

УДК 523.9

Об одном парадоксе измерений магнитного поля Солнца

В.А. Котов

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
e-mail: vkotov@srao.crimea.ua

Поступила в редакцию 7 февраля 2007 г.

Аннотация. Измерения среднего магнитного поля (СМП) Солнца-как-звезды, выполненные разными инструментами и по разным спектральным линиям, часто расходятся. Это обычно приписывается ошибкам измерений и “насыщению” солнечного магнитографа в тонкоструктурных фотосферных элементах с сильным полем. Нами рассмотрены измерения продольного СМП, сделанные в 1968–2006 гг. в шести обсерваториях. Показано, что степень расхождения (наклон b прямых линейной регрессии) значительно меняется с фазой 11-летнего цикла. Возникает парадокс: само состояние Солнца влияет на калибровку магнитографа? Объяснение мы видим в квантовых свойствах света – нелокальности и “сцеплении” фотонов, поляризация которых на выходе телескопа/спектрографа определяется обширными частями солнечного диска. При этом степень сцепления, или “неразличимости”, фотонов зависит от распределения поля в фотосфере и конструкции прибора (по Бору: “инструмент неизбежно влияет на результат”). Зависимость сцепления от фазы цикла легко объясняет “загадку” наклонов b . Сама статистическая природа света делает неминуемыми расхождения, требуя простого усреднения данных с целью наилучшего приближения к реальному СМП. Приведен ход модуля СМП за 39 лет, показывающий значительное изменение абсолютной напряженности поля Солнца с периодом цикла 10.5(7) г.

ON THE ONE PARADOX OF MEASUREMENTS OF THE MAGNETIC FIELD OF THE SUN, by V.A. Kotov. Records of the mean magnetic field (MMF) of the Sun-as-a-star performed by different instruments and using various spectral lines, often show significant discrepancies. It is generally ascribed to the errors of measurements and a “saturation” of the solar magnetograph in the fine-structure photospheric elements with strong magnetic intensity. We analysed the longitudinal MMF measurements performed in 1968–2006 by six observatories. It is shown that the discrepancy degree (the slope b of a linear regression line) changes substantially with the phase of 11 year cycle. A paradox therefore arises: does the state of the Sun itself affect the magnetograph calibration? An explanation is seen in quantum properties of light – nonlocality and “coalescence” of photons which polarization on the telescope/spectrograph exit is determined by large areas of the solar disk. With that, the extent of a coalescence, or “indistinguishability”, of photons depends on the photospheric field distribution and the construction of a given device (in accordance with Bohr: “the instrument inevitably influences the output of measurement”). The dependence of a coalescence degree on the phase of the cycle easily explains the b slope “mystery”. The statistical nature of light itself, thus, makes unavoidable the disagreements, requiring simple averaging of the data in order to get the best approximation of the real MMF. We present the MMF modulus for 39 years which exhibits significant variation of the Sun’s field intensity with a cycle period of 10.5(7) years.

Ключевые слова: Солнце, магнитное поле, фотоны, нелокальность

1 Введение

Одно из главных свойств активного Солнца – магнитное поле. Наиболее эффективным прибором для его измерения уже более полувека служит магнитограф Бэбкока (1953): по степени круговой поляризации прибор регистрирует эффект Зеемана фотосферной спектральной линии поглощения с ненулевым фактором Ланде g (ниже пойдет речь об измерениях только продольной компоненты поля). Но давно известно, что измерения, выполненные разными инструментами, а также по разным линиям, существенно расходятся между собой, причем даже для “спокойной” фотосферы, вне активных областей (АО). Считается, что основными причинами расхождений являются ошибки измерений и “насыщение” сигнала магнитографа в магнитных жгутках/фибрилах/волокнах/трубках/элементах фотосферы размером менее 1 угл. сек. с сильным, примерно 1.0–1.5 кГс, полем, а также разная чувствительность линий к температуре (Говард и Стенфло, 1972; Стенфло, 1973; Демидов и др., 2002, 2005а,б). При измерении “локальных” полей пятен и АО дополнительные расхождения обусловлены изменениями профиля линии и “расширением” силовых трубок поля с высотой в атмосфере Солнца (Говард и Стенфло, 1972; Гопасюк и др., 1973, 2000).

Примерно 35 лет назад основной причиной расхождений в спокойной фотосфере была объявлена сверхтонкая структура поля; метод же “отношения напряженностей”, или δ -эффект (по измерениям в разных линиях) стал широко применяться для интерпретации магнитных измерений фотосферы (Уанг и Шили, 1995; Демидов и др., 2002, 2005б). Недавно, однако, было обращено внимание на количественные несоответствия результатов разных авторов, анализировавших расхождения измерений разными инструментами и по разным линиям (Котов, 2003). А это делает неоднозначной интерпретацию причин расхождений, основанной на понятиях “сверхтонкая структура” и “насыщение”.

Трудно делать конкретные заключения о точности измерений, да еще с помощью разных инструментов, при сканировании локальных полей в пятнах, АО, факельных площадках и даже полей спокойной фотосферы. Причин тому много: влияние спектрального и пространственного разрешений и пространственное рассогласование, трудноучитываемые изменения контура линии, погрешности компенсирования лучевой скорости и яркости, неодновременность измерений и др. Магнитограммы, полученные в Крыму (Гопасюк и др., 1973, 2000), показали, например, столь большие различия напряженностей, измеренных по разным линиям, что стало вообще неясно, какие же линии дают *истинное* поле. На сильные количественные расхождения между результатами разных обсерваторий и по разным линиям указали недавно Демидов и др. (2005а). Особый интерес поэтому представляют измерения среднего магнитного поля (СМП) Солнца-как-звезды по одной или нескольким линиям (в контексте данной работы СМП – то же, что и *общее магнитное поле* (ОМП) Солнца). Фотосфера всего видимого диска выступает здесь как “магнитный эталон”. Поскольку СМП этого эталона сравнительно медленно меняется ото дня ко дню, измерения, сделанные на разных инструментах в течение одних и тех же UT-суток, можно считать “одновременными”.

Впервые успешные измерения СМП сделаны в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) Северным (1969) с сотрудниками; первый каталог СМП (данные КрАО за 1968–1976 гг.) опубликован Котовым и Северным (1983). В настоящее время доступные из печати и Интернета СМП-данные, полученные в шести обсерваториях, охватывают почти четыре солнечных цикла (с 1968 по 2006 гг., см. п. 2).

Наблюдатели, однако, неоднократно обращали внимание на сильное, часто выходящее за рамки ошибок, различие измерений СМП на разных инструментах (Шеррер и др., 1977а). Общепринятое объяснение, как и в случае локальных полей, инструментальные погрешности. Но это не дает ответа на вопрос: почему степень расхождения, как правило, меняется от сезона к сезону (Котов и др., 1998а; Котов, 2003)? История же наблюдательной астрофизики показывает, что изучение именно слабых сигналов (у нас – СМП Солнца) и объектов чаще всего и ведет к обнаружению новых фактов и явлений. Нет ли у “рассеяния” СМП скрытой закономерности, указывающей на новый, дополнительный источник расхождений? Ведь “с каждым новым следствием возникает и новый взгляд на вещи” (Э. Мах), и интересно может быть и там, где “неинтересно” – среди ошибок и шумов.

2 СМП Солнца, 1968–2006 гг.

Мировой каталог СМП, ныне содержащий около 18 тыс. суточных значений продольной напряженности B , существует с 1968 г. (см. Интернет, а также Котов и Северный, 1983; Котов и др., 1998b; *Solar-Geophysical Data*). Он получен в шести обсерваториях: КрАО, Обсерватория Маунт-Уилсон (ОМУ), Солнечная обсерватория им. Дж. Уилкокка (СОУ, Стэнфордский университет), Саянская солнечная обсерватория (ССО, Институт солнечно-земной физики РАН, Иркутск), обсерватория Сазерлэнд (Sutherland в Южной Африке, группа BiSON Бирмингемского университета) и обсерватория Китт-Пик (ОКП, Национальная солнечная обсерватория США, данные *SOLIS-VSM*). На Китт-Пик поле измеряется по линии Fe I $\lambda 630.15$ нм ($g = 5/3$), а в Сазерлэнде – методом атомной резонансной спектроскопии, по линии K I $\lambda 769.90$ нм; в остальных обсерваториях регулярные измерения ведутся (в ОМУ – велись) по линии Fe I $\lambda 525.02$ нм ($g = 3$). В КрАО в 2001–2006 гг. дополнительные измерения сделаны также по линии Fe I $\lambda 524.71$ нм ($g = 2$). Напряженность СМП мала: из-за вращения Солнца и медленной эволюции крупномасштабных полей оно меняется преимущественно в пределах ± 1.5 Гс. Поэтому на каждом магнитографе применялись специальные методы контроля за положением нулевого уровня.

Информация о методах измерений СМП и самих данных содержится у Шеррера и др. (1977a,b), Котова и др. (1998a,b), Чаплина и др. (2003), Демидова и др. (2005б). Данные СОУ и ОКП взяты с сайтов <http://wso.stanford.edu> и <http://solis.nso.edu> соответственно. Сведения об отдельных массивах, входящих в общий каталог 1968–2006 гг., приведены в табл. 1, где N – число суточных значений СМП, Δ – типичная ошибка отдельного измерения, S – стандартное отклонение массива и k – нормировочный коэффициент для объединения данных шести обсерваторий и разных линий в единую временную последовательность; никакие другие поправочные множители и факторы насыщения не вводились.

Положительные B отвечают N-полярности, неопределенности же всюду представляют стандартные ошибки $\pm\sigma$. Для объединения измерений шести обсерваторий и разных линий в единый временной ряд определено среднее стандартное отклонение $\langle S \rangle$ (из семи отдельных S в табл. 1), затем для каждой обсерватории и каждой линии вычислен нормировочный коэффициент $k = \langle S \rangle / S$, приведенный в последнем столбце табл. 1. После умножения B данного массива на k и объединения всех данных, получен общий нормированный ряд 1968–2006 гг. с полным числом измерений $N = 17905$ и $S = 0.62$ Гс. (Коэффициенты k применены ниже только для получения единого временного ряда модуля СМП; при анализе *оригинальных* измерений и сопоставлении данных разных инструментов и разных линий они не учитывались.)

Уравнения линейной регрессии имеют обычный вид: $y = a + b \times x$, где x и y – напряженности СМП двух сравниваемых рядов в гауссах. Малыми смещениями a при сопоставлении коэффициентов регрессии b (наклонов) будем пренебрегать, сами же b будем трактовать как среднестатистические отношения значений СМП по модулю, измеренных по двум линиям или на двух инструментах по одной и той же линии.

Дело имеем со слабым продольным эффектом Зеемана, когда внутри линии измеряется круговая поляризация $p_0 \sim 10^{-6} - 10^{-4}$. При этом заведомо отсутствуют инструментальные нелинейные эффекты, и потому должно быть однозначное соответствие между p_0 и B , с точностью до δ -эффекта, случайных ошибок и влияния асимметрии профиля линии (Демидов и др., 2005б). Подчеркнем, что сигнал СМП определяется крупномасштабными, т. н. фоновыми, полями спокойного Солнца; вклад же полей пятен и АО несущественный (Северный, 1971; Котов и др., 1977). СМП представляет собой, по сути, *разбаланс* полярностей видимой полусферы Солнца: превышение на данные сутки одной полярности над другой.

3 Поведение модуля СМП за 39 лет

Для дискуссии понадобится знать, как изменяется $|B|$ с циклом. Впервые о циклическом изменении модуля СМП сообщили Котов и Демидов (1980) на основе данных КрАО за 1968–1976 гг.: среднегодовая напряженность $|B|$ показала трехкратное уменьшение от максимума солнечной активности

Таблица 1. Данные СМП за 1968–2006 гг.

Обсерватория	Годы	Линия, нм	N	Δ , Гс	S , Гс	k
Крым	1968–2006	Fe I λ 525.02	2537	0.15	0.67	0.92
Крым	2001–2006	Fe I λ 524.71	563	0.19	0.76	0.81
Маунт-Уилсон	1970–1982	Fe I λ 525.02	2457	0.07	0.67	0.92
Стэнфорд	1975–2006	"	9370	0.05	0.41	1.49
Саяны	1982–1993	"	313	0.05	0.77	0.80
Сазерлэнд	1992–2001	K I λ 769.90	1988	0.01	0.43	1.43
Китт-Пик	2003–2006	Fe I λ 630.15	677	0.01	0.60	1.03
Вместе*	1968–2006	–	17905	–	0.62	–

*Общий нормированный ряд СМП

(СА) к минимуму. Более обширный ряд СМП, по данным четырех обсерваторий, подтвердил результат для 1968–1999 гг. (Котов и Сетяева, 2002).

Сейчас имеем наиболее полный ряд СМП: почти четырех циклов, шести обсерваторий, четырех линий и с уточненной нормировкой рядов. Результат полугодового или годового усреднения $|B|$ (последнее – для 1968–1970 гг.) показан на рис. 1а, где видим отчетливую циклическую вариацию со средней гармонической амплитудой 0.2 Гс. Сравнение с ходом чисел Вольфа W (рис. 1б) показывает, что в среднем кривая $|B|$ отстает на 0.7(7) г. от кривой W ; максимумы $|B|$, следовательно, примерно совпадают с эпохами полярных переполюсовок. Спектр мощности модуля СМП для периода цикла дал значение 10.5(7) г. (в скобках всюду – стандартная ошибка для последних значащих цифр). Среднее за 39 лет значение модуля составляет 0.46(4) Гс для принятой нормировки СМП; в годы минимума модуль приблизительно в три раза меньше, чем в годы максимума. Внимание обращают на себя еще два обстоятельства: (а) абсолютный максимум среднегодовой напряженности $|B|$ имел место в 1991 г. и (б) $|B|$ не показывает никакого существенного тренда в течение 39 лет.

Это усиливает вывод Котова и Сетяевой (2002) об отсутствии векового хода средней напряженности фотосферного поля, по крайней мере на протяжении последних четырех циклов. (Рост примерно в два раза поля солнечной короны на протяжении почти всего XX в. следовал ранее из косвенных данных – измерений радиальной компоненты межпланетного магнитного поля на орбите Земли и индекса геомагнитной активности (Локвуд и др., 1999).)

4 Сопоставление измерений Крыма и Стэнфорда

Для примера на рис. 2 приводим часть измерений СМП, сделанных в КраО и Стэнфорде в 2003 г. Отчетливо видна 27-суточная модуляция, обусловленная вращением 2-секторной структуры; крымские значения, однако, в среднем примерно в полтора раза больше, чем значения СОУ. По всем же измерениям 2003 г., согласно табл. 2, крымские напряженности, по модулю, почти в 1.8 раза больше, чем стэнфордские, с коэффициентом корреляции $r = 0.94$.

Данные этих же обсерваторий с 22 марта по 23 ноября 2004 г. показаны на рис. 3. Здесь напряженности $|B|$ КраО в среднем тоже приблизительно в 1.8 раза превышают $|B|$ СОУ (табл. 2). И хорошо видно, что примерно после 1 августа (сутки 214) 2-секторная структура сменилась на 4-секторную с общим дальнейшим понижением, в среднем, абсолютных значений СМП.

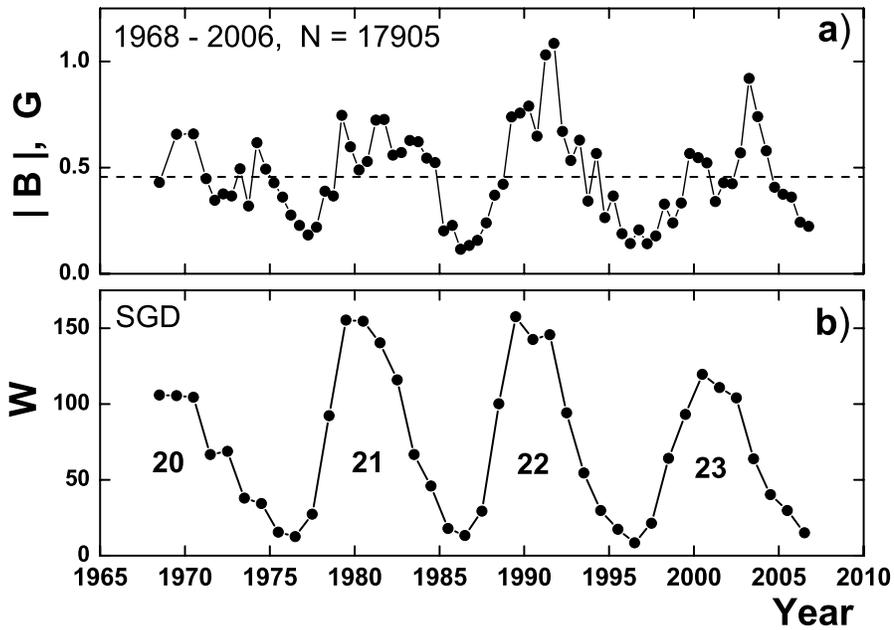


Рис. 1. Ход со временем среднегодовых или полугодовых значений: (а) модуля СМП (в гауссах, 1968–2006 гг.) и (b) чисел Вольфа W согласно *Solar-Geophysical Data*. По горизонтали – годы; типичная ошибка $|B|$ сравнима с размером точки, пунктирной линией показано среднее значение $|B|$; числа 20–23 – номера циклов

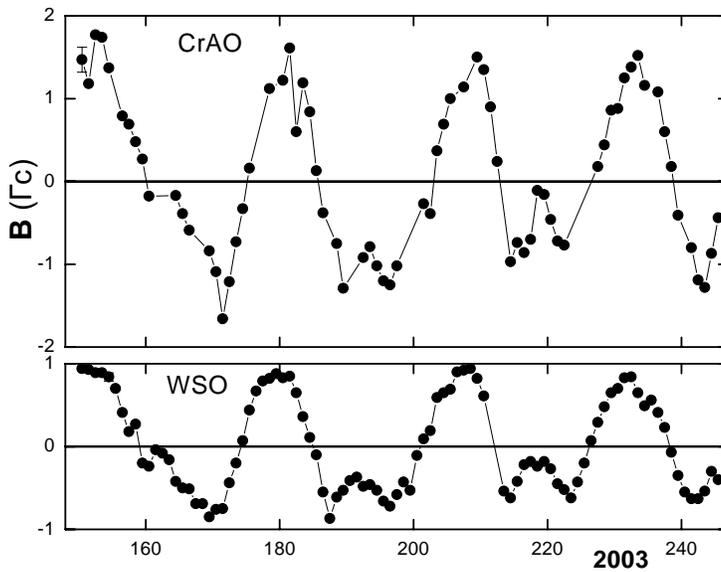


Рис. 2. Сравнение напряженностей СМП, измеренных в Крыму (CrAO) и Стэнфорде (WSO) с 30 мая по 2 сентября 2003 г. (точки, соединенные отрезками прямыми). Вертикальной черточкой показана типичная ошибка КраО (для Стэнфорда ошибка сравнима с размером точки), по горизонтали – номер UT-суток года

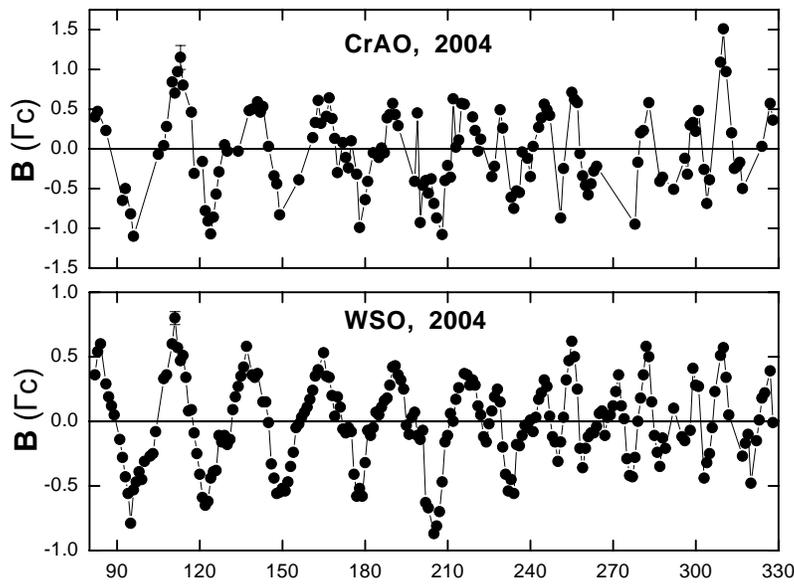


Рис. 3. То же, что на рис. 2, с 22 марта по 23 ноября 2004 г.

Таблица 2. Уравнения линейной регрессии “Крым (x) – Стэнфорд (y)” (S_x и S_y – соответствующие стандартные отклонения, n – число пар сравниваемых значений СМП)

Год	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
1975	112	0.43	0.19	$y = +0.12(2) + 0.17(04) \times x$	0.39
1976	105	0.50	0.13	$y = +0.06(2) + 0.09(03) \times x$	0.35
1991	25	1.07	0.80	$y = +0.30(7) + 0.70(06) \times x$	0.94
1993	46	0.53	0.32	$y = +0.10(4) + 0.37(08) \times x$	0.62
1994–1995	28	0.28	0.13	$y = -0.05(3) + 0.24(09) \times x$	0.52
1996	22	0.24	0.11	$y = -0.03(3) + 0.17(12) \times x$	0.35
1997	19	0.33	0.12	$y = +0.05(3) + 0.21(09) \times x$	0.58
1998	46	0.41	0.25	$y = +0.07(4) + 0.37(08) \times x$	0.62
1999	103	0.69	0.36	$y = +0.02(3) + 0.36(04) \times x$	0.70
2000	87	0.85	0.42	$y = +0.11(3) + 0.40(04) \times x$	0.80
2001	119	0.52	0.34	$y = +0.07(3) + 0.42(05) \times x$	0.64
2002	134	0.64	0.40	$y = +0.11(2) + 0.55(03) \times x$	0.88
2003	132	0.99	0.60	$y = -0.01(2) + 0.56(02) \times x$	0.94
2004	131	0.53	0.35	$y = +0.02(2) + 0.55(03) \times x$	0.83
2005	35	0.43	0.23	$y = +0.08(3) + 0.40(07) \times x$	0.77
2006	78	0.27	0.18	$y = +0.06(1) + 0.58(05) \times x$	0.85
1975–2006	1222	0.64	0.37	$y = +0.07(1) + 0.45(01) \times x$	0.78

По всем же измерениям КрАО – СОУ за 1975–2006 гг. наклон $b = 0.45(1)$; он, однако, сильно менялся с годами (табл. 2). Можно было бы думать, что разброс случайный и обусловлен, в основном, повышенной погрешностью крымских измерений. Однако аналогичный разброс наклонов по годам имеет место и при сравнении измерений, выполненных в других обсерваториях; например, в СОУ и Маунт-Уилсон, (табл. 3), а также Котов и др. (1998а), Котов (2003).

Таблица 3. Уравнения линейной регрессии “Маунт-Уилсон (x) – Стэнфорд (y)”

Год	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
1975	158	0.69	0.19	$y = +0.06(2) + 0.08(2) \times x$	0.32
1976	217	0.50	0.12	$y = +0.04(1) + 0.05(2) \times x$	0.20
1977	184	0.29	0.16	$y = +0.08(1) + 0.23(4) \times x$	0.41
1978	171	0.50	0.27	$y = -0.01(2) + 0.33(4) \times x$	0.63
1979	191	1.11	0.45	$y = +0.09(3) + 0.28(3) \times x$	0.67
1980	167	0.64	0.44	$y = -0.10(3) + 0.48(4) \times x$	0.67
1981	179	0.91	0.64	$y = +0.06(3) + 0.54(4) \times x$	0.77
1982	175	0.45	0.67	$y = +0.03(3) + 1.20(7) \times x$	0.80

Таблица 4. Сравнение измерений “BiSON (x) – СОУ (y)” и “BiSON (x) – КрАО (y)”

Год	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
BiSON – СОУ					
1992	168	0.68	0.39	$y = -0.07(3) + 0.38(04) \times x$	0.66
1993	213	0.51	0.34	$y = -0.08(2) + 0.53(03) \times x$	0.80
1994	228	0.41	0.28	$y = -0.04(1) + 0.58(03) \times x$	0.86
1995	144	0.28	0.19	$y = -0.03(1) + 0.54(04) \times x$	0.80
1996	173	0.23	0.13	$y = -0.01(1) + 0.35(04) \times x$	0.62
1997	227	0.15	0.12	$y = +0.02(1) + 0.48(05) \times x$	0.57
2000	190	0.48	0.46	$y = +0.10(3) + 0.73(05) \times x$	0.76
2001	183	0.42	0.39	$y = +0.14(2) + 0.75(04) \times x$	0.81
BiSON – КрАО					
1993	34	0.47	0.52	$y = -0.31(8) + 0.77(17) \times x$	0.70
1994–1995	14	0.24	0.32	$y = +0.15(7) + 1.05(30) \times x$	0.79
1996–1997	27	0.27	0.28	$y = +0.13(6) + 0.48(21) \times x$	0.47
2000	84	0.51	0.87	$y = +0.02(4) + 1.60(07) \times x$	0.94
2001	64	0.40	0.51	$y = +0.09(4) + 1.10(09) \times x$	0.85

5 Корреляции КраО – Стэнфорд – ViSON – Китт-Пик

Магнитографы КраО и Стэнфорда – “старого” типа: применяются спектрографы высокого спектрального разрешения, в качестве же фотодетекторов – ФЭУ; главная особенность Стэнфорда – применение имидж-слайсера, увеличивающего световой поток в десятки раз по сравнению с магнитографом КраО. Измерения ViSON делаются методом атомной резонансной спектроскопии: с магнито-оптическим фильтром, без спектрографа; чувствительность прибора более чем на порядок лучше, чем в КраО, и формально раз в пять лучше, чем в Стэнфорде (табл. 1). Не менее “продвинутой” технику применяют и наблюдатели Китт-Пик: (а) уникальный интерференционно-поляризационный фильтр, выделяющий линию 630.15, (б) изображение Солнца строится на ПЗС-матрице с большим числом ячеек (наверное, 2048×2048), (в) поле измеряется в каждой ячейке размером 1 угл. сек, (г) СМП определяется как среднее сигналов всех ячеек. (На Китт-Пик дополнительно, впервые в мире, определяется ежедневно и *средняя абсолютная продольная напряженность поля* Солнца-как-звезды, а именно: среднее модулей продольных полей ПЗС-ячеек, соответствующих практически всему диску Солнца. Об анализе этих совершенно новых для солнечной физики данных и предварительных результатах см. Котова (2007). Действие саянского магнитографа в принципе не отличается от действия магнитографов КраО и СОУ, но в 1998 г. ФЭУ там были заменены ПЗС-линейкой (Демидов и др., 2005б).)

Таблица 5. Сравнение измерений “Китт-Пик (x) – Стэнфорд (y)” и “Китт-Пик (x) – КраО (y)”. (А и В обозначают первую и вторую части года)

Год	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
ОКП – СОУ					
2003-В	17	1.15	0.59	$y = +0.05(7) + 0.48(6) \times x$	0.94
2004-А	55	0.86	0.41	$y = +0.03(2) + 0.45(3) \times x$	0.94
2004-В	83	0.55	0.35	$y = +0.01(2) + 0.57(4) \times x$	0.89
2005-А	84	0.47	0.24	$y = +0.02(2) + 0.40(4) \times x$	0.79
2005-В	86	0.48	0.28	$y = +0.02(2) + 0.52(4) \times x$	0.88
2006-А	72	0.31	0.19	$y = -0.02(2) + 0.44(6) \times x$	0.72
2006-В	103	0.27	0.13	$y = +0.01(1) + 0.40(3) \times x$	0.83
ОКП – КраО					
2003–2004	65	0.67	0.48	$y = -0.02(4) + 0.61(6) \times x$	0.85
2005	35	0.44	0.45	$y = -0.12(4) + 0.91(9) \times x$	0.90
2006	57	0.28	0.25	$y = -0.10(2) + 0.74(8) \times x$	0.82

По разным техническим причинам и, в частности, из-за различий спектрального разрешения, чувствительности линий и уровней светового потока типичные погрешности СМП-измерений шести инструментов сильно различаются: ± 0.15 Гс – КраО (для линии 525.0), ± 0.07 Гс – Маунт-Уилсон, ± 0.05 Гс – Стэнфорд и Саяны и ± 0.01 Гс – ViSON и Китт-Пик.

Измерения ViSON выполнены в 1992–2001 гг., и их можно сопоставить с “одновременными” измерениями Крыма и Стэнфорда (о сравнении с саянскими данными за 1993 г. см. п. 10). Результаты корреляционных вычислений приведены в табл. 4, из которой следует, что всюду разброс накло-

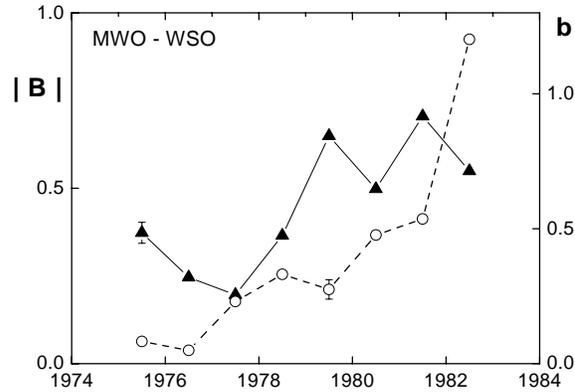


Рис. 4. Изменение с фазой цикла наклона b для измерений Маунт-Уилсон и Стэнфорд согласно табл. 3 (1975–1982 гг.; кружки, пунктирная линия и правая ось). По горизонтали – годы; треугольниками и отрезками сплошной линии показан ход среднегодовых значений $|B|$ (в гауссах, левая ось), вертикальные черточки отвечают средним ошибкам $|B|$ и b

нов (с фазой цикла, а точнее, от года к году) такой же, как и при сравнении измерений других обсерваторий. В табл. 5 приведены корреляционные соотношения при сопоставлении Китт-Пик со Стэнфордом и КраО по годовым или полугодовым массивам. Как видим из обеих таблиц, разность наклонов разных пар сравниваемых массивов превышает иногда уровень значимости 3σ .

6 Само Солнце “определяет” степень разногласия СМП?

Особый интерес вызывает изменение b с ходом 11-летней активности Солнца, демонстрируемое рис. 4 и 5. Результаты получены для двух пар рядов СМП: ОМУ – СОУ за 1975–1982 гг. и КраО – СОУ за 1991–2006 гг. В качестве индекса СА приняты среднегодовые значения $|B|$ согласно рис. 1, а наклоны b взяты из табл. 2 и 3. Видно, что b имеет тенденцию расти к максимуму СА, т. е. с увеличением модуля СМП, и уменьшаться к минимуму СА. Заметим, однако, что в 2006 г. (в конце цикла 23) наклон b (Крым – Стэнфорд) вместо ожидавшегося уменьшения существенно возрос. Это мы связываем с изменением крупномасштабной структуры поля, т. е. с тем фактом, что истинный магнитный цикл составляет не 10.5 г, а 21 г. (подчеркнем, что в последние сто лет длительность цикла была 10.5 г. вместо обычных 11.1 г.). Аналогичный вывод следует и из сравнения с ходом $|B|$ других пар наклонов всех шести обсерваторий, включая и наклоны, полученные из сравнения BiSON с КраО и СОУ.

Общая закономерность такова: наклон b увеличивается в годы максимума СА и падает в годы минимума (для выбранной системы x - и y -осей и регрессии $y|x$), но возможны и заметные отклонения, обусловленные 21-летним циклом. Особенно “красиво” эта закономерность проявляется для данных КраО – Стэнфорд на рис. 5. Отметим, что главный вывод работы о систематическом изменении b с ходом цикла (а точнее, от сезона к сезону или от года к году) не зависит от принятого типа регрессии, $y|x$ или $x|y$. (Эмпирические коэффициенты регрессии $b_{y|x}$ и $b_{x|y}$ совпадают по знаку с r и связаны соотношением: $b_{y|x}b_{x|y} = r^2$.) Аналогичное изменение испытывает и коэффициент корреляции r . Но последнее тривиально и легко объясняется изменением с ходом цикла среднегодовых $|B|$ и, соответственно, стандартных отклонений S сравниваемых рядов. Важно также подчеркнуть, что измерения, выполненные по одной и той же линии 525.0 на разных магнитографах и в разные годы, отличаются так же сильно друг от друга, как и измерения по разным линиям на одном и том же инструменте (Котов и др., 1998а; Котов, 2003).

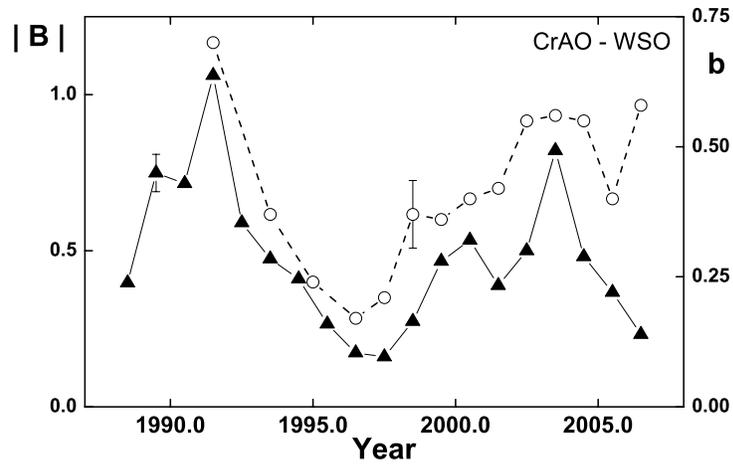


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для измерений КрАО и Стэнфорда за 1991–2006 гг.

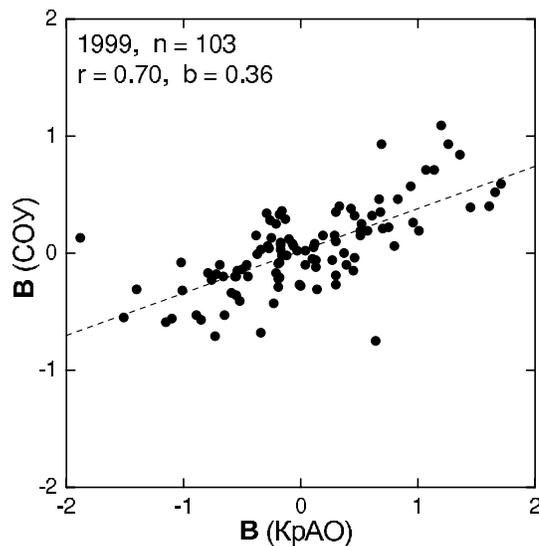


Рис. 6. Сравнение напряженностей СМП, измеренных в Крыму и Стэнфорде в одни и те же UT-даты 1999 г. Пунктирная линия – прямая линейной регрессии с наклоном $b = 0.36$ (число пар $n = 103$, напряженность B в гауссах)

На рис. 6 и 7 приведены корреляционные зависимости СМП по данным КрАО и Стэнфорда за 1999 и 2003 гг. Число сравниваемых пар B : $n = 103$ и 132 , коэффициенты корреляции $r = 0.70$ и 0.94 соответственно для 1999 и 2003 гг. Наклоны этих двух лет различаются примерно в полтора раза:

$$B(WSO) = +0.02(3) + 0.36(4) \times B(CrAO), \quad (1)$$

$$B(WSO) = -0.01(2) + 0.56(2) \times B(CrAO), \quad (2)$$

соответственно со значимостью различия более 4σ .

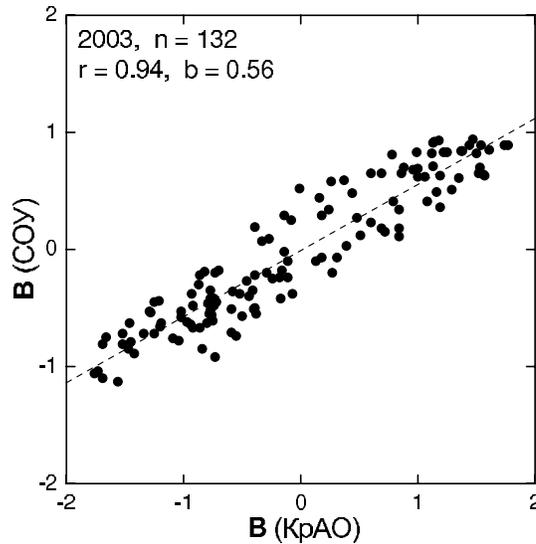


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для измерений 2003 г. ($n = 132$, $b = 0.56$)

Возникает парадокс: “Солнце “влияет” на калибровку магнитографа, или на степень различия двух инструментов” (?). Но с точки зрения “здорового смысла” это исключено. Обычная лабораторная практика и теория эксперимента учат, что в нашем опыте с Солнцем отношение δ и наклон b должны быть в пределах ошибки постоянными и не зависящими от состояния магнитного Солнца. Ведь по сути с помощью двух приборов, идентичных по принципу работы, практически одновременно измеряется малая поляризация света одного и того же “магнитного стандарта” и при отсутствии нелинейных инструментальных эффектов.

7 О калибровке и насыщении

Калибровка магнитографа заключается в определении соотношения между степенью круговой поляризации в крыльях линии и напряженностью продольного поля B фотосферы. Процедура калибровки проста и, в принципе, одинакова во всех обсерваториях, применяющих спектрограф (СГ) (подобная же “дифференциальная” методика и в методах BiSON и Китт-Пик; о некоторых особенностях измерений *SOLIS-VSM*, ОКП см. ниже). А именно: с помощью поляризатора создается 100 %-я круговая поляризация света, линия в фокальной плоскости СГ смещается тем или иным методом в сторону от центра фотометра на величину “доплеровского сдвига” $\Delta\lambda_C$, меньшую полуширины линии $\Delta\lambda_W$, и регистрируется калибровочный сигнал C . Затем по формуле зеемановского расщепления

$$\Delta\lambda_B = 4.67 \times 10^{-5} g \lambda^2 B \quad (3)$$

находится фактор K , связывающий C и B (длина волны λ и расщепление $\Delta\lambda_B$ выражены в см).

Учитывая все возможные источники погрешностей: неопределенности $\Delta\lambda_W$ и $\Delta\lambda_C$, ошибки компенсации сигнала за яркость и лучевую скорость, асимметрию и флуктуации контура линии и ее инструментальное расширение, вариации, обусловленные прозрачностью атмосферы и гидрированием, возможные остаточные нелинейности электро-механических устройств, шумы электроники и случайные ошибки, – можно с большой уверенностью сказать, что результирующая относительная погрешность K не может превышать 15 %. Это подтверждается пятью стандартными отклонениями S , приведенными в табл. 1 (КрАО, ОМУ, ССО и ОКП): они отклоняются не более чем на 13 % от

общего среднего $S'_0 = 0.69$ Гс. (Исключение – данные Стэнфорда и BiSON. Занижение S этих двух обсерваторий примерно на 40 % по сравнению с S'_0 остальных обсерваторий остается загадкой.)

Причиной изменений b со временем может быть нестационарность технических различий приборов, а также зависимость средних значений $|B|$ и/или δ -эффекта от фазы цикла. Последнее – в модели тонких жгутов – можно связать с изменением вклада сильных и слабых полей в суммарный сигнал СМП (Демидов и др., 2002, 2005б), а также с эволюцией распределения крупномасштабных полей в течение цикла. А это соответственно может вести к усилению или ослаблению насыщения в ходе цикла. Сам же эффект насыщения (Говард и Стенфло, 1972) обусловлен сильными полями, приводящими к такому расщеплению линии, что экстремумы параметра Стокса V в крыльях линии достигают выходных щелей магнитографа или даже выходят за их рамки. Это и должно вести к снижению сигнала продольного поля.

У магнитографа СОУ участок профиля линии, где регистрируется поляризация, соответствует расстояниям 0.9 и 8.4 пм, с серединами “измеряемых” частей контура на расстояниях $d = 4.7$ пм по обе стороны от центра линии. В Крыму соответствующие параметры 3.5–9.0 пм и $d = 6.3$ пм. В модели концентрированных магнитных жгутов естественно полагать, что максимум $|B|$ должен сопровождаться ростом числа жгутов и, возможно, их средней напряженности по модулю, и плотности распределения в фотосфере. В такой модели наклон b на рис. 5 должен *уменьшаться* с ростом $|B|$ из-за большей чувствительности магнитографа СОУ к насыщению: d гораздо меньше, чем в Крыму. На деле же имеем противоположную картину: наклон *увеличивается* с ростом $|B|$ и падает с уменьшением $|B|$, т. е. с приближением к минимуму СА (кроме минимума 2006 г., о чем говорилось выше). Также непонятно, почему b сильно изменяется с ходом цикла для измерений ОМУ – СОУ (рис. 4): ведь у обоих магнитографов идентичное расположение выходных щелей, $d = 4.7$ пм. И далее, из четырех инструментов, измерявших СМП по линии 525.0 (КрАО, ОМУ, СОУ и ССО), наиболее чувствительным к δ -эффекту должен быть саянский магнитограф с $d = 3.5$ пм. Но он показал максимальное значение, 0.77 Гс, из семи “индивидуальных” S в табл. 1. Эти факты противоречат модели, основанной на доминантной идее о “насыщении” и “сверхтонкой магнитной структуре”.

Таблица 6. Сопоставление измерений СМП двумя каналами КрАО (x – канал I, y – канал II)

Год	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
1991	27	1.06	1.33	$y = +0.13(13) + 1.16(12) \times x$	0.92
1993	49	0.69	0.55	$y = -0.35(08) + 0.41(11) \times x$	0.52
1994–1995	28	0.42	0.40	–	–0.05
1996	26	0.30	0.36	–	0.00
1997	19	0.22	0.46	$y = -0.11(12) + 1.07(50) \times x$	0.52
1998	49	0.32	0.63	$y = -0.20(09) + 0.95(28) \times x$	0.49
1999	107	0.52	0.92	$y = -0.01(06) + 1.42(11) \times x$	0.80
2000	107	0.58	1.18	$y = -0.00(06) + 1.79(10) \times x$	0.88
2001	120	0.44	0.74	$y = +0.23(06) + 0.90(14) \times x$	0.53
2002	156	0.49	0.91	$y = -0.05(05) + 1.39(11) \times x$	0.75
2003	159	0.65	1.37	$y = -0.03(06) + 1.83(09) \times x$	0.87
2004	142	0.39	0.73	$y = -0.09(05) + 1.30(12) \times x$	0.70
2005	49	0.31	0.59	$y = -0.12(07) + 1.33(22) \times x$	0.70
2006	85	0.25	0.31	$y = -0.18(02) + 1.04(09) \times x$	0.81

Различия b , а по сути масштабов СМП, определяемых разными магнитографами, аналогичны

расхождением напряженностей *локально* измеряемых полей по разным линиям, т. е. δ -эффекту. Но там, как указывалось выше, установилось такое объяснение: влияют насыщение, обусловленное тонкоструктурными жгутами с сильным полем, а также чувствительность линии к температуре и расхождение силовых линий с высотой. Но и эта обобщенная гипотеза встречается с трудностями (Котов, 2003). Демидов и др. (2005б), например, отметили существенную асимметрию профиля параметра Стокса V внутри контура линии, усиливающейся с *уменьшением* $|B|$. Это связывается с ростом шумов, но реальная причина непонятна: в модели тонких жгутов асимметрия должна расти с *увеличением* $|B|$. А измерения Китт-Пик, где не применяются выходные щели в крыльях линии, вообще должны быть свободными от насыщения. Метод BiSON по ряду причин тоже практически от него свободен (Чаплин и др., 2003); но удивительно, что стандартное отклонение BiSON $S = 0.43$ Гс такое же, как и в Стэнфорде (0.41 Гс). На наш взгляд, проблема более принципиального характера, нежели просто расхождение напряженностей, измеренных по разным линиям или с помощью разных инструментов.

8 Новая загадка: два канала одного магнитографа

Измерения КраО с 1973 г. отличаются от измерений других обсерваторий тем, что на модернизированном крымском телескопе БСТ-1 используются оба световых пучка, создающиеся на входе света в СГ после расщепляющей призмы Рошона (обыкновенный и необыкновенный пучки, поляризованные взаимно ортогонально (Котов и др., 1982)). На БСТ-1 поэтому работают с 1973 г. фактически два магнитографа, называемые каналами I и II. Они практически независимы, имея общими, однако: питающую оптику телескопа и гидирующую систему до входа света в СГ, входную щель СГ, калибровочный поляризатор и электро-оптический кристалл КДП вместе с общим модулирующим напряжением и его генератором. *Раздельными* же они обладают: всеми оптическими элементами внутри СГ, включая решетки, оптическими фильтрами, фотодетекторами (ФЭУ) и электроникой, вместе с раздельными усилителями, синхронно-фазовыми детекторами и выпрямителями, компенсаторами яркости и лучевой скорости, калибровочными механизмами, потенциометрами, интегрирующими и запоминающими устройствами. Установки выходных щелей идентичные, $d = 6.3$ нм, и потому влияние насыщения должно быть для обоих каналов одинаковым.

Измерения СМП в 1975–2006 гг. на БСТ-1 производились почти всегда одновременно на обоих каналах. Для мирового же каталога публикуется средний результат двух каналов; при отсутствии (редком) результата одного из каналов публикуется результат работавшего канала.

Наиболее регулярно “двойные” измерения по линии 525.0 сделаны в 1991–2006 гг.; результаты сравнения двух каналов приведены в табл. 6. Видно, что при достоверности линейной регрессии > 0.95 ($r \gtrsim 0.50$) наклон b меняется в 3–4 раза, примерно так же, как и для измерений СМП на разных магнитографах в разные годы. В эпоху минимума 1994–1996 гг. корреляция отсутствует: СМП теряется в шумах. Все это иллюстрируется рис. 8 (нулевые b для 1995–1996 гг. имеют, конечно, условный смысл, отражая отсутствие корреляции вообще). Заметим также, что наиболее заметные отклонения b от хода $|B|$ в 1994–1997 гг. обусловлены, очевидно, малым числом измерений в эти годы (табл. 6).

9 Распределения СМП

Интересно знать, каково распределение СМП двух каналов. Простая “логика статистики” говорит, что распределение B при достаточно большом числе испытаний/измерений должно быть нормальным. Согласно Котову (2003) два магнитографа, крымский (по опубликованным данным, т. е. со средними значениями двух каналов) и саянский, показывают распределения $m(B)$, практически совпадающие с нормальными. Данные же ОМУ и СОУ показывают *аномальные* распределения, близкие к экспоненциальным: плотность вероятности

$$p(B) \sim m(B) \sim e^{-|B|/\tau}, \quad (4)$$

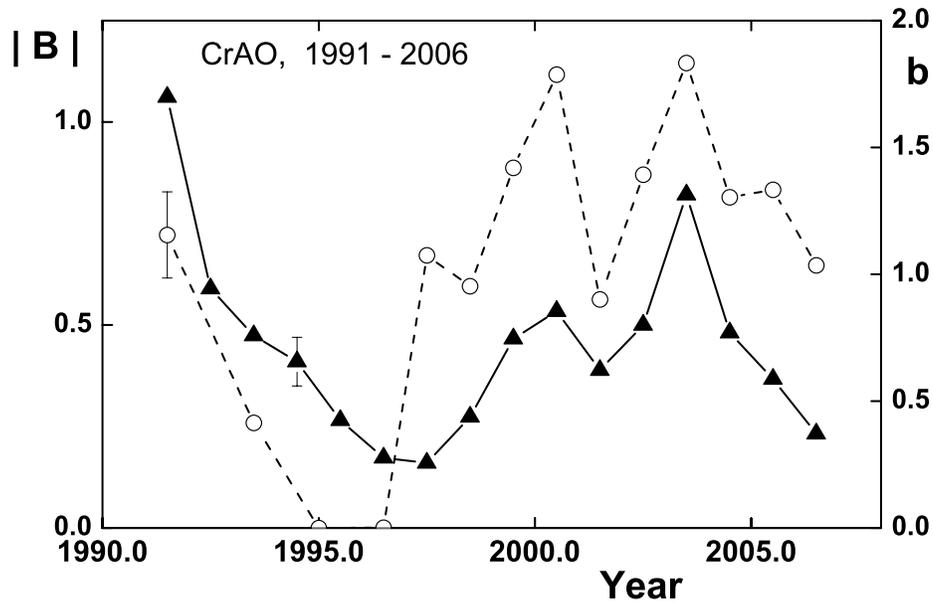


Рис. 8. То же, что на рис. 5, для измерений КрАО каналами I и II в 1991–2006 гг.

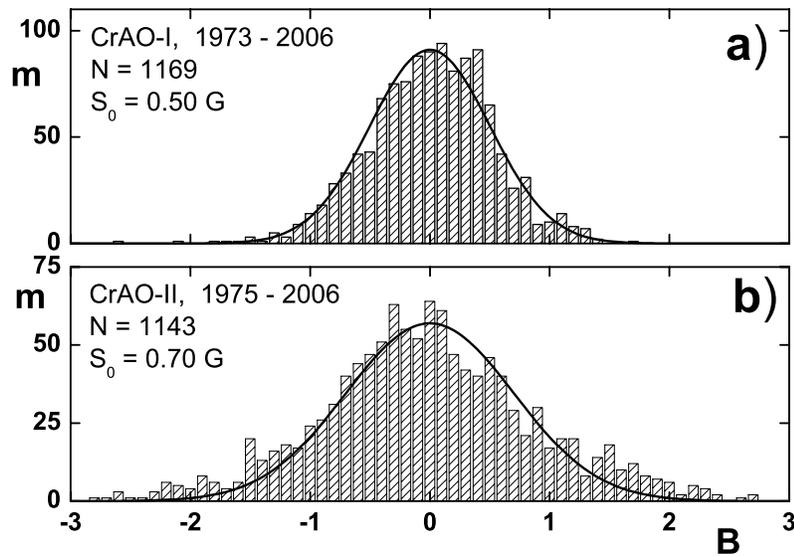


Рис. 9. Распределения СМП по измерениям КрАО: (а) – канал I (1973–2006 гг., $N = 1169$), (b) – канал II (1975 – 2006 гг., $N = 1143$; одно значение, $B = -3.28$ Гс, выходит за рамки рисунка). Сплошными линиями показаны аппроксимирующие гауссовские кривые со стандартными отклонениями $S_0 = 0.50$ и 0.70 Гс соответственно

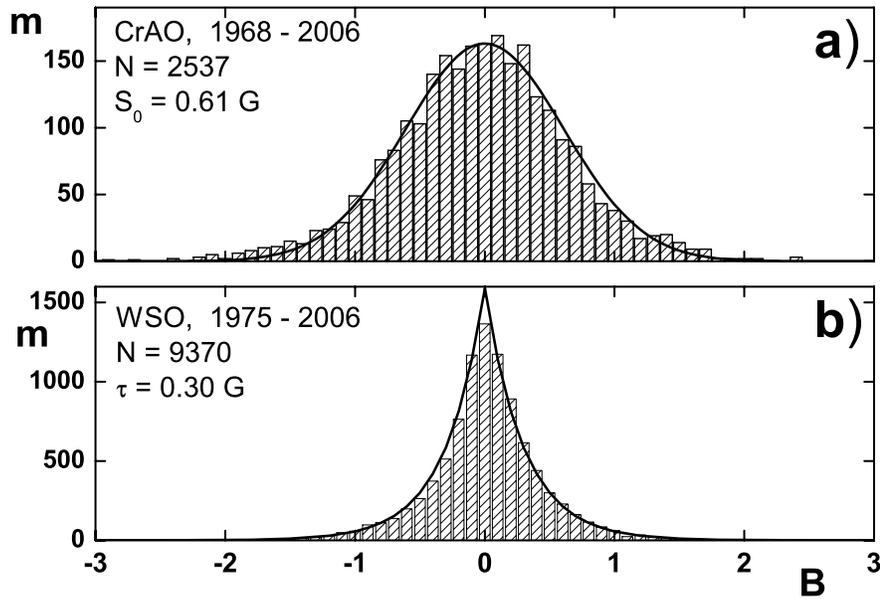


Рис. 10. Распределения СМП по всем измерениям (а) КраО за 1968–2006 гг., $N = 2537$, и (б) Стэнфорда за 1975–2006 гг., $N = 9370$ (одно значение, $B = +3.44$ Гс, выходит за рамки графика). Сплошными линиями показаны аппроксимирующие кривые (см. текст)

где τ – параметр “когерентности” или “затухания”.

Причина аномальности данных ОМУ – СОУ не установлена. Мы полагаем, что она связана с квантовыми свойствами света и влиянием самого прибора, или *акта измерения*, на состояние фотонов и результат. Главным источником аномальности, или “квантовой нелинейности”, может являться применение в спектрографах ОМУ и СОУ имидж-слайсеров (image-slicer, или светоделиТЕЛЬ) (подробнее см. ниже, а также Котов, 2003).

На рис. 9 приведены распределения всех измерений КраО за 1973–2006 гг. по измерениям на двух каналах отдельно. Они удовлетворительно аппроксимируются гауссовскими кривыми со среднеквадратичными отклонениями 0.50 и 0.70 Гс для каналов I и II соответственно. (Это близко к стандартным отклонениям двух рядов: 0.52 и 0.91 Гс (табл. 7). Средние значения двух распределений практически нулевые: +0.010(15) и –0.027(27) Гс для каналов I и II соответственно. Различие на 40 % между S - и S_0 -параметрами двух каналов следует отнести на счет различия чувствительностей и неопределенности калибровок.)

На рис. 10 представлены распределения всех данных КраО за 1968–2006 гг. ($N = 2537$; при работе обоих каналов бралось среднее значение B двух каналов) и Стэнфорда за 1975–2006 гг. ($N = 9370$). Крымское хорошо аппроксимируется гауссовской кривой с параметром $S_0 = 0.61$ Гс, что близко к значению $S = 0.67$ Гс крымского ряда. Распределение же стэнфордских данных резко отличается от нормального, хорошо аппроксимируясь экспонентой с параметром $\tau = 0.30$ Гс. Различие этих распределений и послужило главным поводом нам выдвинуть гипотезу о проявлении квантовой природы света – нелокальности, или неразличимости, фотонов – при измерениях зеемановской поляризации Солнца и звезд (Белинский, 1997; Сантори и др., 2002; Котов, 2003). Средние значения распределений: –0.035(14) Гс и +0.003(5) Гс для Крыма и Стэнфорда соответственно.

Распределение BiSON показано на рис. 11; оно имеет среднее +0.027(10) Гс и качественно такое же, как стэнфордское, т. е. экспоненциальное. Причину этой аномальности мы видим также в

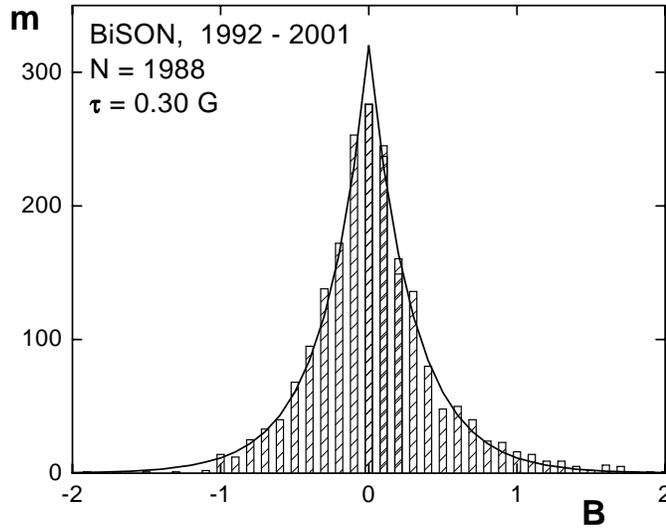


Рис. 11. То же, что на рис. 10б, для данных BiSON: 1992–2001 гг., $N = 1988$, $\tau = 0.30$ Гс

квантовых свойствах света. А именно: в неизбежном для метода резонансной спектроскопии взаимодействии солнечных фотонов с лабораторными (свечением паров калия), что изменяет поляризацию света при “слиянии” фотонов. Интересно, что S и τ – практически одинаковые для Стэнфорда и BiSON.

Распределение *SOLIS-VSM* (Китт-Пик) показано на рис. 12. Оно более или менее близко к нормальному со средним $0.001(0.023)$ Гс и параметром $S_0 = 0.45$ Гс (последний меньше стандартного отклонения ряда 0.60 Гс). Число данных, однако, пока недостаточно для уверенного утверждения о нормальности. Дело в том, что хотя число измерений (677) почти вдвое больше, например, чем число измерений в Саянах (313), но они относятся только к ветви спада 23-го цикла, тогда как измерения ССО сделаны на разных фазах цикла. Отклонения от нормальности и асимметрия рис. 12 могут быть связаны с ограниченностью интервала измерений (немногим более трех лет). Кроме того, согласно сайту *SOLIS-VSM*, эти данные в настоящее время находятся в стадии коррекции и оптимизации, а также уточнения нуля-пункта. По нашему мнению, близость распределения *SOLIS-VSM* к нормальности гарантируется тем, что в приборе отсутствует фактор “взаимодействия” световых пучков, явно присутствующий в наблюдениях обсерваторий Маунт-Уилсон, Стэнфорд и BiSON.

10 Итоговая корреляция

В табл. 7 приведены b и r , вычисленные без селекции по годам для *всех* опубликованных данных 1968–2006 гг., для шести обсерваторий, включая сопоставление двух каналов КрАО. (Данные КрАО в таблице получены по линии 525.0; стандартные отклонения обсерваторий, S_x и S_y , определены по “одновременным” парам сравниваемых рядов. При сравнении саянских данных с калифорнийскими ряд ССО сдвигался на одни сутки назад по отношению к рядам ОМУ и СОУ: измерения ССО делались, как правило, в начале конкретных УТ-суток, а измерения ОМУ – СОУ – в их конце. Пары сравниваемых обсерваторий в таблице приведены в порядке убывания r .)

Коэффициент корреляции двух каналов КрАО равен 0.74 ($n = 1153$). Он примерно такой же, как для измерений “Крым – Стэнфорд” ($r = 0.78$, $n = 1222$) и “Саяны – Стэнфорд” ($r = 0.77$, $n = 256$), но

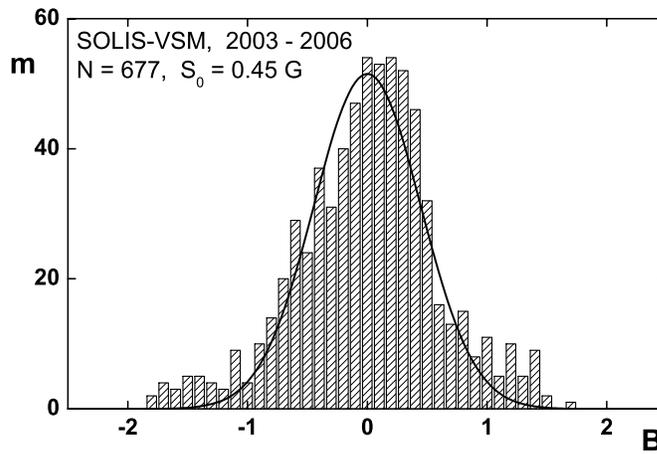


Рис. 12. То же, что на рис. 10а, для SOLIS-VSM: 2003–2006 гг., $N = 677$, $S_0 = 0.45$ Гс

существенно выше, чем для измерений “Маунт-Уилсон – Стэнфорд” ($r = 0.58$, $n = 1442$). У Крыма и Стэнфорда почти одинаковое согласие с измерениями Китт-Пик; в то же время КрАО несколько лучше коррелирует с BiSON, чем Стэнфорд и Саяны. Это удивительно, поскольку типичная крымская погрешность Δ втрое превосходит Δ Стэнфорда и ССО (табл. 1). Объяснение может быть одним: расхождения определяются не столько формальными ошибками, сколько спецификой измерений – самим *актом измерения*, внутренне, “глубинно”, связанным с квантовой, статистической природой света.

Таблица 7. Итоговая корреляция разных магнитографов (формат: $x - y$)

Магнитографы	Интервал, гг.	n	S_x , Гс	S_y , Гс	Уравнение	r
ОКП–СОУ	2003 – 2006	500	0.55	0.29	$y = +0.01(1) + 0.47(01) \times x$	0.88
ОКП–КрАО	2003 – 2006	157	0.51	0.41	$y = -0.06(2) + 0.67(04) \times x$	0.84
BiSON–КрАО	1993 – 2001	223	0.45	0.66	$y = +0.01(3) + 1.20(06) \times x$	0.82
ССО–ОМУ	1982	32	0.72	0.42	$y = -0.03(5) + 0.47(04) \times x$	0.81
КрАО–СОУ	1975 – 2006	1222	0.64	0.37	$y = +0.07(1) + 0.45(01) \times x$	0.78
ССО–СОУ	1982 – 1993	256	0.77	0.52	$y = -0.05(2) + 0.51(03) \times x$	0.77
КрАО: I–II	1974 – 2006	1153	0.52	0.91	$y = -0.04(2) + 1.30(04) \times x$	0.74
BiSON–СОУ	1992 – 2001	1526	0.43	0.31	$y = -0.00(1) + 0.51(01) \times x$	0.71
ССО–BiSON	1993	23	0.25	0.35	$y = -0.03(7) + 0.91(28) \times x$	0.66
ОМУ–СОУ	1975 – 1982	1442	0.68	0.42	$y = +0.02(1) + 0.35(02) \times x$	0.58
КрАО–ОМУ	1970 – 1976	665	0.55	0.59	$y = +0.03(3) + 0.27(04) \times x$	0.26

Степень согласия, как указывалось выше, зависит от среднего $|B|$, т. е. от фазы активности Солнца. Поэтому высокую корреляцию Китт-Пик – Стэнфорд и Китт-Пик – Крым для 2003–2006 гг. (табл. 7) следует в значительной мере приписать повышенному уровню $|B|$ в эти годы, особен-

но в 2003–2004 гг. Заметим, в частности, что вблизи максимумов СА с большим среднегодовым $|B|$ (рис. 1 а) имела место и *наилучшая* корреляция для *всех* сравниваемых пар массивов, включая все годовые за все 39 лет. А именно, $r = 0.94$ для измерений Крым – Стэнфорд в 1991 г. и 2003 г. и для измерений BiSON – Крым в 2000 г. (табл. 2 и 4).

Слабую корреляцию Крым – Маунт-Уилсон в 1970–1976 гг. следует приписать большим шумам крымских измерений в те годы: основная часть измерений тогда делалась на телескопе МБСТ (ныне БСТ-2) со “старым” магнитографом, т. е. до реконструкции БСТ-1 и магнитографа в 1969–1973 гг. В понижении корреляции сказались также, по-видимому, падение среднего $|B|$ в годы минимума 1975–1976 гг. и повышенные ошибки инструментального “нуля” ОМУ, где он определялся по сигналу с выключенным модулирующим напряжением кристалла. (В КраО, СОУ и ССО применяются более строгие методы контроля нуля-пункта (Шеррер и др., 1977а; Котов и др., 1998b; Демидов и др., 2005б).)

Исключим по указанным причинам из данных табл. 7 все “старые” крымские измерения, выполненные в 1968–1976 гг. в основном на старом магнитографе. Тогда для средних r взаимных корреляций данной обсерватории с остальными получаем: 0.86 – Китт-Пик, 0.83 – Крым, 0.75 – Саяны и Стэнфорд, 0.73 – BiSON и 0.72 – Маунт-Уилсон. (Сравнение имеет, конечно, ограниченный характер: “забываем” на время о сильном различии n , а также то обстоятельство, что измерения относятся к разным фазам цикла.) И снова “парадокс”: качество измерений КраО, “самых плохих”, с наибольшей формальной погрешностью Δ , примерно такое же, как качество наилучших, “продвинутых” измерений Китт-Пик и несколько лучше, чем качество других обсерваторий (!?).

11 Дело – в квантовой природе света?

Годичные массивы (табл. 2–6) показывают, что b существенно меняется от года к году. Это обостряет проблему *количественной* интерпретации эффекта Зеемана фотосферы. Можно предположить, например, что причина разброса СМП и временных вариаций b кроется в изменениях самого “магнитного стандарта” Солнца, ведущих к флуктуациям среднегодовых $|B|$, b и r :

- (а) с ходом цикла АО и часть фоновых (крупномасштабных) полей смещаются к экватору;
- (б) структуры фонового поля в годы минимума становятся более мелкими и более перемешанными по знаку полярности по сравнению с годами максимума;
- (в) в годы минимума растет средняя напряженность полярных шапок;
- (г) абсолютные напряженности СМП и спокойной фотосферы увеличиваются в годы максимума (рис. 1, а также Котов и Демидов, 1980; Котов и Сетяева, 2002);
- (д) изменяется плотность распределения магнитных жгутов, или фактор заполнения, в спокойной фотосфере, а также характерная напряженность поля жгутов (Демидов и др., 2005а,б).

Но эти обстоятельства не могут объяснить поведение b потому, что феномен жгутов, или δ -эффект, должен сказываться *одинаково* на оба сравниваемых инструмента, особенно с идентичными d , и потому не может приводить к существенному временному изменению наклонов, явно выраженному, например, на рис. 4–8. Против перечисленных пунктов говорит и корреляция b с $|B|$ на рис. 4, 5 и 8, а также отсутствие корреляции b с расположением выходных щелей магнитографа по отношению к центру линии, т. е. с чувствительностью прибора к насыщению.

Весь наблюдательный материал, более обширный, чем ранее (Котов, 2003), говорит, что причиной является само *измерение*, а точнее – комплекс “инструмент-свет”. Дело, по-видимому, в квантовых свойствах света и действии на фотоны акта измерения. Природа “беспорядка” в измерениях магнитного поля Солнца (в данном случае СМП) может быть связана с явлением сцепления (слияния/запутанности/неразличимости/нелокальности) фотонов и влиянием самого приемного тракта на формирование светового поля (Белинский, 1997; Бувместер и др., 1997; Сантори и др., 2002). А именно: при рассмотрении процесса образования линии в замагниченной атмосфере Солнца и последующего акта регистрации игнорируется квантовая природа света, кроме, конечно, факта зеемановского расщепления уровней атома и поляризации фотонов. На деле, наверное, определенными квантовыми эффектами пренебрегать нельзя. В частности, явлениями сцепления (“сложности”,

“взаимозависимости”, или entanglement) и неразличимости, слияния (coalescence) фотонов. Не будем касаться сложного вопроса квантового сцепления фотонов в процессах излучения и переноса в солнечной атмосфере, да еще в присутствии магнитного поля. А также известной проблемы – деполаризации излучения из-за эффекта Штарка, роль которого неизвестна. Но при измерениях с магнитографом сцепление (слияние/неразличимость) квантов неизбежно должно возникать, поскольку применяются дифракционная решетка или фильтр, электро-оптический модулятор и поляризатор. При этом часть света – частично-поляризованные фотоны – поглощается или трансформируется в модуляторе-поляризаторе, другая часть после решетки и/или фильтра регистрируется фотодетектором. Результат же детектирования, по Бору, существенно зависит от свойств измерительного устройства и самого “акта измерения”. В нашем случае квантовые состояния фотонов, т. е. их поляризация и соответственно сигнал магнитографа, в существенной мере определяются *всем* световым пучком внутри СГ.

Искажение сигнала магнитографа – неизбежное следствие и важная черта квантово-механического подхода: нельзя делать определенных выводов об измерении электромагнитного поля без учета влияния инструмента, который взаимодействует с полем (фотонами). Сама квантовая природа света, таким образом, ставит предел точности/объективности измерений, становясь одновременно и главным источником собственных шумов системы “звезда-свет-инструмент” и статистических искажений сигнала (о теоретических аспектах проблемы см. Белинский, 1997). Это возвращает нас к спору 30-х годов прошлого века между Бором и Эйнштейном о сущности “квантового реализма”: существует ли определенное квантовое состояние частицы (направление поляризации фотона, положение или импульс электрона) до акта измерения? Эйнштейн настаивал, что неизмеренное, но определенное состояние должно существовать до измерения, хотя мы можем не знать, какое оно в действительности. Бор же полагал, что неизмеренные параметры существуют только потенциально, с вероятностями, вытекающими из уравнений квантовой механики. И только *при измерении* волновая функция коллапсирует к определенной измеряемой величине. Развитие теории (теорема, или неравенства Белла) и эксперимента в конце XX в. по проверке “квантового реализма” показало, что прав был Бор: “инструмент неизбежно влияет на результат измерения”. Или, словами Гланца (1995), “квантовые эксперименты показали, что главная реальность – само измерение”.

Вследствие сцепления/слияния акт измерения изменяет поляризацию фотонов-близнецов (имеющих близкие квантовые состояния и частоты) с коэффициентом влияния/сцепления, зависящим от конкретного устройства инструмента, метода детектирования, а также поляризации света, т. е. в нашем случае и от фактической напряженности и распределения поля на видимой полусфере Солнца.

12 Акт “измерение Солнца”

Рассмотрим, например, регистрацию СМП в “параллельном” пучке света от Солнца-как-звезды. В КраО на телескопе БСТ-1 для этой цели применяются три плоских зеркала, освещающих входную щель СГ светом от всего солнечного диска. Принято считать, что волновой фронт и его поляризация внутри СГ формируется всеми *отдельными фотонами*, прошедшими в “данный момент” внутрь СГ. Световой пучок/луч/пакет/цуг/фронт далее, после модулятора, падает на коллиматорное зеркало, затем на решетку и т. д. В конце, по законам линейной оптики и интерференции, в фокальной плоскости камеры, т. е. на фотометре, формируется зеемановски-расщепленный контур линии с ненулевой поляризацией света в крыльях линии; уровень потока, благодаря поляризации, флуктуирует с частотой модулятора. Так учит волновая/геометрическая оптика и “классическая” квантовая физика. (На Китт-Пик, в отличие от других инструментов, свет в телескопе проходит через фильтр, изображение же строится на ПЗС-матрице. Продольное поле *SOLIS-VSM* определяется для каждой ячейки, имеющей размер 1 угл. сек, и результаты затем усредняются для всего солнечного диска. Свою специфику имеют и измерения BiSON методом атомной резонансной спектроскопии.)

Но с развитием технологии и высокочастотной лазерной/волоконной/компьютерной техники и светоприемников в последнее десятилетие стали осуществимы опыты со светом на частотах, сопо-

ставимых с *фемтосекундными* импульсами света, т. е. с *отдельными фотонами* ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$; напомним, что период первой борновской орбиты 0.15 фс , линии же 525.0 соответствует период 1.75 фс). И оказалось, что *отдельные фотоны* ведут себя весьма “причудливым” образом, с ярко выраженными квантовыми свойствами: сцепление, слияние, нелокальность, неразличимость... Как выразился Бом (1967), “наблюдатель принимает непосредственное участие в акте наблюдения, и это участие неизбежно возмущает наблюдаемую систему: само измерение, т. е. прибор, возмущает световое поле”. (Отсюда, кстати, и принцип неопределенности Гейзенберга: каждое измерение содержит некоторый минимум неопределенности.)

В нашем случае нельзя считать, что *отдельные фотоны* – каждый со своим состоянием поляризации – из солнечной фотосферы проходят внутрь СГ и затем, независимо друг от друга, падают на ту или иную часть решетки, затем интерферируют и после сложения отдельных актов-фотонов в сумме формируют контур линии. А точнее, это лишь одна сторона “дуализма” светового поля. На деле квантовые, поляризационные свойства отдельного “фотона” определяются “коллективно” – всем пучком света, размер которого зависит от дифракционных свойств СГ. И особенно это существенно при наблюдениях Солнца-как-звезды, когда внутри СГ, на решетке, формируется диффузное изображение солнечного диска. У нас при ширине входной щели 0.04 см размер “когерентности” пучка D составляет примерно $0.3D_{\odot}$ (D_{\odot} – размер размытого изображения диска на решетке). Поляризация фотонов такого пучка определяется сложением свойств фотонов значительной части диска, размером D , причем, по-видимому, неаддитивным образом. Более того, каждая “точка” контура линии определяется потоком света от всего диска. Поэтому можно утверждать, что поляризация соответствующих фотонов будет определяться светом всего Солнца с весовой функцией, диктуемой и потемнением диска к краю, и распределением поляризации, т. е. напряженности поля по диску и поляризационными свойствами СГ. Все это вместе сложным образом “запутывает” состояния фотонов.

Приходим к выводу, что регистрируемая магнитографом поляризация определяется (причем *нелинейным, неаддитивным* образом) не простой суммой поляризаций отдельных фотонов, а их поляризацией вместе с распределением поля на значительной части фотосферы Солнца плюс “случайное” вмешательство самого прибора в измерение поляризации как квантового состояния фотонов.

Все эти факторы, приводящие к возрастанию “хаоса” при регистрации Зееман-эффекта фотосферы, трудно или почти невозможно учесть на практике. Квантовой природе света, по-видимому, и следует приписать в значительной мере “устойчивый беспорядок” и расхождения результатов при измерениях “стандарта” Солнца (в частности СМП) разными магнитографами и по разным линиям.

13 Заключение

Из анализа годичных регрессий СМП следует, что коэффициент b , характеризующий отношения напряженностей $|B|$, измеренных по двум линиям Fe I, 524.7 и 525.0 , значительно меняется от года к году (Котов, 2003, 2005). С аналогичной ситуацией встречаемся и при сравнении измерений, сделанных по одной и той же линии, но с разными магнитографами. Разброс наклонов b часто намного превосходит ошибку, и его надо объяснять.

Зависимость b от фазы цикла СА выглядит парадоксально: само Солнце влияет на результат измерения? А именно: соотношение калибровочных коэффициентов двух сравниваемых приборов становится как бы зависящим от фазы цикла? Решение “парадокса” мы находим в квантовой природе света, которая обычно игнорируется при наблюдениях Солнца (и звезд), кроме, конечно, расщепления уровней атома в магнитном поле и факта зеемановской поляризации.

Мы полагаем, что большие расхождения “одновременных” значений СМП, измеренных разными инструментами, обусловлены не только погрешностями инструментов, но в значительной мере и квантовой природой света. То же относится и к измерениям локальных полей фотосферы с помощью разных инструментов, с разным пространственным разрешением, в разных линиях и с разными g -факторами. Но определенный вклад в расхождения может, конечно, вносить и известный эффект насыщения, вызванный сверхтонкой, жгутовой структурой поля.

Вывод о т. н. сверхтонкой структуре поля фотосферы был сделан в 1970-х гг. именно из расхождения измерений поля, измеренного по разным линиям, и этот вывод стремятся подтвердить одна работа за другой... Недавно Домингез Сердена и др. (2003), например, измерили с высоким разрешением (0.5 угл. сек.) поле в спокойной области фотосферы по линиям железа 630.15 нм ($g = 1.67$) и 630.25 нм ($g = 2.5$). И нашли, что напряженности первой линии систематически в 1.28(10) раз превышают напряженности второй. Отсюда авторы, следуя гипотезе Говарда-Стенфло, заключили, что поле сконцентрировано в килогауссовых элементах размером 0.25 угл. сек (аналогичное заключение ранее сделали Демидов и др., 2002). Теперь же, на основе анализа многочисленных измерений СМП, где отличия δ от единицы часто бывают еще больше, чем для “локальных” полей, мы осмеливаемся утверждать, что различие напряженностей не обязательно связано со сверхтонкой структурой поля. Оно вызвано в основном *квантовой, статистической природой света* и спецификой *самих измерений*.

Квантовые эффекты, такие как сцепление, слияние, неразличимость, нелокальность фотонов, требуют внимания как теоретиков, так и наблюдателей. Их следует учитывать, например, при анализе измерений магнитного поля в линиях, формирующихся на разных глубинах в солнечной/звездной атмосфере. Интерпретация таких измерений – вместе с расчетными глубинами – может оказаться ошибочной. То же касается наблюдений магнитных и пекулярных звезд; в частности, определения градиента химического состава в атмосферах некоторых звезд (явление т. н. “аномально резкого” изменения химсостава с глубиной), а также некоторые аномалии в поведении магнитопеременных звезд, например часть расхождений при измерении поля по разным линиям.

Неразличимость/слияние фотонов надо учитывать при моделировании звездных атмосфер и при интерпретации наблюдательных данных, относящихся к т. н. “разным глубинам” в атмосферах Солнца и звезд. Можно сомневаться, например, в некоторых выводах о резкой химической стратификации звездных атмосфер. (Расчеты теории основаны на представлениях “классической” квантовой механики, где каждый фотон, излученный или поглощенный атомом или ионом, существует независимо от поля других фотонов. Но никому еще неясно, как можно учесть *неразличимость* фотонов и к чему она приведет.) Пересмотра потребуют в частности т. н. поворот вектора поперечного магнитного поля с глубиной в солнечной атмосфере и соответственно расчет электрических токов, основанный на “повороте”. Возможна также значительная ревизия “измерений” и “расчетов” вертикальных градиентов поля в солнечной атмосфере, модных в 1960–1970-х гг.

В случае СМП пока неясно, как можно хотя бы приблизительно учесть квантовые эффекты. Ведь происходит то, что следует из самих принципов квантовой механики: само измерение влияет на состояние системы и результат. Этому же надо приписать и частые расхождения, значительно превышающие возможные (приборного происхождения) ошибки измерений СМП, выполненных одновременно на разных инструментах для одного и того же “магнитного стандарта” Солнца.

Разброс СМП по природе квантово-механический, где определяющую роль играет статистика. Поэтому согласие амплитуд периодических изменений СМП по наблюдениям с разными инструментами (Котов и др., 1998b) надо принять как аргумент в пользу нормировки рядов на стандартное отклонение. Это естественно вытекает из статистической природы расхождений измерений разных инструментов, лишней раз подтверждая Эйнштейна: “...физический опыт вообще имеет дело лишь с совпадениями”. Наилучший путь к реальности, т. е. к фактическому значению СМП Солнца и согласию результатов, дает усреднение независимых “актов” измерения эффекта Зеемана, сделанных разными приборами и по разным линиям.

Автор благодарен В.И. Ханейчуку за консультации при вычислениях, Н.Г. Сунице за помощь в обработке данных наблюдений, М.Л. Демидову и У. Чаплину за обмен данными по СМП, а также Л. Свалгарду за полезные дискуссии о магнитной переменности Солнца и проблемах регистрации СМП и Н.Н. Степанян за полезные замечания к рукописи. Особое спасибо сотрудникам Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса и обсерватории Китт-Пик за данные СМП, помещенные на сайтах *WSO.Stanford.edu* и *SOLIS.NSO.edu*.

Литература

- Белинский А.В. // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167. С. 323.
- Бом Д. // Специальная теория относительности. М.: Мир. 1967.
- Бувместер и др. (Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A.) // Nature. 1997. V. 390. P. 575.
- Бэбкок (Babcock H.W.) // Astrophys. J. 1953. V. 118. P. 387.
- Гланц (Glanz J.) // Science. 1995. V. 270. P. 1439.
- Говард, Стенфло (Howard R., Stenflo J.O.) // Solar Phys. 1972. V. 22. P. 402.
- Гопасюк С.И., Гопасюк О.С., Залесов И.П., Каркач Д.В., Свистельников В.В. // Астрон. журн. 2000. Т. 77. С. 547.
- Гопасюк и др. (Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.) // Solar Phys. 1973. V. 31. P. 307.
- Демидов М.Л., Голубева Е.М., Верецкий Р.М. // Солнечно-земная физика. 2005а. Вып. 8. С. 40.
- Демидов М.Л., Григорьев В.М., Пещеров В.С. // Астрон. журн. 2005б. Т. 82. С. 628.
- Демидов и др. (Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshchero V.S., Grigoryev V.M.) // Solar Phys. 2002. V. 209. P. 217.
- Домингез, Сердена и др. (Domínguez Cerdeña I., Kneer F., Sánchez Almeida J.) // Astrophys. J. 2003. V. 582. P. L55.
- Котов В.А. // Труды ГАИШ. 2005. Т. 78. С. 36.
- Котов В.А. // Астрон. журн. 2007 (в печати).
- Котов В.А., Демидов М.Л. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1980. Т. 61. С. 3.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1998а. Т. 94. С. 110.
- Котов В.А., Северный А.Б. // Общее магнитное поле Солнца как звезды. Каталог 1968–1976. М.: АН СССР, 1983.
- Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 3.
- Котов В.А., Сетяева И.В. // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 272.
- Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1977. Т. 56. С. 75.
- Котов (Kotov V.A.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 402. P. 1145.
- Котов и др. (Kotov V.A., Scherrer P.H., Howard R.F., Haneychuk V.I.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1998b. V. 116. P. 103.
- Локвуд и др. (Lockwood M., Stamper R., Wild M.N.) // Nature. 1999. V. 399. P. 437.
- Сантори и др. (Santori Ch., Fattal D., Vučković J., Solomon G.S., Yamamoto Y.) // Nature. 2002. V. 419. P. 594.
- Северный (Severny A.) // Nature. 1969. V. 224. P. 53.
- Северный (Severny A.B.) // Quart. J. Roy. Astron. Soc. 1971. V. 12. P. 363.
- Стенфло (Stenflo J.O.) // Solar Phys. 1973. V. 32. P. 41.
- Уанг, Шили (Wang Y.-M., Sheeley N.R., Jr.) // Astrophys. J. 1995. V. 447. P. L143.
- Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y., et al.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2003. V. 343. P. 813.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Wilcox J.M., Kotov V., Severny A.B., Howard R.) // Solar Phys. 1977а. V. 52. P. 3.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H., Wilcox J.M., Svalgaard L., Duvall T.L., Jr., Dittmer P.H., Gustafson E.K.) // Solar Phys. 1977b. V. 54. P. 353.