

КОРОНАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ТОКОВЫМ СЛОЕМ: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

CORONAL HARD X-RAY SOURCES IN SOLAR FLARE MODELS WITH A VERTICAL CURRENT SHEET: OBSERVATIONS AND SIMULATION

Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P., Charikov Yu.E.

Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

The relaxation of the helmet-shaped magnetic structure initially extended in the direction of the current sheet to a closed structure is accompanied by a longitudinally and transverse contraction of the magnetic loop, which, in turn, leads to betatron acceleration and first-order Fermi acceleration. We have analyzed the evolution of a similar magnetic field configuration of solar flares in the hard X-ray energy range. The analysis of solar flares SOL2013-05-13T02:12 (X1.7), SOL2013-05-13T16:04 (X2.8) shows: there's no height increase of the coronal X-ray source at the initial stage of the flare; negative correlation between the size of the local source and the X-ray flux in the flare; separation of centroids of local sources in different energy ranges; high brightness of the coronal source at the early stage of the flare. We also analyzed the efficiency of secondary (additional) acceleration of electrons from energies of the order of 100 keV (primary acceleration in the current sheet) to MeV energies as a result of Fermi and betatron acceleration mechanisms. The calculations show that the additional acceleration that occurs during the relaxation of the magnetic field increases the fraction of high-energy electrons by 1-3 orders of magnitude.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-295-298

1. Введение

В атмосфере Солнца, в активных областях, возможны конфигурации магнитных полей с вертикальным токовым слоем [1]. Релаксация первоначально вытянутой в направлении токового слоя шлемовидной магнитной структуры к замкнутой структуре сопровождается продольно поперечным сокращением магнитной петли, что, в свою очередь, приводит к бетатронному и ускорению Ферми первого рода. В работе проведен анализ наблюдательных проявлений эволюции подобной конфигурации магнитных полей во время предвспышечной и начальной фазы солнечных вспышек в жестком рентгеновском (ЖР) диапазоне энергий. Произведен численный расчет излучения в модели коллапсирующих ловушек [2–4] как одной из возможных моделей, способной объяснить наблюдаемые характеристики ЖР источников.

2. Событие SOL2013-05-13T02:12 (X1.7).

Изменение высоты и площади источников ЖР излучения

Для лимбовых вспышек SOL2013-05-13T02:12 и SOL2013-05-13T16:04 на начальной фазе наблюдается уменьшение высоты в пределах 5 арксекунд локального источника и его последующий подъем на 25–30 арксекунд. Для источников в диапазонах до 25 кэВ стоит отметить их пространственное разделение: источники в более жестких диапазонах располагаются выше источников меньших энергий. Для рассмотренных вспышек разделение между источниками 6–10 кэВ и 25–30 кэВ составляет ≈ 5 арксекунд. Пример для SOL2013-05-13T02:12 приведен на рисунке 1.

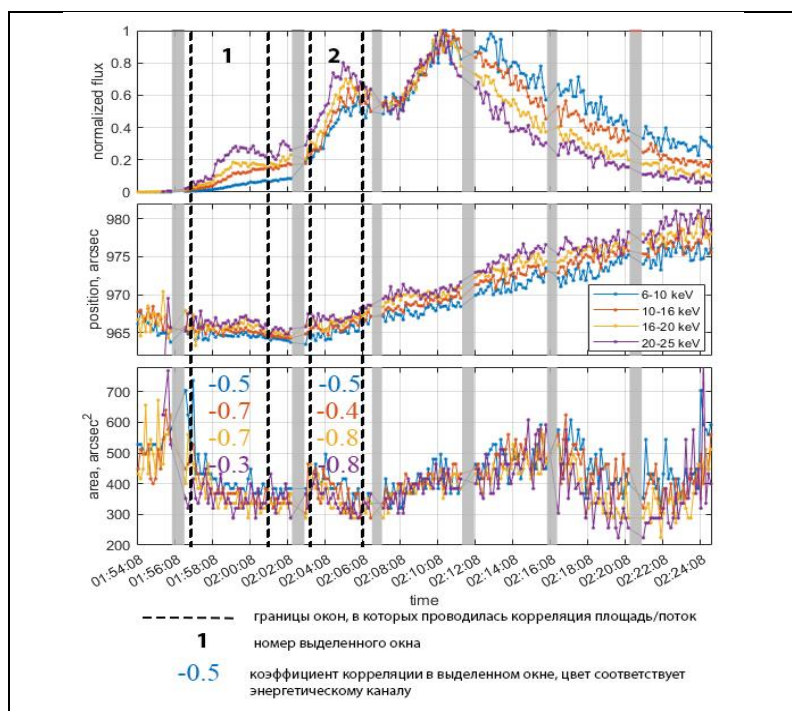


Рис. 1. Верхняя панель – нормированный поток ЖР излучения, энергетические каналы указаны на рисунке; средняя панель – изменение высоты источника; нижняя панель – изменение площади источника. На рисунке указаны коэффициенты корреляции потока и изменения площади для разных энергетических каналов, корреляция проведена в двух интервалах на фазе роста потока излучения.

Для фазы роста потока в двух интервалах, соответствующих уменьшению высоты источника и росту, рассчитывалась корреляция площади источника и потока излучения. На временных интервалах с интенсивным ростом потока наблюдается отрицательная корреляция, коэффициенты для SOL2013-05-13T02:12 приведены на рисунке. Подобное изменение высоты и площади ЖР источников в разных энергиях ожидается в модели коллапсирующих ловушек.

3. Спектр временных задержек в модели коллапсирующих ловушек

Энергетические спектры и спектры временных задержек из локальных областей вспышечной петли и их эволюция во времени определяются динамикой ускоренных электронов, параметрами вспышечной плазмы, динамикой изменения магнитного поля. По данным RHESSI построены спектры временных задержек ЖР излучения из оснований и вершины петли для вспышки SOL2013-05-13T16:04 (X2.8) с энергиями >30 кэВ с

тремя локальными источниками. Спектры задержек локальных ЖР источников из оснований оказались растущими (см. боксы 0 и 1 на рис. 2), начиная с 35 кэВ. Величина задержек варьировалась в пределах 200 мс.

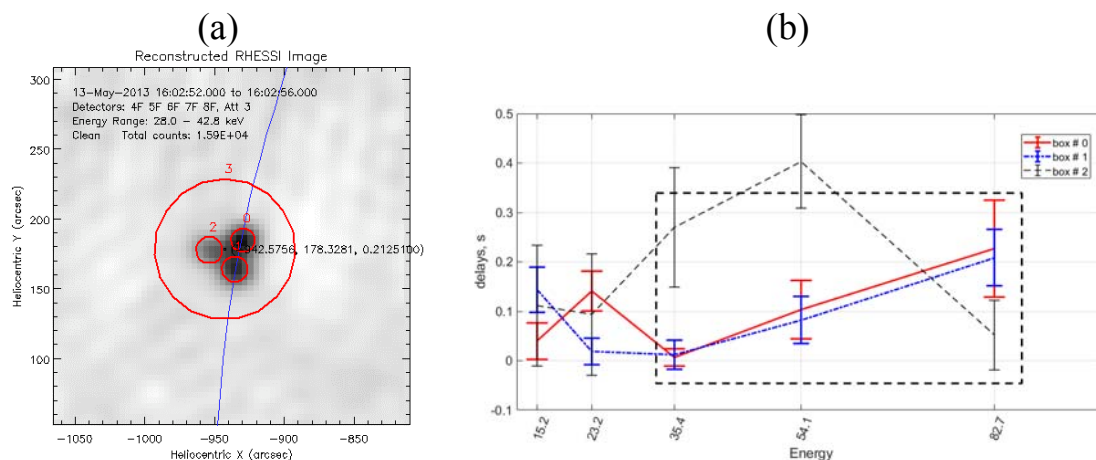


Рис. 2. Спектры временных задержек для SOL2013-05-13T16:04.

На рисунке 3 представлены расчетные спектры временных задержек ЖР излучения для локальных областей магнитной петли, полученные в модели кинетики ускоренных электронов [5] для релаксирующего, по модельно заданному закону, магнитного поля. Инжекция ускоренных электронов происходила в вершину коллапсирующей петли в виде импульса длительностью 6 с. На панели 3а представлены спектры задержек для модели с анизотропной инжекцией и жестким энергетическим спектром электронов $\delta = 3$, а на панели 3б для изотропной модели с мягким энергетическим спектром $\delta = 7$. Отметим, что в обеих моделях времена задержек составляют от сотен миллисекунд до нескольких секунд, форма растущая.

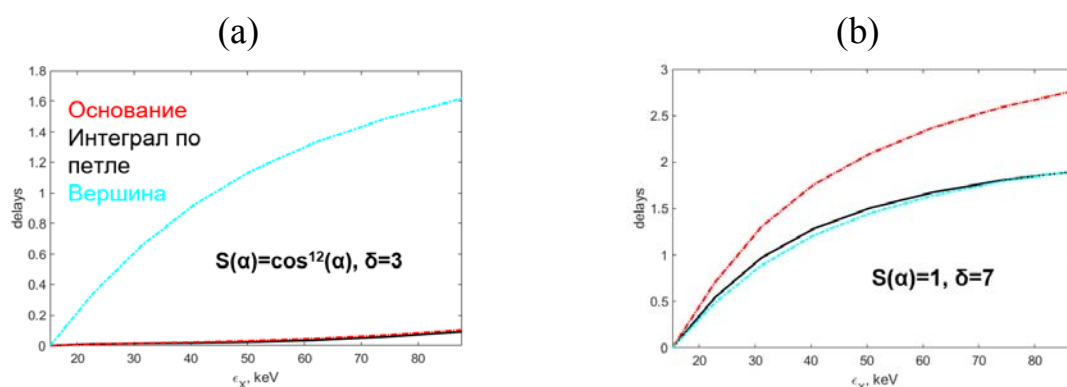


Рис. 3. Временные задержки для анизотропной (а) и изотропной (б) инжекции ускоренных электронов в модели коллапсирующих ловушек.

В модели анизотропной инжекции спектр задержек в вершине и основаниях магнитных петель (красные кривые) растущий, а значит, не определяется временем пролета электронов, но, в то же время не следует и

закону $E^{3/2}$, характерному для моделей с захватом и высыпанием ускоренных электронов в случае кулоновского рассеяния. Величина задержек не превышает 100 мс в основаниях и 1,5 с в вершине. В модели коллапсирующих ловушек подобный характер спектра задержек объясняется эффективным захватом электронов (высоким пробочным отношением) и быстрым ростом концентрации плазмы в петле из-за ее сжатия (сохранение магнитного потока).

4. Заключение

Анализ ЖР излучения солнечных вспышек SOL2013-05-13T02:12 (X1.7), SOL2013-05-13T16:04 (X2.8), в активной области 11748 на лимбе позволяет сделать следующие выводы: обнаружено отсутствие увеличения высоты коронального ЖР источника над лимбом на начальной стадии вспышки, получена отрицательная корреляция размера локального источника и ЖР потока во вспышке, отмечены разделение центроидов локальных источников в разных диапазонах энергий и высокая яркость коронального источника на ранней стадии вспышки. Проведен анализ эффективности вторичного доускорения электронов от энергий порядка 100 кэВ (первичное ускорение в токовом слое) до МэВных энергий в результате Ферми и бетатронного механизмов ускорения в процессе релаксации магнитного поля. С этой целью было численно решено нестационарное релятивистское кинетическое уравнение для функции распределения ускоренных электронов в плазме и магнитном поле, характеристики которых меняются во времени в результате процесса релаксации магнитных структур. Результаты расчетов показывают, что дополнительное ускорение, возникающее при релаксации магнитного поля, увеличивает долю высокоэнергичных электронов на 1-3 порядка.

Работа Шабалина А.Н. поддержана Грантом РФФИ № 20-72-10158

Литература

1. *Lin J., Forbes T.G.* // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2000, 105 (A2) 2375–2392.
2. *Bogachev, S.A., & Somov, B.V.* // Astronomy Reports, 2001, 45 (2), 157-161.
3. *Karlický, M., & Kosugi, T.* // Astronomy & Astrophysics, 2004, 419 (3), 1159-1168.
4. *Somov, B., & Kosugi, T.* // The Astrophysical Journal, 1997, 485 (2), 859-868.
5. *Shabalin, A.N., Charikov, Y.E. & Sharykin, I.N.* // The Astrophysical Journal, 2022, 931, 27.