1	-0.46	11	-0.16	21	-0.65	4	1.07		

### 3 Сопоставление данных КраО и СОУ

На рис. 1 приведены измерения КраО и СОУ за 23 июня – 30 сентября 2002 г. со стандартными отклонениями 0.59 и 0.36 Гс соответственно. Качественно вариации удовлетворительно согласуются:

коэффициент корреляции  $r = 0.85$  для  $n = 60$  пар одновременных значений  $B$ . Но в целом изменения ОМП КраО значительно больше, чем изменения ОМП СОУ ( $B$  всюду в Гс, в скобках – ошибки):

$$B_{WSO} = 0.13 (0.02) + 0.46 (0.04) \times B_{CrAO}. \quad (1)$$

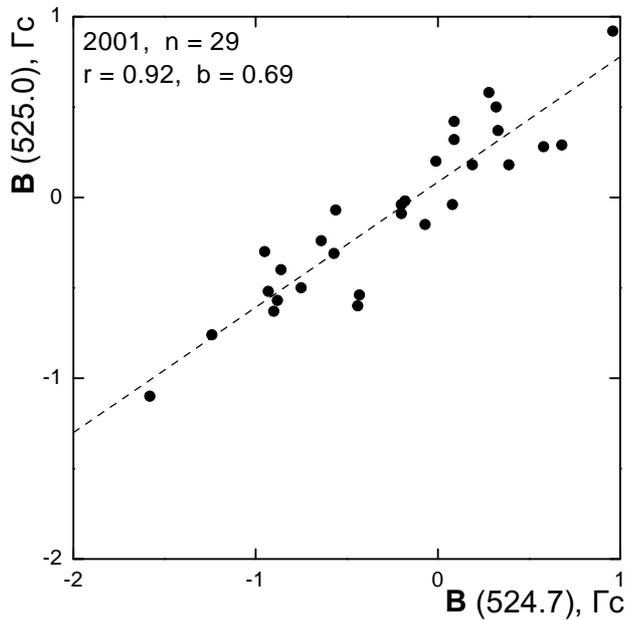
Согласие улучшается, если для КраО ввести коэффициент 0.61, равный отношению стандартных отклонений; но все равно останутся различия, превосходящие ошибки измерений.

Считается, что причинами расхождений являются смещение нуля магнитографа, виньетирование светового пучка, неточности калибровки, юстировки оптики и модулятора, тепловые эффекты и инструментальная поляризация (Демидов, 1996). Многолетний опыт КраО, однако, говорит, что соответствующие искажения в сумме не могут превышать 10%, – тогда как на деле часто наблюдаются сильные, порой в 2–3 раза и более, различия напряженностей по данным разных инструментов.

**Таблица 4.** Измерения ОМП в 2003 г. (КраО, линия 525.0,  $N = 159$ )

Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс	Дата	$B$ , Гс
март		май		июнь		июль		август		октябрь	
12	1.13	4	1.19	8	0.27	16	-1.02	22	1.16	4	-0.52
17	0.96	5	1.57	9	-0.18	20	-0.27	24	1.08	6	-0.14
25	-0.94	6	1.38	13	-0.17	21	-0.39	25	0.60	7	-0.08
26	-0.76	7	1.56	14	-0.39	22	0.37	26	0.18	11	0.26
29	-1.69	8	1.14	15	-0.59	23	0.69	27	-0.41	14	1.53
30	-1.56	10	1.00	18	-0.84	24	1.00	29	-0.80	22	-0.58
31	-1.69	11	0.84	19	-1.09	26	1.14	30	-1.19	ноябрь	
апрель		12	0.51	20	-1.66	28	1.50	31	-1.28	1	-1.25
5	1.06	13	-0.11	21	-1.21	29	1.35	сентябрь		2	-1.08
7	0.99	14	-0.29	22	-0.73	30	0.90	1	-0.87	3	-0.14
10	1.54	15	-0.40	23	-0.33	31	0.24	2	-0.44	4	-0.01
11	1.44	16	-0.39	24	0.16	август		10	-0.82	8	1.12
12	1.00	17	-0.78	27	1.12	2	-0.97	18	1.13	14	0.67
14	0.63	18	-0.86	29	1.22	3	-0.74	19	1.29	21	-1.42
15	0.39	19	-1.47	30	1.61	4	-0.86	20	0.84	22	-1.04
21	-0.75	20	-1.52	июль		5	-0.70	21	0.72	23	-0.74
22	-0.77	21	-1.76	1	0.60	6	-0.11	22	0.31	24	-0.77
23	-0.78	22	-1.73	2	1.19	7	-0.16	23	-0.07	25	-0.59
25	-1.48	24	-1.45	3	0.84	8	-0.46	24	-0.55	26	-0.73
26	-1.52	30	1.47	4	0.13	9	-0.72	25	-0.92	29	-0.63
27	-1.22	31	1.18	5	-0.38	10	-0.77	26	-1.34	30	0.26
28	-1.24	июнь		7	-0.75	15	0.18	27	-1.46	декабрь	
29	-0.51	1	1.77	8	-1.29	16	0.44	28	-0.50	1	0.99
30	0.27	2	1.74	11	-0.92	17	0.86	30	-0.24	2	0.17
май		3	1.37	12	-0.79	18	0.88	октябрь		3	0.24
1	0.99	5	0.79	13	-1.02	19	1.25	1	-0.39	8	0.78
2	1.39	6	0.69	14	-1.20	20	1.38	2	-0.74	10	0.56
3	1.72	7	0.48	15	-1.25	21	1.52	3	-0.93	12	0.70

Типичные ошибки:  $\pm 0.05$  Гс – СОУ,  $\pm 0.07$  Гс – ОМУ,  $\pm 0.12$  Гс – ССО и  $\pm 0.15$  Гс – КраО. Для определения истинного нуля магнитографа в каждой обсерватории применялись специальные методы, – в частности, с регистрацией “ОМП” по “немагнитной”,  $g = 0$ , линии Fe I 512.373 нм, – в КраО и СОУ, или с инверсией знака поляризации пластинкой  $\lambda/2$ , помещаемой перед целостатным зеркалом, – в ССО ( $\lambda$  – длина волны; Григорьев и Демидов, 1987). Неизбежно возникает вопрос: почему расхождения измерений разных приборов часто значительно превышают ошибки? К этому добавим, что анализ всех разумных источников ошибок (см., например, Шеррер, 1973; Демидов, 1996) не дает ясного ответа. Измерения ОМП, как и локальных полей фотосферы, – с помощью разных приборов и по разным линиям, – отличаются “устойчивой нестабильностью”.



**Рис. 2.** Корреляционная диаграмма ОМП, измеренного в КраО по линиям 524.7 и 525.0 в 2001 г. Пунктирная линия – прямая регрессии с наклоном  $b = 0.69$  ( $n = 29$ ,  $r = 0.92$ ).

#### 4 Измерения по линиям 524.7 и 525.0

В течение 29 дней 2001 г. мы (с участием В.И. Ханейчука) измеряли ОМП по линиям 524.7 и 525.0 одновременно на двух каналах магнитографа; результаты каналов усреднялись. Линии принадлежат одному мультиплету Fe I и имеют примерно одинаковые эквивалентные ширины и потенциалы возбуждения нижнего уровня,  $\approx 0.10$  эВ. Факторы Ланде 2 и 3 соответственно для 524.7 и 525.0, но первая линия в магнитном поле показывает аномальное расщепление, вторая – простой триплет Зеемана.

Корреляционная диаграмма ОМП за 2001 г. показана на рис. 2, где прямая линейной регрессии, – в обычной форме

$$y = a + b \times x, \quad (2)$$

– отвечает уравнению

$$B_2 = 0.09 (0.04) + 0.69 (0.07) \times B_1 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции  $r = 0.92$  для  $n = 29$  пар измерений; индексы 1 и 2 отвечают 524.7 и 525.0 соответственно. Этот результат существенно отличается от результата 2002 г. ( $n = 145$ ,  $r = 0.96$ , см. рис. 3):

$$B_2 = 0.07 (0.02) + 0.82 (0.02) \times B_1; \quad (4)$$

различие наклонов  $b$  между (3) и (4) достоверно на уровне около  $2\sigma$  (95%). Еще больше отличие наклона (3) от наклона 2003 г. ( $n = 142$ ,  $r = 0.98$ ):

$$B_2 = 0.06 (0.02) + 0.88 (0.02) \times B_1, \quad (5)$$

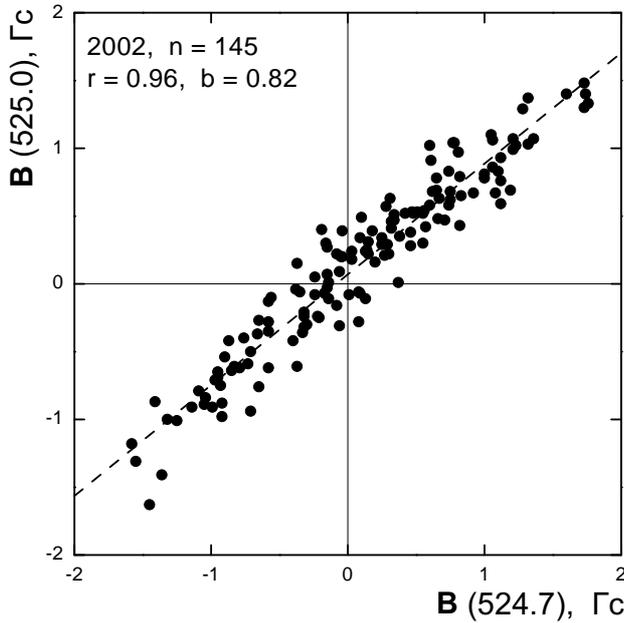


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 2002 г. ( $n = 145$ ,  $r = 0.96$ ,  $b = 0.82$ ).

со значимостью различия наклонов  $2.7\sigma$ . Наклон (3) существенно отличается и от наклона Демидова и др. (2002):

$$B_2 = 0.01 (0.01) + 0.93 (0.01) \times B_1 \quad (6)$$

для саянских измерений 1999–2001 гг. ( $n = 367$ ,  $r = 0.98$ ), а также от результата Стэнфло (1973) для невозмущенной фотосферы:  $b \approx 0.89$ , – при расстоянии центра выходных щелей 6.3 пм от центра линии (так у нашего магнитографа). По измерениям в Стэнфорде для зоны солнечного диска радиусом  $0.7R_\odot$  ( $R_\odot$  – радиус диска; см. Шронер и Шеррер, 1994) величина  $\delta \approx b$  для этой же пары линий составляет 0.86, что близко к результату Стэнфло, но отличается от нашего наклона 2001 г. По данным же Демидова (2004) измерения в тех же линиях за 1996 г. были связаны другим соотношением ( $n = 31$ ,  $r = 0.97$ ):

$$B_2 = -0.02 (0.01) + 0.74 (0.03) \times B_1, \quad (7)$$

– с наклоном, близким к наклону Крыма 2001 г. Пренебрегая малыми смещениями  $a$  в уравнениях линейной регрессии (2), для факторов насыщения 525.0 – по сравнению с 524.7 – имеем:

Стэнфорд (1976–1991 гг.):	$\delta = 0.858 \pm 0.001$ ,
Саяны (1996 г.):	$\delta = 0.74 \pm 0.03$ ,
Саяны (1999–2001 гг.):	$\delta = 0.93 \pm 0.01$ ,
Саяны (2001 г.):	$\delta = 0.833 \pm 0.003$ ,
Крым (2001 г.):	$\delta = 0.69 \pm 0.07$ ,
Крым (2002 г.):	$\delta = 0.82 \pm 0.02$ ,
Крым (2003 г.):	$\delta = 0.88 \pm 0.02$ .

(Сюда включены и результаты Демидова, 2004: соответствующие саянские измерения локальных полей, после усреднения, имитировали ОМП.) Видно, что статистическая значимость различия некоторых наклонов превышает уровень  $2\sigma - 3\sigma$ .

## 5 О согласованности измерений ОМП

Причиной разногласия  $b$  могут быть технические отличия приборов, а также зависимость  $b$  от фазы цикла. Последнее – в модели тонких жгутов – можно связать с изменением вклада сильных и слабых полей в суммарное ОМП (Демидов и др., 2002), а также распределения крупномасштабных полей, – в частности, по гелиошироте. Возможны и другие факторы, требующие новых наблюдений и специального рассмотрения. Здесь мы ставим другой, не менее принципиальный вопрос, отражающий замысел работы: как вообще повторяют друг друга измерения, выполненные по одной и той же линии, 525.0, но на разных магнитографах и в разные годы?

Превышение разброса ОМП над типичными ошибками следует, например, из кросс-корреляционных диаграмм Шеррера (1973), Котова и др. (1999). Некоторые из них – для больших  $n$  – показали и сравнительно низкую корреляцию одновременных измерений (например,  $r = 0.26$  при  $n = 668$  для корреляции “КрАО–ОМУ”). Однако для отдельных, меньшего объема, выборок имеет место более оптимистичная картина, с коэффициентами  $r$  в пределах 0.83–0.97 (Котов и др., 1998а, 1998б, 1999). Ситуация требует пристального внимания. Для этого рассмотрим некоторые “парные” измерения 1968 – 2003 гг.

## 6 Линейная регрессия “КрАО–СОУ”

Как и в п. 4, уравнения типа (2) получены для регрессии  $y|x$  с условием, что ошибки рядов в среднем одинаковы. При этом  $y$  представляет случайную величину, а  $x$  – неслучайную переменную. Линейная же функция  $y(x)$  дает наилучшее среднеквадратичное приближение  $y$ : сумма квадратов отклонений фактических  $y$  от рассчитанных по (2) меньше, чем для любой другой прямой. При сопоставлении эмпирических наклонов  $b$  пренебрегаем малыми, по сравнению с разбросом ОМП, смещениями  $a$ .

Уравнения вычислены для всех пар инструментов, для каждого года отдельно и в сумме. Результаты для полных пар массивов четырех обсерваторий приведены в табл. 5, где  $S_x$  и  $S_y$  – стандартные отклонения  $x$  и  $y$ . При детальном рассмотрении оказалось, что как  $r$ , так и  $b$  сильно варьируют от года к году; в случае  $b$  изменения оказались часто за пределами ошибок. Для примера в табл. 6 приводим результаты подробных вычислений для КрАО и СОУ.

**Таблица 5.** Уравнения линейной регрессии (формат 1-й колонки: “ $x-y$ ”; достоверность  $p$  линейной зависимости всюду  $> 0.999$ )

Обсерватории	Годы	$n$	$S_x$ , Гс	$S_y$ , Гс	Уравнение	$r$
КрАО–ОМУ	1970–1976	665	0.55	0.59	$y = +0.03 (0.02) + 0.27 (0.04) x$	0.26
КрАО–СОУ	1975–2003	978	0.68	0.39	$y = +0.08 (0.01) + 0.44 (0.02) x$	0.77
ОМУ–СОУ	1975–1982	1442	0.68	0.42	$y = +0.02 (0.01) + 0.35 (0.02) x$	0.58
ССО–ОМУ	1982	32	0.72	0.42	$y = -0.03 (0.05) + 0.47 (0.04) x$	0.81
ССО–СОУ	1982–1993	256	0.77	0.52	$y = -0.05 (0.02) + 0.51 (0.03) x$	0.77

Как следует из табл. 5, все 978 пар “КрАО–СОУ” за 1975–2003 гг. показали умеренную корреляцию:  $r = 0.77$ . На деле же  $r$  сильно меняется с годами: от 0.35 в 1976 г. (слабая корреляция) к 0.94 в 1991 г. (хорошая) и к 0.64 в 2001 г. (умеренная), см. табл. 6. Впечатляет и разброс по годам коэффициента регрессии; в частности,  $b = 0.70$  для 1991 г., 0.36 для 1999 г. (рис. 4) и 0.09 для 1976 г. Если остановиться на массивах с  $r > 0.5$ , то видим, что  $b$  с годами изменяется более чем в три раза, от 0.70 до 0.21. И это для двух однотипных инструментов и одной и той же линии, и при неизменных участках ее контура, где регистрируется поляризация!

Таблица 6. Регрессия “КрАО–СОУ” (“ $x-y$ ”)

Год	$n$	$S_x$ , Гс	$S_y$ , Гс	Уравнение	$r$	$p$
1975	112	0.43	0.19	$y = +0.12 (0.02) + 0.17 (0.04) x$	0.39	> 0.999
1976	105	0.50	0.13	$y = +0.06 (0.01) + 0.09 (0.03) x$	0.35	"
1991	25	1.07	0.80	$y = +0.30 (0.07) + 0.70 (0.06) x$	0.94	"
1993	46	0.53	0.32	$y = +0.10 (0.04) + 0.37 (0.08) x$	0.62	"
1994–1995	28	0.28	0.13	$y = -0.05 (0.03) + 0.24 (0.09) x$	0.52	0.995
1996	22	0.24	0.11	$y = -0.03 (0.03) + 0.17 (0.12) x$	0.35	0.870
1997	19	0.33	0.12	$y = +0.05 (0.03) + 0.21 (0.09) x$	0.58	0.990
1998	46	0.41	0.25	$y = +0.07 (0.03) + 0.37 (0.08) x$	0.62	> 0.999
1999	103	0.69	0.36	$y = +0.02 (0.03) + 0.36 (0.04) x$	0.70	"
2000	87	0.85	0.42	$y = +0.11 (0.03) + 0.40 (0.04) x$	0.80	"
2001	119	0.52	0.34	$y = +0.07 (0.03) + 0.42 (0.05) x$	0.64	"
2002	134	0.64	0.40	$y = +0.11 (0.02) + 0.55 (0.03) x$	0.88	"
2003	132	0.99	0.60	$y = -0.01 (0.02) + 0.56 (0.02) x$	0.94	"

## 7 “Саяны–Стэнфорд”

Так как наблюдения в Саянах, как правило, относятся к началу УТ-суток, а в Калифорнии – к концу, саянские измерения,  $x$ , сравнивались с “одновременными” измерениями СОУ,  $y$ , за предыдущие УТ-сутки. Итоги вычислений, вместе с результатом Демидова и др. (2002) для 1999 – 2001 гг, приведены в табл. 7. Наклон  $b$ , в частности, равен  $0.82 \pm 0.08$  для 1982 г. и  $0.46 \pm 0.05$  для 1983 г.; различие достоверно с уровнем значимости  $3.8\sigma$  (99.99%).

Таблица 7. Регрессия “Саяны–Стэнфорд” (“ $x-y$ ”;  $p > 0.999$ ).

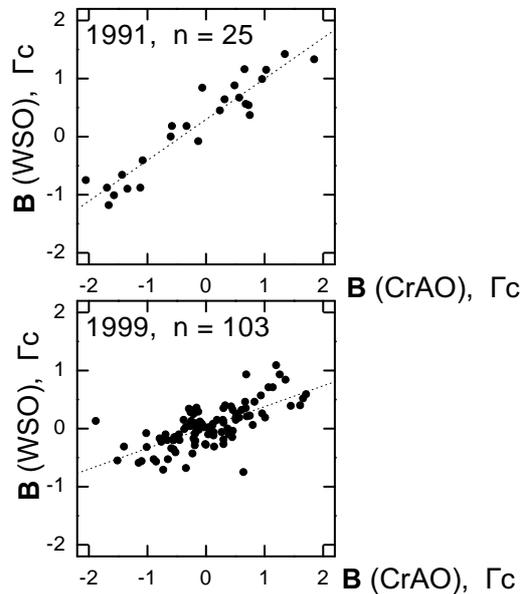
Год	$n$	$S_x$ , Гс	$S_y$ , Гс	Уравнение	$r$
1982	60	0.64	0.63	$y = -0.03 (0.05) + 0.82 (0.08) x$	0.82
1983	84	0.96	0.55	$y = -0.06 (0.04) + 0.46 (0.05) x$	0.81
1984	84	0.76	0.46	$y = -0.01 (0.04) + 0.47 (0.05) x$	0.77
1993	28	0.24	0.23	$y = -0.10 (0.04) + 0.72 (0.15) x$	0.75
1999–2001	238	–	–	$y = +0.01 (0.03) + 0.68 (0.03) x$	0.68

Согласно табл. 5 – 7, ряды ССО–СОУ показывают *наилучшую* взаимную корреляцию; в частности,  $r = 0.77$  для 256 пар. Отсюда следует, что измерения ССО и СОУ наименее обременены случайными ошибками по сравнению с КрАО и ОМУ. (Это не касается калибровки рядов. Результаты верны с точностью до константы, на которую следует умножать данные каждой обсерватории для приведения к реальной шкале ОМП. Отметим, что ряды ССО и ОМУ в целом так же хорошо коррелируют между собой, как и Саяны со Стэнфордом, и коэффициенты  $b$  также почти совпадают, но выборка в 8 раз меньше.) В среднем саянские  $|B|$ , судя по наклонам, примерно в полтора-два раза больше значений  $|B|$  СОУ и ОМУ; часть расхождений можно отнести на счет неточности калибровки.

Значительный разброс  $r$  и  $b$  имеет место при сопоставлении измерений и других пар инструментов. Естественно, что этот разброс – от одной пары выборок к другой – легко объясняет пониженные коэффициенты корреляции полных рядов четырех инструментов (табл. 5).

## 8 Почему меняется наклон $b$ ?

Из анализа годовых регрессий следует, что, в среднем,  $r$  существенно растет с увеличением среднегодового  $|B|$ , что, в свою очередь, более или менее хорошо коррелирует с ростом  $S$  рядов. Это и



**Рис. 4.** Сравнение напряженностей ОМП, измеренных в КрАО и СОУ: сверху – в 1991 г. ( $n = 25$ ,  $r = 0.94$ ,  $b = 0.70$ ), внизу – в 1999 г. ( $n = 103$ ,  $r = 0.70$ ,  $b = 0.36$ ). Пунктирные линии – прямые линейной регрессии

понятно: с ростом  $|B|$  растет надежность измерений ОМП и, тем самым,  $r$ . Но почему значительно меняется, от года к году, коэффициент  $b$ , характеризующий отношение  $|B|$  рядов?

Инструменты имеют неизменные выходные щели фотометров (табл. 1), определяющие участки – сопоставимые между собой для всех приборов – профиля линии, в которых измеряется поляризация. Линия везде одна и та же, 525.0. Разброс же наклонов  $b$  намного превосходит ошибки, и его надо объяснять. С внешней стороны различие  $b$  идентично разбросу напряженностей поля фотосферы, регистрируемого одним и тем же инструментом, но по разным линиям, т.е.  $\delta$ -эффекту. Но там уже установилась одна точка зрения – насыщение, обусловленное тонкой структурой.

Гипотеза насыщения основана на представлении о решающей роли элементов сильного поля. Аргументы в ее пользу разумны и просты (Говард, Стенфло, 1972; Стенфло, 1973; Демидов и др., 2002). Но и она встречается с рядом трудностей; толкования же представляются иногда слишком разнообразными, порой даже искусственными или недостаточно обоснованными.

Согласно Говарду и Стенфло (1972), фактор  $\delta$  двух линий железа, 525.022,  $g = 3.0$ , и 523.295,  $g = 1.3$ , изменяется от 1.4 до 0.5 при переходе от *измеряемых* напряженностей 15–50 Гс к полям примерно 3 Гс. Изменение почти втрое и в *обратную* сторону по отношению к  $\delta$ -эффекту. Их же гипотеза об изменении со временем числа жгутов в апертуре телескопа представляется весьма надуманной. Они сделали вывод, что главную роль играет разность высот в атмосфере Солнца, где формируются линии.

Гопасюк и др. (1973) выступили против заметного влияния температуры, отметив несущественную роль рассеянного света в спектрографе и инструментального расширения контура линии, но обратив внимание на отсутствие корреляции с потенциалом возбуждения, потенциальную роль асимметрии линии и возможную зависимость эффекта от магнитной чувствительности  $g\lambda^2$ . (Заметим: зависимость от  $g\lambda^2$  была только *заподозрена* ввиду ее малой статистической значимости и недостаточной обеспеченности данными наблюдений.)

Обе группы (Говард, Стенфло, 1972, Гопасюк и др., 1973), нашли, что эффект зависит от гелиоцентрического расстояния  $\rho$ , тогда как Свалгард и др. (1978), в Стэнфорде, зависимости от  $\rho$  не обнаружили; по их данным сигнал 525.0 занижается из-за насыщения в 1.8 раз.

Вывод о существенной роли  $g\lambda^2$  и температурный эффект противоречат результату Гопасюка (1985): независимо от принадлежности линий разным химическим элементам и разным мультиплетам, от потенциала возбуждения и  $g\lambda^2$  измеренные напряженности примерно одинаковы для линий сходных эквивалентных ширин  $W$ . Это говорит в пользу преобладающего влияния расходимости силовых линий с высотой. Более того, по измерениям Гопасюка и Северного (1983), Гопасюка (1985) зависимость  $\delta$  от  $W$  подобна тому, что наблюдается у магнитопеременных звезд. Причина расхождений, по мнению этих авторов, – различие химсостава спокойных и активных областей или убывание поля с высотой.

В то же время Гопасюк и др. (2000) установили, что линии, близкие по  $W$ , но различающиеся по температурной чувствительности, показывают сходные напряженности. А это противоречит гипотезе об усилении температурного эффекта в жгутах. Наблюдения и расчеты Гопасюка (1985) также показали, что сверхтонкая структура не в состоянии объяснить различие примерно в пять раз напряженностей, измеренных по разным линиям. Часть различий следует приписать, по-видимому, плохо изученной “деполяризации” излучения из-за эффекта Штарка.

По данным Говарда и Стенфло (1972) в жгутах сосредоточено более 90% магнитного потока фотосферы. При этом почти все наблюдатели уверены в значительной роли расходимости силовых линий жгутов с высотой. Это, однако, противоречит тому факту, что поле спокойной фотосферы направлено практически радиально (Уанг и Шили, 1992). Согласно Цапу (1978) размеры магнитных элементов в линиях 525.0 железа и D1 натрия, формирующихся соответственно в фотосфере и нижней хромосфере, почти одинаковы, что также говорит о преимущественно радиальной направленности силовых линий.

В уменьшении измеренной напряженности с приближением к центру линии может сказываться изменение высоты. Гарвей и Ливингстон (1969) нашли, например, что фактор  $\delta^{-1}(525.0)$  близок к двум для линейной части профиля и доходит до пяти вблизи ядра. Это не согласуется с измерениями ОМП (см. табл. 5–7, где нет такой зависимости  $S$  от  $C$ ).

По наблюдениям тех же авторов, при напряженности менее 20 Гс контур 525.0 практически не изменяется, но сигнал магнитографа по-прежнему примерно вдвое меньше, чем по линии 523.3, не чувствительной к температуре. Согласно измерениям Фрэйзера и Стенфло (1972), при полях менее 200 Гс фактор  $\delta(525.0) \approx 0.68$ , а для более сильных полей, в полутени пятна,  $\approx 0.92$ . При насыщении соотношение двух значений  $\delta$  должно быть обратным.

В измерениях ОМП, выполненных Демидовым и др. (2002), наблюдается заметная асимметрия профиля параметра Стокса  $V$ , усиливающаяся с *уменьшением*  $|B|$ . Это связывается с ростом шумов, но реальная причина неясна (в модели тонких жгутов асимметрия должна расти с *увеличением*  $|B|$ ).

Имеет место непонятное различие в два-три раза между теоретической и эмпирической калибровочным кривыми магнитографа, с занижением сигнала поляризации (Рачковский, 1967; Северный, 1967; Дейбнер, Лидлер, 1969). Попытки примирить теорию с наблюдениями оказались безуспешными. Согласно Северному причина – в неучитываемых теорией неоднородностях поля (заметим: с довольно нечеткими смыслом и определением). Многие астрофизики указывают и на то, что теоретически трудно обосновать устойчивость трубок размером 20–200 км с сильным полем в условиях пониженной, из-за турбулентности, электропроводности атмосферы (см., например, Гопасюк и др., 2000).

Наконец, особый интерес вызывает измерение слабых фотосферных полей, выполненное недавно Зириным и Камероном (2003) с помощью “спектро-видео-магнитографа”. Установлено, что (а) отношение амплитуд  $V$ -параметра Стокса линий 524.7 и 525.0 совпадает с отношением их  $g$ -факторов и (б) при напряженностях до 500 Гс измеренный магнитный поток в линии 525.0 не испытывает “насыщения”. Сделан вывод, что 80 – 90% потока спокойной фотосферы обусловлено слабыми, менее 1 кГс, полями и что в фотосфере *отсутствуют* тонкие элементы/жгуты с сильным, примерно 1 кГс, полем. Слабыми же полями, напряженностью от 0 до 20 Гс, пронизана вся спокойная фотосфера.

Можно спорить о приоритете той или иной причины расхождений, о качестве и надежности тех или иных измерений, о справедливости той или иной интерпретации, но эти споры малоинтересны и непродуктивны. Для нас очевидно, что проблема носит сложный, многомерный и, по-видимому, более принципиальный характер, нежели просто расхождения напряженностей поля, измеренных по разным линиям. На деле, скорее всего, имеет место “квази-управляемый” хаос. Что же им управляет?

## 9 Дело – в природе света и “акте” измерения?

Из анализа годовых массивов ОМП вытекает, что для одной и той пары инструментов наклоны  $b$  могут изменяться от сезона к сезону в несколько раз. Похоже, дело не в том, что используются разные линии и их разные участки (как обычно считается при наблюдениях локальных полей фотосферы), или, по крайней мере, не только в этом.

Можно предположить, например, что причина – изменение самого “магнитного” Солнца, ведущее к значительным флуктуациям, год от года, среднегодовых  $|B|$ ,  $r$  и  $b$ :

(а) с ходом цикла активные области и значительная часть фоновых (крупномасштабных) полей смещаются к экватору,

(б) структуры фонового поля, определяющие ОМП, в годы минимума становятся более мелкими и более “перемешанными” – по полярности – по сравнению с годами максимума,

(в) в годы минимума увеличивается средняя напряженность полярных шапок,

(г) напряженность ОМП и, следовательно, средняя напряженность спокойной фотосферы на низких и средних широтах увеличиваются в годы максимума (Котов и др., 1998с; с этим связан, например, рост контраста кальциевой сетки в максимуме, см. Цап и Лаба, 1973),

(д) изменяется плотность распределения магнитных жгутов (фактор заполнения) в спокойных областях фотосферы, а также характерная напряженность поля жгутов.

Все пять причин, сводящиеся в принципе к (д), не годятся потому, что феномен жгутов, или относительный  $\delta$ -эффект, должен сказываться *одинаково* на оба сравниваемых инструмента и не может приводить к существенному различию  $b$ . Надо искать другое объяснение.

В п. 3 указывалось, что инструментальные эффекты могут привести к небольшому относительному искажению, примерно 10%. (Калибровка не имеет особого значения: ее систематическая неточность изменяет только *шкалу* измерений.) Поэтому сам инструмент не может быть главным источником искажений.

Таким образом, приходим к мысли, что причиной может быть само измерение, а точнее – комплекс “инструмент-свет”. Дело заключается, по-видимому, в неучитываемых свойствах света и действии на фотоны акта измерения. Природа “беспорядка” (или “фальсифицируемости” по Попперу) измерений магнитного поля Солнца, наверное, аналогична в какой-то мере принципу неопределенности Гейзенберга и обусловлена известными квантовыми явлениями: “сцеплением”, “слиянием” или нелокальностью, перепутанностью, неразличимостью фотонов (Клышко, 1994; Бувместер и др., 1997; Котов, Котов, 2002).

## 10 О “сцеплении” фотонов

При рассмотрении процесса образования линии в замагниченной атмосфере Солнца и последующего акта регистрации игнорируется квантовая природа света, – кроме, конечно, факта существования фотонов, зеемановского расщепления уровней атома и поляризации. На деле, по-видимому, определенными квантовыми эффектами пренебрегать нельзя. И, в частности, явлением “сцепления” (сложности, запутанности, взаимозависимости, или нелокальности, *entanglement*) фотонов. О нем утверждалось в основах квантовой механики еще на заре ее становления, хотя в нем сомневался Эйнштейн. Но недавно явление из области теоретических предположений перешло в опытную конкретику, став в конце-концов доказанным *экспериментально* (Бувместер и др., 1997). Речь идет о следующем.

Касаясь загадки квантов, Эйнштейн (1965 – 1967) в 1955 г. писал о своем чувстве неудовлетворенности статистической квантовой теорией и особенно интерпретацией волновой  $\psi$ -функции. Он был убежден в “реальности состояния” физической системы (например, фотонов, электронов), которое существует независимо от наблюдателя и *измерения*, а  $\psi$ -функцию считал лишь способом описания, причем неполным, состояния системы.

Сейчас квантовое “действие фотонов-призраков” на расстоянии доказано экспериментально (см., например, Бувместер и др., 1997), и это явилось очередным триумфом квантовой теории. А именно: между разнесенными в пространстве квантовыми системами существует связь. Это подтвердило известную уверенность Шредингера в том, что чистое квантовое состояние, – например, поляризация фотона, – распределяется между двумя фотонами, созданными одновременно. На языке квантовой механики фотоны “сцеплены” (“связаны”, “перепутаны”, entangled) и они остаются “сцепленными” все время, хотя разлетаются в разные стороны. И теория предсказывала, что измерение над одним фотоном влияет на результат измерения с его “близнецом”. Именно против этого возражал Эйнштейн, ибо “действие” на расстоянии противоречило принципу специальной теории относительности о невозможности эффектов, распространяющихся быстрее света.

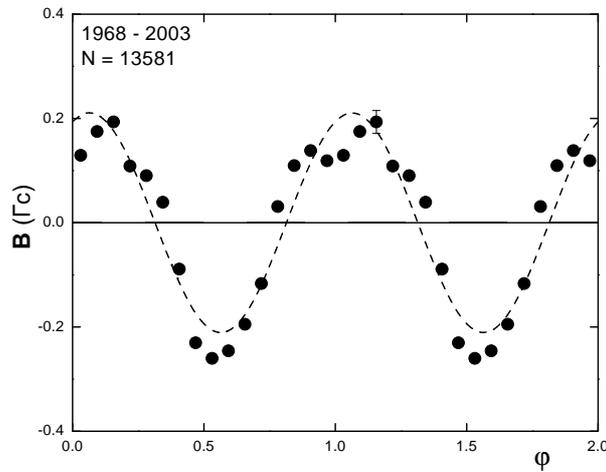
## 11 “Сцепление” и “слияние” фотонов – в солнечном магнитографе?

Не будем касаться сложного вопроса о квантовых “сцеплении” и “слиянии” фотонов в процессах излучения и переноса в атмосфере Солнца, да еще в присутствии магнитного поля. Но при измерениях с магнитографом явление неизбежно должно возникать, поскольку применяется электронно-оптический модулятор и светоделитель-поляризатор. При этом часть света – частично поляризованные фотоны – поглощается в модуляторе-поляризаторе, другая часть регистрируется фотодетектором. (В магнитографе КраО с 1973 г., в отличие от других трех инструментов, световой луч призмой Рошона расщепляется надвое, и две части луча “измеряются” порознь двумя независимыми фотометрами.)

На языке квантовой механики в результате измерения – контакта с магнитографом – исходное состояние фотона будет “спроектировано” на состояние  $|\uparrow\rangle$  или  $|\leftrightarrow\rangle$  и, таким образом, становится невозможным получить полную информацию о первичном состоянии  $|\psi\rangle$ : она “размывается” между двумя вторичными состояниями,  $|\uparrow\rangle$  и  $|\leftrightarrow\rangle$ . Можно сказать, что поляризованные фотоны, прошедшие модулятор-поляризатор, ведут себя как “призраки-близнецы”: в результате регистрации один передает другому информацию о своем состоянии, внося “дезинформацию” о первичной  $\psi$ -функции.

И это – неизбежное следствие и важная черта квантово-механического подхода: нельзя сделать определенных выводов об измерении электромагнитного поля без рассмотрения инструмента, который взаимодействует со световым полем (фотонами) и изменяет его состояние. Сцепление, слияние, неразличимость, или нелокальность фотонов, таким образом, становятся источниками генерации собственных шумов системы “свет-инструмент” и статистических искажений сигнала магнитографа.

Вследствие сцепления-слияния (суперпозиции) двух состояний акт измерения, или поглощения, может существенно влиять на оба фотона-близнеца, – причем не обязательно созданными одновременно, – с коэффициентом влияния (сцепления, слияния), зависящем от конкретного устройства инструмента, метода детектирования, а также от состояния поляризации света, т.е., в нашем случае, и от фактической напряженности среднего магнитного поля Солнца и, по-видимому, от *распределения* поля на его видимой полусфере. (Можно даже, наверное, утверждать, что при измерениях Солнца-как-звезды состояние поляризации “фотона” определяется не суммой “независимых” состояний всех отдельных фотонов фотосферы, попавших в спектрограф и на магнитограф, а *фотосферой всего видимого солнечного диска сразу*.) Все эти факторы, приводящие к возрастанию “хаоса”, трудно или почти невозможно учесть на практике. Эффекту сцепления-слияния, а по сути – квантовой природе света, и следует, по-видимому, приписать – в значительной мере – “устойчивый беспорядок” и расхождение результатов при наблюдениях Солнца с магнитографом и в том числе по разным спектральным линиям.



**Рис. 5.** Средняя кривая изменения ОМП с периодом  $P = 26.898$  сут (1968 – 2003 гг.,  $N = 13581$ ). Точки – средние значения ОМП в фазовых интервалах шириной  $P/16$ ; вертикальной черточкой указана типичная стандартная ошибка, пунктирной линией – аппроксимирующая синусоида. Фаза  $\varphi = 0$  отвечает моменту 0 UT, 1 января 1968 г.

## 12 Средняя кривая изменения ОМП

После нормировки массивов четырех обсерваторий на собственные стандартные отклонения получен единый ряд 1968 – 2003 гг. с числом  $N = 13581$  и  $S = 0.64$  Гс. Спектр мощности показал максимальный пик для периода  $P = 26.898 \pm 0.014$  сут, который мы приписываем вращению поля на экваторе (спектр не приводим, т.к. он неоднократно публиковался; см., например, Котов и др., 1998с, 1999). Значимость пика возросла с увеличением данных несмотря на то, что наблюдениями охвачено уже более трех циклов. Стабильность вращения и тот факт, что пик не расщепился и не уменьшился, – важная проблема, пока не нашедшая объяснения в рамках модели цикла Бэбкока-Лейтона и теории динамо. Твердотельное вращение ОМП с периодом  $P$  тесно связано, по-видимому, с загадкой т.наз. “активных долгот”.

Интерес представляет вид средней кривой с периодом  $P$ , построенной по суммарным данным на рис. 5. Профиль кривой существенно отличается от синусоиды, что может быть обусловлено квадрупольной составляющей (4-секторной структурой), а также магнитной асимметрией Солнца, природа которой неизвестна; имеется в виду асимметричное поведение N- и S-полярностей и перевес, в среднем, S-поля в фотосфере (подробнее см. Котов и др., 2002). Гармонические параметры кривой: амплитуда  $A = 0.21 \pm 0.04$  Гс, фаза максимума  $\varphi = 0.06 \pm 0.03$ .

Интересно, что такой же, в пределах ошибки, период ( $26.88 \pm 0.06$  сут) недавно обнаружен в вариациях потока солнечных нейтрино Старроком и Вебером (2002). Они считают, что модуляция вызвана вращением сильного магнитного поля в глубоких слоях конвективной зоны на низких широтах. Это, в принципе, возможно при ненулевой массе и ненулевом магнитном моменте нейтрино.

## 13 Заключение

Мы предполагаем, что большие расхождения “одновременных” значений ОМП, измеренных разными магнитографами, – в частности, сильное различие стандартных отклонений временных рядов ОМП (табл. 1, 5 и 7), – в значительной мере обусловлены сцеплением-слиянием (нелокальностью) и

квантовой природой света. То же относится и к измерениям локальных полей фотосферы в разных линиях и с разными  $g$ -факторами. Но определенный вклад в расхождения, конечно, может вносить и известный эффект насыщения, вызванный сверхтонкой, жгутовой, структурой магнитного поля.

Явление сцепления-слияния фотонов требует внимания как теоретиков, так и наблюдателей. В случае измерений ОМП пока неясно, как можно, хотя бы приблизительно, его учесть. Происходит то, что следует из квантовой механики: само измерение влияет на состояние системы, света, и меняет результат. И все соответствует квантовым законам, т.е. принципу суперпозиции состояний и принципу неопределенности Гейзенберга. А именно, мы стремимся определить с наивысшей точностью импульс (энергию) фотонов, их состояние, – в частности, параметры Стокса  $I$  и  $V$ , – но при этом жертвуем существенной частью информации о точном местонахождении фотонов: усиливаем их сцепление-слияние в магнитографе. Этим, наверное, и можно объяснить, почему, например, значения  $|B|$  СОУ систематически занижены в полтора-два раза по сравнению с данными трех других обсерваторий, а также с новыми данными ОМП, полученными недавно бирмингэмской группой (Чаплин и др., 2003) методом атомной резонансной спектроскопии. Этому же следует приписать и частые расхождения, значительно превышающие возможные (инструментальные) ошибки измерений ОМП, выполненных одновременно на разных инструментах для одного и того же “магнитного стандарта” – Солнца.

Эффект может играть существенную роль и при измерениях сильных магнитных полей в пятнах и активных областях. На его счет, наверное, надо отнести и некоторые аномалии в поведении магнитопеременных звезд, например, часть расхождений в измерениях по разным линиям; сцепление-слияние может проявляться и при наблюдениях пекулярных астрофизических объектов.

Эффект по природе – квантово-механический, где определяющую роль играет статистическая сторона дела. Поэтому согласие амплитуд переменности ОМП по наблюдениям на разных инструментах (Котов и др., 1998с) следует принять как аргумент в пользу принятой нормировки на собственное стандартное отклонение (см. п. 12). Это естественно вытекает из статистической природы расхождений результатов измерений на разных инструментах. Как правильно писал Эйнштейн (1965 – 1967), “...физический опыт вообще имеет дело лишь с совпадениями”. В нашем случае наилучшее приближение к реальности, т.е. к фактическому ОМП, и наилучшее согласие результатов дает усреднение многих независимых “актов” измерения магнитного поля, в частности, ОМП. Это и делается в КраО при сведении измерений ОМП нескольких магнитографов в одну временную последовательность.

Авторы признательны Н.П. Русаку за техническое обеспечение работы магнитографа телескопа БСТ–1, В.И. Ханейчука за активное участие в измерениях ОМП и Н.Г. Суницу за помощь в обработке материала наблюдений. Мы благодарны М.Л. Демидову за обмен данными по ОМП и обсуждение ряда инструментальных вопросов и проблем солнечного магнетизма. Работа выполнена при поддержке INTAS (грант N 2000 – 840).

## Литература

- Бувместер и др. (Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A.) // Nature. 1997. V. 390. P. 575.
- Гарвей, Ливингстон (Harvey J., Livingston W.) // Solar Phys. 1969. V. 10. P. 283.
- Говард, Стенфло (Howard R., Stenflo J.O.) // Solar Phys. 1972. V. 22. P. 402.
- Гопасюк С.И. // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. 1985. Т. 72. С. 159.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С., Залесов И.П., Каркач Д.В., Свистельников В.В. // Астрон. журн. 2000. Т. 77. С. 547.
- Гопасюк С.И., Северный А.Б. // Письма в Астрон. журн. 1983. Т. 9. С. 120.
- Гопасюк и др. (Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.) // Solar Phys. 1973. V. 31. P. 307.
- Григорьев, Демидов (Grigoryev V.M., Demidov M.L.) // Solar Phys. 1987. V. 114. P. 147.
- Дейбнер, Лидлер (Deubner F.-L., Liedler R.) // Solar Phys. 1969. V. 7. P. 87.
- Демидов (Demidov M.L.) // Solar Phys. 1996. V. 164. P. 381.
- Демидов М.Л. // Частное сообщение. 2004.

- Демидов и др. (Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M.) // *Solar Phys.* 2002. V. 209. P. 217.
- Зирин, Камерон (Zirin H., Cameron R.) // *Caltech Astrophys. Prepr.* 2003.
- Клышко Д.Н. // *Успехи физ. наук.* 1994. Т. 164. С. 1187.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И., Григорьев В.М., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1998а. Т. 94. С. 118.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1998б. Т. 94. С. 110.
- Котов, Котов (Kotov V.A., Kotov S.V.) // *1st Potsdam Thinkshop on Sunspots and Starspots.* Eds. K.G. Strassmeier and A. Washuettl. Potsdam: AIP. 2002. P. 133.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. С. 218.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинематика и физика небес. тел.* 2002. Т. 18. С. 205.
- Котов и др. (Kotov V.A., Scherrer P.H., Howard R.F., Haneychuk V.I.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1998с. V. 116. P. 103.
- Рачковский Д.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1967. Т. 36. С. 51.
- Сантори и др. (Santori C., Fattal D., Vučković J., Solomon G.S., Yamamoto Y.) // *Nature.* 2002. V. 419. P. 594.
- Свалгард и др. (Svalgaard L., Duvall T.L., Jr., Scherrer P.H.) // *Solar Phys.* 1978. V. 58. P. 225.
- Северный А.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1967. Т. 36. С. 22.
- Северный (Severny A.) // *Nature.* 1969. V. 224. P. 53.
- Старрок, Вебер (Sturrock P.A., Weber M.A.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 565. P. 1366.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // *Solar Phys.* 1973. V. 32. P. 41.
- Уанг, Шили (Wang Y.-M., Sheeley N.R., Jr.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310.
- Фрэйзер, Стенфло (Frazier E.N., Stenflo J.O.) // *Solar Phys.* 1972. V. 27. P. 330.
- Ханейчук и др. (Haneychuk V.I., Kotov V.A., Tsap T.T.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 403. P. 1115.
- Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1978. Т. 58. С. 13.
- Цап Т.Т., Лаба С.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1973. Т. 48. С. 73.
- Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 343. P. 813.
- Шерпер (Scherrer P.H.) // *Stanford Univ. Inst. Plasma Res. Rep.* 1973. N. 554.
- Шерпер (Scherrer P.H.) // <http://wso.stanford.edu>. 2004.
- Шерпер и др. (Scherrer P.H., Wilcox J.M., Kotov V., Severny A.B., Howard R.) // *Solar Phys.* 1977. V. 52. P. 3.
- Шронер, Шерпер (Shrauner J.A., Scherrer P.H.) // *Solar Phys.* 1994. V. 153. P. 131.
- Эйнштейн А. // *Собрание научных трудов.* Т. 1–4. М.: Наука. 1965 – 1967.