АНАЛИЗ УСРЕДНЕННОГО ПРОФИЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШКИ СОЛНЦА КАК ЗВЕЗДЫ В ПОЛОСЕ 1600 А

Ларионова А.И.¹, Брумол А.-М.², Кашапова Л.К.^{3,4}, Куприянова Е.Г.¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Университет г. Варвик, Ковентри, Великобритания

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁴Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

ANALYSIS OF THE AVERAGED TIME PROFILE OF THE FLARE EMISSION ON THE SUN-AS-A-STAR IN 1600 Å BAND

Larionova A.I.¹, Broomhall A.-M.², Kashapova L.K.^{3,4}, Kupriyanova E.G.¹

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint Petersburg, Russia

²CFSA, Warwick University, Coventry, UK

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Energy distribution and evolution during both solar and stellar flares are still key points during the interpretation of observational data. The important instrument for this purpose is an empirical template describing the decay phase of an averaged flare time profile. The targets of the current study are reconstructing of the template for the decay phase of solar flares observed by SDO/AIA during 2011–2017 in 1600 Å band using method [3]. We checked the possibility of using the method for this purpose. The Sun-as-a-star flare time profiles were reconstructed using the total flux derived from 1600 Å band images. The list of the 103 single elementary flare time profiles was created. We found that the template of the decay phase is best fitted by two exponential functions. The coefficients agree with those for the flare of M4 class star [3]. However, the stellar flare emission decays faster than solar ones. The method suggested in [3] could be applied to the solar flares, but statistics for error getting should be improved.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-273-276

Введение

Несмотря на многолетнюю историю исследования солнечных вспышек, нет однозначного понимания энергетических процессов, происходящих во время фазы спада. Решение этой задачи тесно связано также и с физикой звездных вспышек, а также ответом на вопрос, насколько схожи процессы в таких разных по энергетике явлениях, как солнечные и звездные вспышки. Несомненно, основную роль играют процессы охлаждения плазмы, тесно связанные с теплопроводностью вспышечной плазмы, которая зависит от начальных параметров плазмы, различных даже для разных уровней солнечной атмосферы. Одним из методов проведения исследований является выявление эмпирических законов или шаблонов, описывающих поведение усредненного профиля вспышки во время фазы спада, полученных как для различных уровней солнечной атмосферы, так для

звездных вспышек. Они дают материал для создания моделей вспышек, сравнения условий в солнечных и звездных атмосферах, а также исследования процессов энерговыделения, не связанных с охлаждением плазмы. Известный в настоящее время шаблон для солнечных вспышек разработан на основе наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне [1, 2], а шаблон для звездных вспышек получен для одной звезды спектрального класса M4 на основе наблюдений космического аппарата KEPLER в белом свете [3]. Временные профили звездных вспышек наблюдаются, в основном, в белом свете. В случае Солнца есть подробная информация о хромосферных и корональных вспышках, однако, выборка белых вспышек очень мала.

Цели настоящего исследования заключаются в создании эмпирического шаблона фазы спада солнечных вспышек по наблюдениям в полосе 1600 Å SDO/AIA [4] и тестировании использования метода, предложенного в работе [3] (метод Давенпорта) для построения средних профилей солнечных вспышек.

Отбор и обработка данных

Проведен первичный визуальный отбор вспышечных событий по каталогам GOES, SDO/EVE и веб-ресурсу <http://suntoday.lmsal.com/>. Были отобраны события, имевшие «простой» временной профиль (т. е. быстрый подъем и плавный спад без сильных флуктуаций, $\Delta F < 0.3 F_{\max}$), имеющие отклик в полосе $\lambda = 1600$ Å. Излучение в этой спектральной полосе формируется при 10^5 К в верхней фотосфере и может служить аналогом излучения, наблюдавшегося КА KEPLER. По результатам отбора, в предварительный каталог событий вошли 359 солнечных вспышек GOES классов от M5.0 до X9.3 за 2011–2017 гг.

Интегральный поток Солнца как звезды (по всей площади солнечного диска) для каждой вспышки с временным разрешением 12 секунд был получен в полосе 1600 Å по данным SDO/AIA [4]. Далее проведен дополнительный отсев тех событий, чьи временные профили на фазе спада имели флуктуации более 30% от максимального потока. В окончательный каталог, предназначенный для построения усредненного профиля солнечных вспышек, было отобрано 103 события, то есть 29% от общего числа событий предварительного каталога. Это соотношение в два раза больше, чем в работе [3] (885 из 6100 всех вспышек в белом свете на одной звезде класса M4, т. е. 15%).

Для всех событий окончательного каталога была проведена единая нормировка на максимум потока и по временной шкале (на длительность вспышки на уровне половины максимума потока). Полученные временные профили нанесены на график (рис. 1). Общий усредненный профиль был получен двумя способами: как среднее значение (левая панель) и как медиана (правая панель) в каждый момент времени. Ошибки измерений были оценены как среднеквадратичное отклонение от усредненного профиля.

Видно, что профиль, полученный как медианное значение, лучше описывает тенденцию облака точек, однако приводит к неправильным оценкам ошибок, дающим отрицательные значения потоков. Для полученных среднего и медианного временных профилей было проведено фиттирование двумя экспоненциальными функциями (рис. 2).

Рис. 1. Множество нормированных временных профилей солнечных вспышек в полосе 1600 Å (показаны крестиками, на левой и правой панелях). *Левая панель:* средний временной профиль (серая линия) и среднеквадратическое отклонение (пунктирные линии сверху и снизу от серой). *Правая панель:* то же, но серой линией показан медианный временной профиль.

Выводы

Получено, что усредненный временной профиль солнечной вспышки в полосе SDO/AIA 1600 Å наилучшим образом описывается степенной функцией с изломом: в начале фазы спада $F_1 = A e^{-Bt}$, а в конце фазы спада $F_2 = C e^{-Dt}$. Коэффициенты экспоненциальных функций, полученных нами ($A \approx 0.993$, $B \approx 0.668$, $C \approx 0.380$, $D \approx 0.194$, см. Рис. 2), согласуются с коэффициентами, полученными Давенпортом ($A \approx 0.948$, $B \approx 0.965$, $C \approx 0.322$, $D \approx 0.290$, см. [3]). Однако излучение вспышки звезды класса M4 спадало быстрее, чем у солнечных событий. Этот факт согласуется с результатами [5], показавшими, что время фазы спада для звездных вспышек короче, чем то, которое получается из оценок, сделанных для солнечных вспышек в белом свете.

Рис. 2. Результаты фиттирования среднего временного профиля (*левая панель*) и медианного временного профиля (*правая панель*) двумя последовательными экспоненциальными функциями. На каждом графике экспоненциальные функции показаны прямыми пунктирными линиями (вертикальная ось – натуральный логарифм от нормированного потока). Участки временного профиля, по которым велось фиттирование (в соответствии с [3]), показаны серыми линиями.

Таким образом, метод, использующий две экспоненциальные функции, предложенный в работе [3], можно использовать для построения усредненного временного профиля и получения эмпирического шаблона фазы спада солнечных вспышек. Однако нужно учитывать, что применение статистики, основанной на среднеквадратичном отклонении, для вычисления ошибок измерений в случае медианного усредненного временного профиля приводит к неправильным значениям среднеквадратичных ошибок, дающих отрицательные значения потоков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-52-10001 Ко-а.

Литература

1. Sylwester *et al.* // *Astron. Astrophys.*, 1993, v. 267, p. 86.
2. Gryciuk *et al.* // *Solar Phys.*, 2017, v. 292, p. 77.
3. Davenport *et al.* // *Astrophys. J.*, 2014, v. 797, p. 122.
4. Lemen *et al.* // *Solar Phys.*, 2012, v. 275, p. 17.
5. Kosuke *et al.* // *Astrophys. J.*, 2017, v. 851, p. 91.