ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗЫ СПАДА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НИЖНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

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

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

³*Университет г. Варвик, Ковентри, Великобритания*

⁴*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

STUDY OF THE SOLAR FLARE DECAY PHASE ACCORDING TO OBSERVATIONS OF LOWER LAYERS OF THE SOLAR ATMOSPHERE

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

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*CFSA, Warwick University, Coventry, UK*

⁴*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint Petersburg, Russia*

We present preliminary results of the analysis of solar flare evolution during the decay phase based on the median averaged time profiles of the Sun-as-a-star emission. The light curves were reconstructed for 106 flares observed by SDO/AIA in the 1600 Å, 304 Å, 1700 Å spectral channels. The principal criterion for the event selection was a smooth continuous decay of the flux without both significant secondary flares and highly amplitude-modulated quasi-periodic pulsations. The light curves were normalized over both its flux maximum and its half-maximum decay time ($t_{1/2}$). The median averaged time profiles of a solar flare were obtained and were compared with both the averaged time profile of the M dwarf star flare and simulated time profile of the solar flare in 304 Å channel. We showed that, in all three AIA spectral channels, the time profiles of the solar flare decays slowly than the stellar one. Comparison of simulated and observed time profiles in 304 Å channel revealed good agreement between them during the initial decay phase. However, the second decay phase, where thermal conductivity dominates, demonstrated the faster decreasing of simulated profile relative to the observed one.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-149-152

Введение

Вспышки на Солнце и звездах являются одними из самых мощных процессов, происходящих в планетных системах, исследованию энергетики которых посвящено огромное количество работ. До сих пор нет полного понимания процессов релаксации вспышечной энергии на фазе спада вспышки. Эта фаза мало теоретически мало изучена в сравнении с начальной фазой и максимумом вспышек. Помимо задач, связанных непосредственно с изучением процессов и особенностей эволюции солнечных и

звездных вспышек, понимание фазы спада необходимо для определения насколько схожи процессы и механизмы в таких разных по энергетике явлениях, как солнечные и звездные вспышки. Сравнительный анализ фазы спада позволил бы уточнить представления о структуре атмосферы звезд (распределение температуры и плотности) и скорректировать модели по расчету вспышечного излучения, в том числе и солнечные. В [1] было показано, что начальная фаза спада, длящаяся приблизительно с момента максимума до момента, когда интенсивность падает до половины значения максимума, определяется в основном радиационными потерями, а конечная – теплопроводностью. Эти процессы зависят от начальных параметров плазмы, различных для разных уровней солнечной атмосферы, и тем более отличающихся для звезд разных спектральных классов. Если для процессов в короне Солнца проведены как эмпирические исследования мягкого рентгеновского излучения [2, 3], так и численные оценки (например, [1]), то для фотосферы и хромосферы Солнца такие результаты еще не получены. В тоже время для звездных вспышек более доступны данные наблюдения в белом свете благодаря работе космического аппарата (КА) KEPLER [4]. Авторам удалось получить усредненный эмпирический временной профиль для звезды класса M4, которые позволил им выделить события с аномальной эволюцией фазы спада. Однако, исследования динамики фазы спада в промежуточных слоях солнечной атмосферы отсутствуют. Поэтому **целью** настоящего исследования является исследование характерного временного профиля фазы спада солнечных вспышек по данным спектральных полос SDO/AIA, соответствующих разным температурам и высотам генерации в солнечной хромосфере и фотосфере, а также сравнение полученных результатов с данными, полученными для звездных вспышек, и с модельными расчетами для полосы 304 Å.

Отбор и обработка данных

Исследования проведены на базе выборки из 106 солнечных вспышек от B5 до X9.3 классов мощности, согласно классификации *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES). Основным критерием отбора событий являлся медленный плавный спад вспышечного излучения без дополнительных пиков или высокоамплитудных ($> 30\%$) квазипериодический пульсаций. В качестве основы были выбраны события, имевшие отклик в полосе 1600 Å. Считается, что, формируясь в верхней фотосфере, это излучение во время вспышек может служить аналогом белого света, регистрируемого КА KEPLER, регистрирующего излучение в достаточно широкой спектральной полосе от 4200 Å до 9000 Å. Для отобранных вспышек были построены интегральные по всей площади солнечного диска временные профили, пригодные для анализа вспышки Солнца как звезды и для сравнения со звездными вспышками. Все временные профили были нормированы единым образом на максимум потока и по времени на длитель-

ность фазы спада от максимума до уровня половины максимума потока ($t_{1/2}$). За нулевой отсчет по времени был выбран момент максимума потока (см. подробнее [5]). Аналогичным образом в представленной работе были построены временные профили выбранных вспышек в полосе 304 Å и, при наличии отклика, в полосе 1700 Å. Временное разрешение составило 24 с в полосах 1600 Å и 1700 Å и 12 с в полосе 304 Å.

Результаты

Для всех исследуемых вспышек в каждой из спектральных полос был получен медианный усредненный профиль. Полученные усредненные профили солнечных вспышек в трех спектральных полосах приведены на левой панели рис. 1. При сравнении профилей в разных спектральных полосах можно видеть, что во время первой фазы спада поведение всех трех профилей практически совпадает. На второй фазе, где релаксация энергии

Рис. 1. *Левая панель:* медианные усредненные временные профили солнечных вспышек в полосах 1600 Å (штриховая линия), 1700 Å (сплошная линия) и 304 Å (пунктирная линия), а также усредненный временной профиль вспышек на красном карлике спектрального класса M4 [4], зарегистрированных КА KEPLER в белом свете (штрихпунктирная линия). *Правая панель:* для полосы 304 Å, усредненный временной профиль солнечной вспышки (штриховая линия) и модель отклика солнечной атмосферы на воздействие пучка нетепловых электронов (сплошная линия) [6].

должна происходить за счет теплопроводности, мы видим расхождение профилей – излучение полосы 1600 Å затухает медленнее остальных. Это, с одной стороны, может указывать на достаточно высокую температуру плазмы, формирующей излучение в полосах 304 Å и 1700 Å. С другой стороны, это может указывать на наличие дополнительных источников энергии на этих длинах волн. На той же панели штрихпунктирной линией по-

казан усредненный временной профиль звездных вспышек, зарегистрированных КА KEPLER в белом свете на красном карлике спектрального класса M4 [4]. Сравнение временных профилей показало, что поток излучения солнечной вспышки спадает медленнее, чем поток белого света звездной вспышки. Такая закономерность наблюдается во всех трех спектральных полосах. На правой панели рис. 2 штриховой линией показан усредненный временной профиль излучения солнечной вспышки в полосе 304 Å. На него сплошной линией наложен модельный временной профиль излучения в полосе 304 Å, полученный в результате моделирования отклика солнечной атмосферы на воздействие пучка нетепловых электронов [6]. Сравнение наблюдательного и модельных временных профилей указывает на то, что фаза спада, определяемая радиационными потерями, достаточно хорошо описывается результатами модельных расчетов. При этом простые условия, описывающие влияние теплопроводности, дают более быстрый спад интенсивности, чем на это указывают наблюдения. Отметим, что полосы 1600 Å и 1700 Å являются более сложными для моделирования излучения, чем полоса 304 Å, где доминирует излучение одной спектральной линии.

Заключение

Проведены исследования усредненных временных профилей элементарной солнечной вспышки в спектральных полосах 1600 Å, 1700 Å и 304 Å. Обнаружено хорошее совпадение динамики затухания для излучения различных спектральных полос во время первой фазы спада, определяемой радиационными потерями, а также согласие наблюдений с результатами моделирования. Во время второй фазы спада, определяемой теплопроводностью, выявлено расхождение с эмпирического временного профиля с расчетным и показано различие динамики затухания как между спектральными полосами солнечного излучения, так и в сравнении с излучением красного карлика M4.

Работа выполнена, в частности, в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 (К.Л.К), бюджетных тем Государственного задания № 0041-2019-0022 (Л.А.И.) и 0041-2019-0019 (К.Е.Г.) и гранта Королевского общества IEC/R2/170056 (Б.А.-М.).

Литература

1. *Aschwanden* // Physics of the Solar Corona. An Introduction. 2004
2. *Sylwester et al.* // Astron. Astrophys., 1993, v. 267, p. 86
3. *Gryciuk et al.* // Solar Phys., 2017, v. 292, p. 77
4. *Davenport et al.* // Astrophys. J., 2014, v. 797, p. 122
5. *Ларионова и др.* // Труды конф. ССЗФ-2019, 2019, с. 273
6. *Allred et al.* // Astrophys. J., 2006, v. 644, p. 484