

УДК 523.98

Анализ наблюдений линейной поляризации H_{α} -эмиссии вспышек и усов

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
babin@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 27 декабря 2010 г.

Аннотация. В этой работе мы суммируем и анализируем полученные ранее результаты наблюдений линейной поляризации H_{α} -излучения солнечных вспышек и усов. Сформулированы и представлены основные структурные и эволюционные особенности наблюдаемой поляризации. Обсуждаются наблюдательные неопределенности и методика получения параметров линейной поляризации. Делается вывод, что поляризационные данные, полученные при грубом временном и пространственном усреднении параметров Стокса, искажают истинную картину поляризации H_{α} -эмиссии, имеющую место во вспышках и усах.

ANALYSIS OF LINEAR POLARIZATION OBSERVATIONS OF H_{α} EMISSION OF FLARES AND MOUSTACHES, *by A.N. Babin, A.N. Koval*. In this paper we summarize and analyze formerly reported results of linear polarization observations of H_{α} emission of solar flares and moustaches. The main structural and evolutionary properties of observed linear polarization are formulated and presented. We discuss the observational uncertainties and methods of obtaining linear polarization parameters. We have come to the conclusion that the polarization data obtained from rough spatial and time integration of the Stokes parameters distort the truth picture of linear polarization of the H_{α} line emission of flares and moustaches.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, линейная поляризация излучения

1 Введение

В последнее время снова возрос интерес к исследованию линейной поляризации излучения хромосферных линий во время вспышек. Это связано с тем, что не решена основная проблема солнечных вспышек, а именно: не установлен механизм реализации энергии, предположительно происходящей в короне вблизи верхушки магнитной петли, и способы переноса энергии из места реализации в нижележащие слои солнечной атмосферы. Наблюдательные свидетельства в пользу той или иной модели являются непрямыми, так как процесс реализации энергии происходит в малом объеме и на малой временной шкале, что делает недоступным прямые наблюдения процесса. Одним из непрямых способов установления физического механизма первичного выделения энергии является исследование распределения реализуемой во время вспышки энергии между различными ее формами, участвующими в переносе энергии к другим областям солнечной вспышечной атмосферы: сверхтеплыми заряженными частицами, теплопроводностью, гидродинамическими движениями плазмы

и радиативным переносом. Мы наблюдаем те его проявления, которые возникают при взаимодействии данных форм переноса энергии с окружающей средой при их распространении в атмосфере Солнца: жесткое и мягкое рентгеновское излучение, радиоизлучение, гамма-излучение, излучение в UV и оптическом диапазонах (Кунду, Вудгейт, 1989; Кэнфилд и др., 1989).

До недавнего времени на основании наблюдаемого большого потока жесткого рентгеновского излучения и синхронизма импульсных всплесков, наблюдаемых в различных спектральных интервалах энергий, считалось, что большая часть выделяемой во вспышке энергии идет на ускорение электронов (Браун, 1971; Лин, Хадсон, 1976), а ускоренные протоны составляют относительно небольшую часть полной вспышечной энергии. Однако некоторые теоретические трудности модели и сравнение модели с наблюдениями, полученными на SMM и HINOTORI (Браун и др., 1990), привели к тому, что в последнее время эта точка зрения изменилась, и по некоторым оценкам (Симнет, 1995; Рамати и др., 1995; Эмсли и др., 1996) большая часть энергии вспышки может приходиться на долю низкоэнергичных протонов с энергиями меньше 1 MeV. Отношение количества протонов и электронов, ускоренных во вспышечном объеме, и их распределение по энергиям может иметь определяющее значение для установления механизма ускорения частиц.

Протоны с энергиями меньше 1 MeV не проявляют себя через излучение и не обнаруживаются в межпланетном пространстве. Данные о суммарной энергии таких протонов могут быть получены только из непрямых наблюдений. Согласно расчетам (Кэнфилд, Ченг, 1985), одним из признаков присутствия протонов с энергиями 10–100 keV является появление в красном крыле линии L_{α} дополнительной эмиссии. Однако по наблюдениям, полученным на Skylab (Кэнфилд, Кук, 1978), не было обнаружено избытка эмиссии в красном крыле линии L_{α} .

Исследование особенностей линейной поляризации излучения хромосферных линий во вспышке также может быть использовано для диагностики протонов с энергиями меньше 1 MeV, так как монохроматическое излучение, испускаемое атомом вследствие столкновительного возбуждения энергичной частицей, может быть линейно поляризовано (Персивал, Ситон, 1959). В условиях солнечной вспышки линейная поляризация излучения хромосферных линий возникает как следствие ударного возбуждения атомов анизотропным пучком энергичных частиц, вторгающихся в хромосферу из области энерговыделения (Кляйнпоппен, 1969; Эну, 1991). Наблюдаемая величина степени поляризации и направление плоскости поляризации зависит от типа возбуждающих частиц, их энергии и углового распределения. Механизмы возникновения ударной поляризации, возможные источники линейной поляризации хромосферных линий в солнечных вспышках и их относительный вклад в наблюдаемую поляризацию рассмотрены в ряде работ (см., например, Вогт, Эну, 1996, 1999; Эмсли и др., 2000; Эну, Карлицкий, 2003).

Первые спектрополяриметрические наблюдения линейной поляризации излучения вспышек в хромосферных линиях с целью выяснения механизмов переноса энергии во вспышечную хромосферу были начаты в начале 80-х годов в Медоне (Эну, Семель, 1981), в Крымской астрофизической обсерватории (Бабин, Коваль, 1981) и несколько позже в Иркутске (Фирстова, 1986). При наблюдениях использовались два спектрополяриметрических метода: с применением монохроматического H_{α} -фильтра и вращающейся полуволновой пластинки, установленной перед фильтром (Медон, КраО), или с применением спектрографа (КраО, Иркутск). Эти поляриметрические наблюдения показали, что H_{α} -излучение вспышек и других эмиссионных образований (усов, эмиссионных выбросов) бывает линейно поляризовано (Эну, Семель, 1981; Бабин, Коваль, 1981, 1983, 1985, 1985a, в, с, 1986, 1987, 1988; Эну и др., 1983; Фирстова, 1986; Эну и др., 1990; Фирстова и др., 1991). Были обнаружены некоторые особенности наблюдаемой поляризации, которые были подтверждены и расширены последующими наблюдениями (Вогт, Эну, 1996, 1999; Фирстова, Булатов, 1996; Фирстова и др., 1997, 2003; Казанцев и др. 1998; Эну, Карлицкий, 2003; Ханаока, 2003; Ксу и др., 2003, 2005).

2 Результаты

Просуммировав и проанализировав опубликованные разными авторами результаты тридцатилетних наблюдений линейной поляризации H_{α} -излучения вспышек и усов, можно сформулировать основные структурные и эволюционные особенности наблюдаемой поляризации.

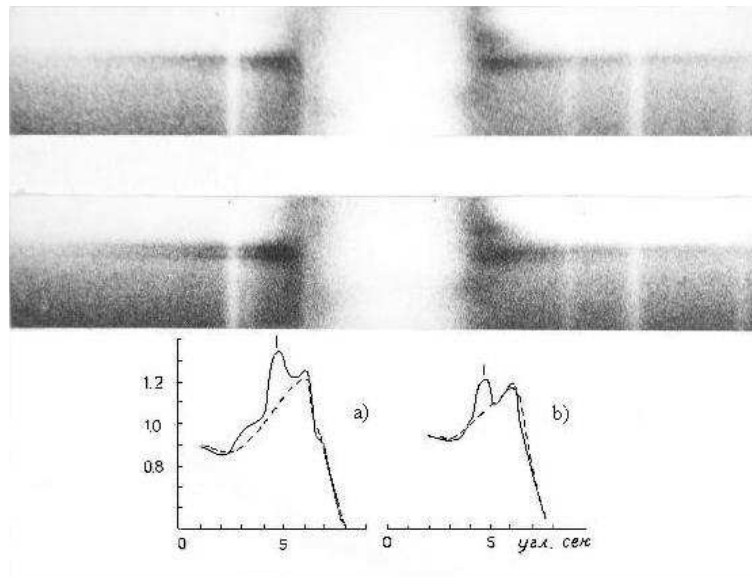


Рис. 1. Поляризационная спектрограмма усов у края Солнца (негатив) 06.10.1983 г. в линии H_{α} (красное крыло слева) и фотометрические разрезы усов перпендикулярно направлению дисперсии в близком (а) и в далеком красном крыле (б). Сплошной и штриховой линиями обозначены разрезы в ортогональных поляризациях

1. Линейная поляризация наблюдается как во время импульсной фазы (Бабин, Коваль, 1985в; Вогт, Эну, 1999; Эну, Карлицкий, 2003; Ханаока, 2003), так и в течение фазы роста и максимума мягкого рентгеновского излучения вспышек (Эну, Семель, 1981; Эну и др., 1990; Вогт, Эну, 1999).
2. Поляризация кратковременная и обнаруживается не во всех ярких H_{α} -образованиях, а лишь в отдельных локальных местах вспышечных узлов. Так, во вспышке балла 2В 26 июля 1981 г. исследовалась поляризация в 20 эмиссионных контурах линии H_{α} , относящихся к различным местам вспышки и к разным моментам времени (Бабин, Коваль, 1985в). Только для 6 из них была получена степень поляризации, отличающаяся от инструментальной на величину больше 3σ . Для остальных величина поляризации в пределах ошибок измерений не отличалась от инструментальной. По результатам Фирстовой и Булатова (1996) поляризация обнаруживается примерно в 30 % H_{α} -спектров вспышек. Согласно (Ксу и др., 2005) "острова" поляризации расположены на концах вспышечных "kernels". Уменьшение степени поляризации при усилении интенсивности линии H_{α} и ее ширины отмечается во всех поляризационных наблюдениях.
3. Наблюдаемая величина степени поляризации в исследованных вспышках и в усах находится в пределах от 1 до 13–20 % (см., например, Бабин, Коваль, 1985; Фирстова, Булатов, 1996; Фирстова и др., 1997; Казанцев и др., 1998). В большинстве случаев степень поляризации достигает 3–5 %. Однако в некоторых случаях поляризация настолько значительна, что отдельные эмиссионные узлы вспышек или усы выглядят по-разному в ортогональных поляризациях. Это можно видеть на рис. 1, где приведены поляризационные спектры усов у лимба в двух ортогональных поляризациях. Различия в спектрах усов в ортогональных поляризациях особенно выражены в красном крыле линии H_{α} : в одной поляризации усы состоят из двух эмиссионных деталей, расстояние между которыми 1.2 угловых секунды, и одиночны в другой. Это подтверждают фотометрические разрезы спектров усов перпендикулярно направлению дисперсии. Фотометрическая обработка спектрограмм показывает, что одна деталь усов не поляризована, а степень поляризации другой достигает 23 %. Появление в отдельных местах вспышки кратковременной

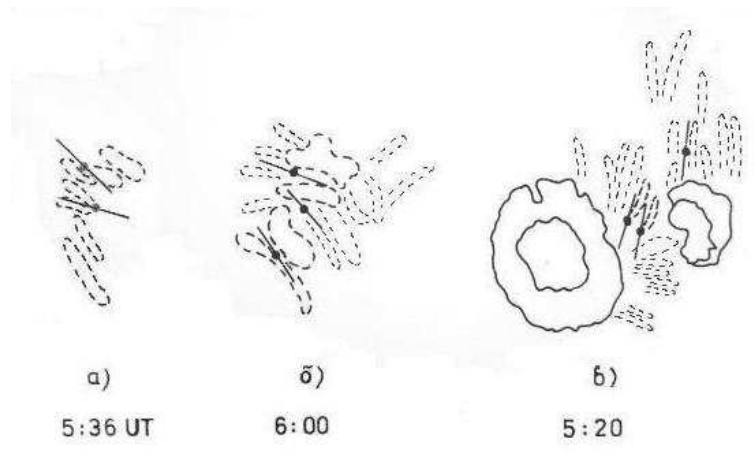


Рис. 2. Сопоставление азимутов плоскости поляризации усов с ориентацией деталей тонкой структуры хромосферы в линии H_{α} . Пятна обведены сплошной линией, тонкие и жирные штриховые линии – волокна тонкой структуры хромосферы и волокна системы AFS, точки с проходящими через них отрезками – усы и ориентация их плоскости поляризации; а, б – усы 20.07.1986 г., в – 31.07.1986 г.

(до 30 с) значительной поляризации (до 20 %) отмечается в ряде работ (Фирстова, Булатов, 1996; Вогт, Эну, 1999).

4. Азимут плоскости поляризации изменяется в широких пределах (см., например, Вогт, Эну, 1999; Ханаока, 2003). Однако многие авторы считают, что обнаруживается два предпочтительных значения азимута линейной поляризации: направление, близкое к направлению вспышка-центр солнечного диска, которое называется радиальным, и тангенциальное – перпендикулярное к радиальному. Тангенциальная ориентация больше характерна для импульсной фазы вспышки, а радиальная – для фазы мягкого рентгеновского излучения (Вогт, Эну, 1999; Эну, Карлицкий, 2003).
5. Исследование связи ориентации плоскости поляризации эмиссии усов и вспышек с направлением магнитного поля активной области показало: направление плоскости поляризации усов близко к направлению систем арочных волокон (AFS) и волоконца тонкой структуры хромосферы (рис. 2), следовательно, плоскость поляризации усов ориентирована вдоль магнитного поля (Бабин, Коваль, 1987, 1988). В одной из двух исследованных активных областей направление плоскости поляризации усов было ближе к ортогональному по отношению к направлению на центр солнечного диска, а в другой – близко к направлению на центр диска. Сопоставление направления плоскости поляризации H_{α} -эмиссии во вспышке с локальным поперечным магнитным полем (Ксу и др., 2005) показало, что плоскость поляризации ориентирована параллельно поперечному магнитному полю, которое в данном случае было близко к направлению на центр солнечного диска. Во вспышке, исследованной Ханаока (2003), ориентация плоскости поляризации эмиссии была примерно перпендикулярна нулевой линии продольного магнитного поля.
6. Обнаруживается тонкая пространственная и временная структура поляризованных элементов вспышек и усов. Степень поляризации и азимут плоскости поляризации в некоторых узлах вспышек и в усах изменяется на протяжении нескольких угловых секунд (Бабин, Коваль, 1985, 1987; Фирстова и др., 1997; Ксу и др., 2003). На рис. 3 представлены поляризационные спектрограммы и фотометрические разрезы спектра узла вспышки балла 2N 19.07.1982 г. перпендикулярно направлению дисперсии в двух ортогональных поляризациях, показывающие тонкую пространственную структуру поляризованных элементов вспышки.

На рис. 4 показано изменение поляризационных характеристик усов со временем. Как видно из рисунка, кривая развития усов состоит из отдельных пиков различной интенсивности

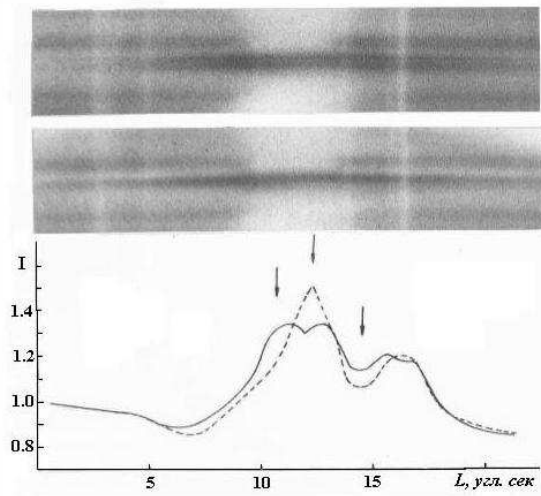


Рис. 3. Поляризационная спектрограмма и фотометрические разрезы узла вспышки балла 2N 19.07.1982 г. перпендикулярно направлению дисперсии в ортогональных поляризациях (сплошная и штриховая линии)

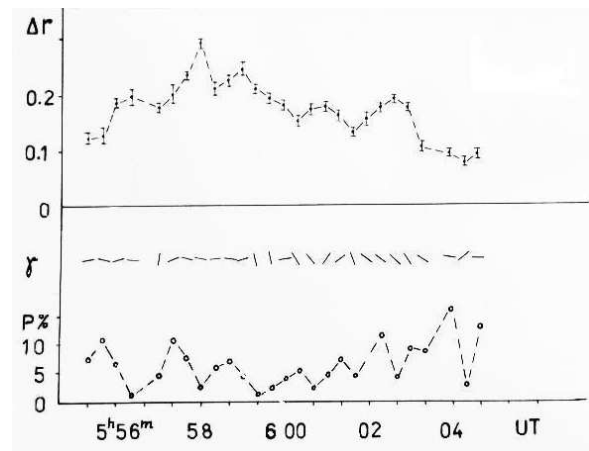


Рис. 4. Изменение со временем контраста усов 31.07.1986 г. (верхняя кривая) и их поляризационных характеристик (степени поляризации и направления плоскости поляризации)

продолжительностью около 1.5 мин, что указывает на неоднократное выделение энергии, носящее импульсный характер. Азимут плоскости поляризации изменяется со временем в широких пределах, но остается примерно постоянным на протяжении существования эмиссионного элемента, определяемого отдельным пиком яркости на кривой развития усов. Азимут плоскости поляризации нового элемента может быть как близким к азимуту предыдущего, так и сильно отличаться, что может быть связано со сложностью структуры магнитного поля в области усов (Северный, 1965; Коваль, 1965). Результаты исследования поляризации усов (Казанцев и др., 1998) показали, что в активной области одновременно наблюдаются усы с разным направлением плоскости поляризации: ближе к радиальному у одних усов и ближе к тангенциальному у других. Когда усы имеют большие размеры (несколько угловых секунд), они состоят из отдельных, различным образом поляризованных элементов, что хорошо видно на рис. 5 (Бабин, Коваль, 1987).

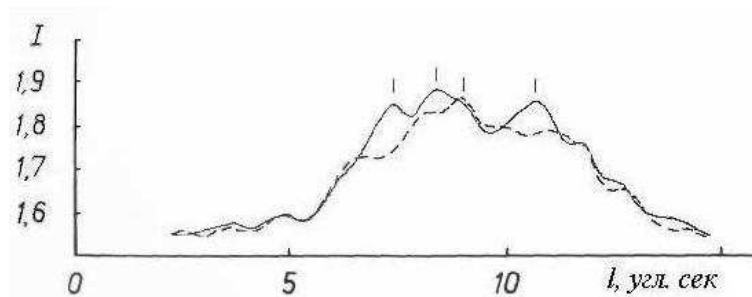


Рис. 5. Фотометрические разрезы поляризационной спектрограммы усов 14.11.1985 г. перпендикулярно направлению дисперсии в ортогональных поляризациях (в $I \pm U$ -изображениях, сплошная и штриховая линии), синее крыло. Черточками отмечены места, соответствующие тонкоструктурным элементам. По оси ординат – интенсивности в произвольных единицах

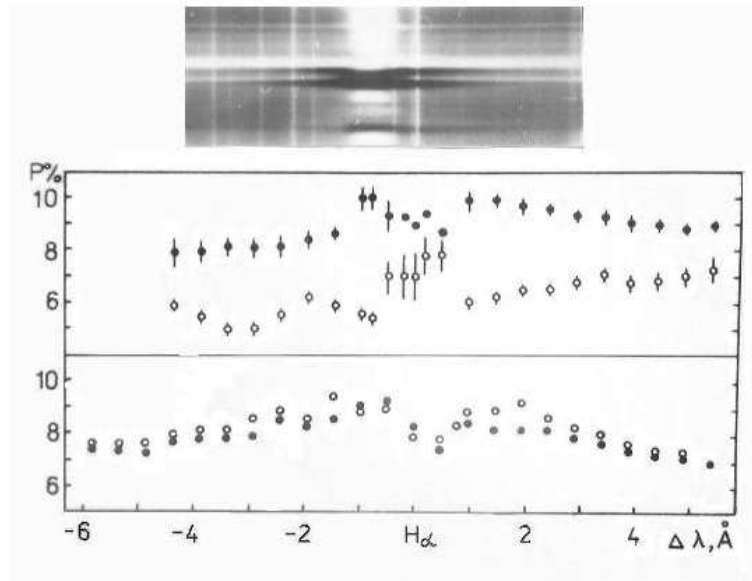


Рис. 6. Ход степени поляризации с длиной волны в одном из эмиссионных ядер вспышки 2В/Х3.5 26.07.1981 г. (кружки) и инструментальной поляризации (точки); нижний – 13:56:00 UT, верхний – 13:56:05 UT, черточки – среднеквадратическая ошибка измерений

7. Исследование распределения поляризации по контуру линии показало, что поляризация наблюдается или по всему контуру, или только в центральной части линии (Бабин, Коваль, 1985в, 1987; Фирстова, Булатов, 1996; Эну, Карлицкий, 2003; Ксу и др., 2005). Ход степени поляризации с длиной волны в одном из эмиссионных ядер вспышки балла 2В 26.07.1981 г. представлен на рис. 6. То же для вспышки балла 1В 14.06.1982 г. представлено на рис. 7. Эти же рисунки показывают быстрое изменение поляризации со временем. Наблюдается асимметрия в распределении величины поляризации по контуру линии: поляризация увереннее выявляется в красном крыле, а при сильной красной асимметрии эмиссии – только в красном крыле (Бабин, Коваль, 1981, 1983; Фирстова и др., 1997). Представляет интерес распределение поляризации по контуру линии, полученное Эну и Карлицким (2003), где наблюдается узкий (по сравнению с шириной линии) пик поляризации, положение которого по длине волны не совпадает ни с центром линии, ни с пиком интенсивности. Более того, авторы отмечают, что в некоторые моменты времени направление плоскости поляризации было тангенциальным в красном крыле и радиальным – в синем.
8. Одновременные наблюдения в линиях H_α и H_β , которые дают сведения об изменении поляризации с глубиной, показали изменение азимута поляризации от тангенциального в H_α к радиальному в H_β (Фирстова и др., 1997; Эну, Карлицкий, 2003). В работе Ксу и др. (2005) вообще не обнаружена поляризация в линии H_β в тех местах вспышки, где в линии H_α направление поляризации было тангенциальным.
9. Наблюдается одновременное появление направленных вниз движений H_α излучающего вещества и поляризации H_α -излучения (Ханаока, 2003).
10. Наблюдения линейной поляризации H_α -эмиссии в 30 вспышках различной мощности и положения на диске Солнца (Бианда и др., 2005) показали отсутствие в рассмотренных вспышках поляризации, превышающей 0.07 %. Однако следует отметить, что высокая чувствительность этих измерений получена за счет усреднения параметров поляризации по площади вспышки (10×10 угл. сек) и по времени (40 с).

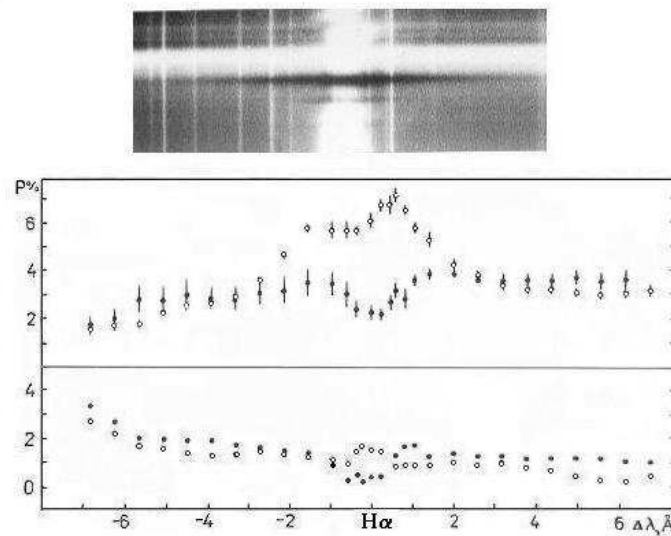


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для эмиссионного узла вспышки балла 1В 14.06.1982 г., нижний – 06:26:20 UT, верхний – 06:28:50 UT

11. Не обнаружена линейная поляризация непрерывного излучения белых вспышек в пределах ошибок измерения фотографического метода (Зирин, Нейдиг, 1981; Нейдиг, Беккерс, 1983; Бабин, Коваль, 2005).

3 Обсуждение результатов

Несмотря на то, что исследования линейной поляризации излучения хромосферных линий были начаты около 30 лет назад, наблюдения немногочисленны, а результаты исследований часто противоречивы. Существует ряд факторов как наблюдательного, так и теоретического характера, влияющих на полученные результаты и их интерпретацию. Основным недостатком наблюдательного характера является тот факт, что параметры Стокса Q и U вычисляются из комбинации изображений (фильтрограмм или спектрограмм), полученных в разное время с промежутками между экспозициями от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Различия в наблюдаемых яркостях в поляризационных изображениях, соответствующих $I \pm Q$ и $I \pm U$, могут быть не следствием поляризации излучения, а результатом быстрого развития структуры и яркости вспышки, изменения качества и дрожания изображения. Это может вносить заметные ошибки в определение как степени поляризации, так и ее азимута. Существенное влияние на получаемые параметры линейной поляризации может также оказывать инструментальная поляризация телескопа и особенно спектрографа.

Второй недостаток, вносящий большие неопределенности в получаемые результаты, связан с методикой обработки, применяемой некоторыми авторами. Как отмечено в ряде работ (Вогт, Эну, 1999; Ханаока, 2003; Бианда и др., 2005) в поляризационных данных, полученных из 4-х последовательных H_{α} -изображений, уровень шума часто того же порядка, или даже больше, чем ожидаемая степень поляризации. Чтобы уменьшить влияние шумов, авторы прибегают к усреднению параметров Стокса в пространстве и во времени. Применяемое в этих работах усреднение параметров линейной поляризации по временным интервалам порядка нескольких минут (Бианда и др., 2005; Ханаока, 2003) и даже десятка минут, и по площади вплоть до всего вспышечного узла (Вогт, Эну, 1999), искажает истинную картину поляризации, так как наблюдаемой особенностью поляризации является тонкая временная и пространственная структура. Поэтому теоретическая интерпретация

линейной поляризации эмиссии, основанная на таких данных, не является убедительной, и делать выводы о доминирующем процессе в энергетике солнечных вспышек (протоны или электроны) по этим результатам преждевременно.

Наблюдаемая поляризация интерпретируется с точки зрения ударного возбуждения водородных атомов вертикальным пучком нетепловых частиц. В последнее время отдается предпочтение ударной поляризации протонами с энергиями порядка сотен keV (Вогт, Эну 1996, 1999; Фирстова, Булатов, 1996; Ханаока, 2003; Ксу и др., 2005). Интерпретация результатов наблюдений с точки зрения ударной поляризации пучком ускоренных частиц (протоны или электроны) делается на основании предпочтительного направления плоскости поляризации. Теоретические расчеты ориентации плоскости поляризации и величины степени поляризации сделаны в предположении о вертикальном направлении магнитного поля и, следовательно, вертикальном движении частиц вдоль силовых линий. А наблюдения показывают, что магнитное поле в месте возникновения вспышек и усов очень сложное и имеет значительную горизонтальную составляющую. Исследование вертикальной и горизонтальной структуры магнитного поля показало, что в местах наибольшей вспышечной активности магнитное поле состоит из структурных элементов размером от 3 до 15 угловых секунд, в которых направление поперечного магнитного поля отличается на 90 градусов, а в некоторых местах наблюдаются также резкие изменения направления магнитного поля с высотой (Северный, 1964; Бабин, Коваль, 2001). Кроме того, ударная поляризация сильно зависит от физических условий в среде распространения частиц (см., например, Эмсли и др., 1996; Вогт и др., 2001; Цап, Степанов, 2008).

Качество получаемых результатов и их физическая интерпретация сильно зависят от разрешения тонкой структуры вспышки (Северный, 1957; Бабин, 1974). Наблюдения, качество которых позволяет проанализировать эволюцию пространственно разрешимых элементов H_{α} -вспышечной эмиссии размером несколько угловых секунд, показали, что различные узелки вспышечной ленты имеют разные кривые развития, однако характерными их особенностями являются пульсации яркости, а также разгорание новых узелков на очень близком расстоянии от уже существующих. Это свидетельствует о том, что в одном и том же месте происходит несколько эпизодов выделения энергии в тонкоструктурных элементах, которые включаются во вспышечный процесс не одновременно, то есть процесс выделения энергии во вспышках имеет прерывистый характер (Бабин, Коваль, 2002). Наблюдения HXR и микроволнового излучения, которые являются наиболее весомым свидетельством присутствия высокоэнергичных электронов, показывают, что их кривые развития состоят из множества тонкоструктурных всплесков продолжительностью 5–20 с, что требует такой же тонкоструктурности процесса выделения энергии (Фрост, 1969; ван Бек и др., 1974; де Ягер и др., 1976; Стуррок и др., 1984).

На тонкоструктурность процесса выделения энергии в усах и связь поляризации с этим процессом указывает четкая корреляция изменения азимута плоскости поляризации усов с появлением нового пика яркости на кривой развития усов (Бабин, Коваль, 1988), а также тот факт, что крупные усы (размером несколько угловых секунд) состоят из отдельных, различным образом поляризованных элементов (Бабин, Коваль, 1987). То, что усы состоят из тонкоструктурных субкомпонентов, было недавно подтверждено прямыми наблюдениями (Хашимото и др., 2010).

Так как наземные и внеатмосферные наблюдения показывают тонкую структуру нестационарных процессов, происходящих на Солнце, задачей последующих исследований линейной поляризации излучения солнечных эмиссионных образований является подтверждение при усовершенствованной методике наблюдений наличия кратковременной значительной (до 20 %) поляризации эмиссии, существования тонкой временной и пространственной структуры поляризованных элементов вспышек и усов, асимметрии в распределении параметров поляризации по контуру линии и теоретическая интерпретация этих особенностей.

Литература

- Бабин А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 50. С. 152.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Год Солнечного Максимиума. Москва. 1981. №. 2. С. 67.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 89.
- Бабин, Коваль (Babin A.N., Koval A.N.) // Solar Phys. 1985. V. 98. P. 159.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985а. Т. 70. С. 4.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985б. Т. 72. С. 142.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1985в. Т. 73. С. 3.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1986. Т. 75. С. 152.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 77. С. 9.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988. Т. 80. С. 110.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 43.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 27.
- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 107.
- Бианда и др. (Bianda M., Benz A.O., Stenflo J.O., et al.) // Astron. Astrophys. 2005. V. 434. P. 1183.
- Браун (Brown J.C.) // Solar Phys. 1971. V. 18. P. 489.
- Браун (Brown J.C.) // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 1991. V. 336. P. 413.
- Браун и др. (Brown J.C., Karlicky M., Mac Kinnon A.L., van den Oord G.H.J.) // Astrophys. J. (Suppl.). 1990. V. 73. P. 143.
- Ван Бек и др. (van Beck H.F., de Feiter L.D., de Jager C.) // Space Res. 1974. V. 14. P. 447.
- Вогт, Эну (Vogt E., Henoux J.-C.) // Solar Phys. 1996. V. 164. P. 345.
- Вогт, Эну (Vogt E., Henoux J.-C.) // Astron. Astrophys. 1999. V. 349. P. 283.
- Вогт и др. (Vogt E., Sahal-Brechot S., Bommier V.) // Astron. Astrophys. 2001. V. 374. P. 1127.
- Де Ягер и др. (de Jager C., Kuperus M., Rosenberg H.) // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 1976. V. 281. P. 507.
- Зирин, Нейдиг (Zirin H., Neidig D.F.) // Astrophys. J. 1981. V. 248. P. L45.
- Казанцев С.А., Фирстова Н.М., Кашалова Л.К. и др. // Астрон. журн. 1998. Т. 75. №. 5. С. 792.
- Карлицкий, Эну (Karlicky M., Henoux J.-C.) // Astron. Astrophys. 2002. V. 383. P. 713.
- Кляйнпоппен (Kleinpoppen H.) // Advances in Atomic and Molecular Physics. 1969./ Eds. Bopp F., Kleinpoppen H. P. 612.
- Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1965. Т. 34. С. 278.
- Ксу и др. (Xu Z., Firstova N.M., Chen Q.-R., Fang C.) // Chinese J. Astron. Astrophys. 2003. V. 3. P. 266.
- Ксу и др. (Xu Z., Henoux J.-C., Chambe G., et al.) // Astrophys. J. 2005. V. 631. P. 618.
- Кунду, Вудгейт (Kundu M.R., Woodgate B.) // Energetic Phenomena on the Sun. 1989./ Eds. Kundu M.R., Woodgate B., Shmahl E.J. P. XIII.
- Кэнфилд, Кук (Canfield R.C., Cooc J.W.) // Astrophys. J. 1978. V. 225. P. 650.
- Кэнфилд, Ченг (Canfield R.C., Chang C.R.) // Astropys. J. 1985. V. 295. P. 275.
- Кэнфилд и др. (Canfield R.C., Bely-Dubau E., Brown J.C., et al.) // Energetic Phenomena on the Sun. 1989./ Eds. Kundu M.R., Woodgate B. Shmahl E.J. P. 229.
- Лин, Хадсон (Lin R.P., Hudson H.S.) // Solar Phys. 1976. V. 50. P. 153.
- Нейдиг, Беккерс (Neidig D.F., Beckers J.M.) // Sky and Telescope. 1983. V. 65. P. 226.
- Персивал, Ситон (Persival I.C., Seaton M.J.) // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 1959. V. 25. P. 113.
- Рамати и др. (Ramaty R., Mandzhavidze N., Koslovsky B., Murphy R.) // Astrophys. J. 1995. V. 455. P. L193.
- Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1957. Т. 17. С. 129.
- Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1964. Т. 31. С. 126.
- Северный (Severny A.B.) // IAU Sympos. 22. 1965. P. 238.
- Симнет (Simnet G.H.) // Space Sci. Rev. 1995. V. 73. P. 387.
- Стуррок и др. (Sturrock P. A., Kaufman A., Moore R.L., Smith D.F.) // Solar Phys. 1984. V. 94. P. 341.
- Фирстова (Firstova N.M.) // Solar Phys. 1986. V. 103. P. 11.

- Фирстова Н.М., Ланкевич Н.А., Губин А.В., Казанцев С.А. // Иссл. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1991. Т. 95. С. 48.
- Фирстова, Булатов (Firstova N.M., Bulatov A.V.) // Solar Phys. 1996. V. 164. P. 361.
- Фирстова и др. (Firstova N.M., Henoux J.-C., Kazantsev S.A., Bulatov A.V.) // Solar Phys. 1997. V. 171. P. 123.
- Фирстова и др. (Firstova N.M., Xu Z., Fang C.) // Astrophys. J. 2003. V. 595. P. L131.
- Фрост (Frost K.J.) // Astrophys. J. (Letters). 1969. V. 158. P. L159.
- Ханаока (Hanaoka Y.) // Astrophys. J. 2003. V. 596. P. 1347.
- Хашимото и др. (Hashimoto Y., Kitai R., Ichimoto K., et al.) // Publ. Astron. Soc. Japan. 2010. V. 62. P. 879.
- Цап Ю.Т., Степанов А.В. // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. С. 1.
- Эмсли и др. (Emslie A.G., Henoux J.-C., Mariska J.T., Nepton E.K.) // Astrophys. J. 1996. V. 470. P. L131.
- Эмсли и др. (Emslie A.G., Miller J.A., Vogt E., et al.) // Astrophys. J. 2000. V. 542. P. 513.
- Эну (Henoux J.-C.) // Solar Polarimetry. Proc. of the Eleventh National Solar Obs. 1991./ Sac. Peak Workshop. P. 285.
- Эну, Семель (Henoux J.-C., Semel M.) // Год Солнечного Максимума. Москва. 1981. №. 1. С. 207.
- Эну и др. (Henoux J.-C., Chambe G., Semel M., et al.) // Astrophys. J. 1983. V. 265. P. 1066.
- Эну и др. (Henoux J.-C., Chambe G., Smith D., et al.) // Astrophys. J. (Suppl.). 1990. V. 73. P. 309.
- Эну, Чамб (Henoux J.-C., Chambe G.) // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1990. V. 44. P. 193.
- Эну, Карлицкий (Henoux J.-C., Karlicky M.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 407. P. 1103.