СУБСЕКУНДНЫЕ СПАЙКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: КИНЕМАТИКА УСКОРЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Шабалин А.Н.¹, Глобина В.И.², Чариков Ю.Е.¹, Овчинникова Е.П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

SUBSECOND X-RAY SPIKES IN SOLAR FLARES: KINEMATICS OF ELECTRON ACCELERATION AND PROPAGATION

Shabalin A.N.¹, Globina V.I.², Charikov Yu.E.¹, Ovchinnikova E.P.¹

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

²The Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

The task of this work is to establish the principal possibility of generation/preservation of the hard X-ray spike structure in the model of collapsing traps in conditions where there is a set of magnetic structures in which there is an acceleration of electrons due to Fermi and betatron mechanisms during the relaxation of the magnetic loop. For this purpose, the kinetic equation for electrons was numerically solved taking into account Coulomb losses and diffusion, reflection on magnetic mirrors, reverse current, magnetic fluctuations, betatron and Fermi accelerations. The magnetic field varied from 20G in $t = 0$ to an average of 200G with a period of change of 16s and with the decay of oscillations over time. The magnetic loop was thought to consist of many thin loops that relax sequentially, tending from the region of the cusp downwards. Thus, the resulting HXR is radiation summed over all loops active at a given time.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-443-446

Наряду с квазипериодическими осцилляциями жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) в диапазоне 10–60 с и 60–300 с еще в ранних работах были обнаружены субсекундные структуры в кривых излучения в солнечных вспышках [1, 2]. Их анализу посвящены работы, например [3–5], в которых было установлено, что распределение спайков по длительности имеет максимум для временного интервала 0.2 с – 2 с и не зависит от энергии; отдельные спайки имеют симметричный профиль, то есть фазы роста и спада по длительности практически одинаковы; спектры спайков более жесткие, чем спектры непрерывной составляющей ЖРИ. В задачи данной работы входит установление принципиальной возможности генерации/сохранения спайковой структуры ЖРИ в модели коллапсирующих ловушек в условиях, когда присутствует множество магнитных структур, в которых происходит доускорение электронов за счет механизмов Ферми и бетатронного при релаксации магнитной петли. С этой целью было численно решено кинетическое уравнение для электронов с учётом кулоновских потерь и диффузии, отражения на магнитных зеркалах, обратного то-

ка, магнитных флуктуаций, бетатронного и Ферми ускорений [6, 7]. Магнитное поле изменялось от 20 Гс в $t = 0$ до в среднем 200 Гс с периодом изменения 16 с и с затуханием осцилляций со временем. Магнитная петля представлялась состоящей из множества тонких петель, которые релаксируют последовательно, стремясь из области каспа вниз. Таким образом, результирующее ЖР излучение представляет собой излучение, просуммированное по всем петлям, активным в данный момент времени. В каждой такой петле изотропный источник электронов представлял собой короткий импульс длительностью 50 мс со степенным спектром с показателем $\delta = 5$ в диапазоне 30–200 кэВ и $\delta = 10$ в диапазоне 0.2–10 МэВ. Интервал времени между последовательным вовлечением в коллапс новых петель является произвольным параметром. Примем его равным 1 с. Таким образом, каждую 1 с коллапсирует петля, длительность инжекции электронов в которую составляет 50 мс. В процессе коллапса петли происходит доускорение электронов, в результате чего излучение из основания от одной такой структуры имеет вид, представленный на рисунке 1 (кривая 3). Просуммированное излучение от всех петель, вовлеченных в коллапс, на интервале 40с дано на рисунке 2.

Рис. 1. Кривая 1 – источник электронов (одиночный пульс длительностью 50 мс, правая ось ординат). Кривая 2 – величина индукции магнитного поля в вершине. Кривые 3 и 4 – потоки ЖР излучения из основания и вершины магнитной петли (в диапазоне 28–58 кэВ).

Как видно из рисунка 2, в первые 4 с амплитуда возмущения на ЖР профиле от вовлечения новых петель существенна. Впоследствии амплитуда резко падает и визуально становится неразличимой. Причиной этому служат два фактора – с одной стороны происходит наложения ЖР “хвостов” от доускоренных электронов (см. 2–4-й пики на рисунке 1, кривые 3 и 4), с другой стороны, амплитуда вариации числа электронов в петле сильно смазывается как из-за доускорения, так и из-за захвата их в ловушке (каждая новая 50 мс-ая инжекция электронов накладывается на уже существующую подложку захваченных электронов).

Рис. 2. Кривые интегрального по всем энергиям ЖР излучения из основания, вершины и всей петли для модели с множеством коллапсирующих ловушек.

На рис. 3 представлены результаты вейвлет анализа потоков ЖР излучения композитной модели в диапазоне 29–58 кэВ.

Рис. 3. Результаты вейвлет анализа ЖР излучения композитной модели. На нижних панелях global wavelet spectrum (справа приведены значимые гармоники по уровню 99%).

Как видно из рис. 3, пульсации с $P < 1$ с видны в основании композитной петли в первые 5 с, и в вершине на протяжении всего времени симуляции. Таким образом, множество коллапсирующих петель приводят к появлению импульсной структуры в ЖР излучении. Однако, амплитуда данных пульсов вследствие существенного перекрытия с потоками от ускоритель-

ных «хвостов» и в результате накопления электронов в ловушке при отражении от магнитных пробок, весьма мала.

Рис. 4. Результаты вейвлет анализа ЖР излучения композитной модели с добавлением красного шума. *Левая панель* – модельный сигнал с красным шумом из вершины петли, *правая панель* – global wavelet spectrum этого сигнала.

В реальных событиях, в сигнале которых присутствует красный шум, детектировать такие импульсы представляется сложным. В качестве примера попробуем наложить на сигнал красный шум с относительно большой амплитудой (рис. 4 левая панель). Несмотря на детектирование гармоника 0.83 с, которая превышает уровень красного шума 99%, её мощность существенно ослабла (сравни с рис. 3г).

Работа поддержана Грантом РФФИ мол_а № 18-32-00405.

Литература

1. Kiplinger A.L., Dennis B.R., Frost K.J., Orwig L.E. // The Astrophysical Journal. 1984. V. 287. P. L105–L108.
2. Jager C. De, Jonge G. De, Jager C. de, Jonge G. de // Solar Physics. 1978. V. 58. № 1. P. 127–137.
3. Cheng J.X., Qiu J., Ding M.D., Wang H. // Astronomy & Astrophysics. 2012. V. 547. № A73.
4. Aschwanden M.J. Benz A.O., Schwartz R.A. // Astrophysical Journal. 1993. V. 417. P. 790.
5. Aschwanden M.J. // The Astrophysical Journal. 2004. V. 608. № 1. P. 554–561.
6. Filatov L.V., et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53. № 8. P. 1007–1012.
7. Charikov Y.E., Shabalin A.N. // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55. № 8. P. 1104–1111.