МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ТОНКОЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ В ПЛАЗМЕ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ

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

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

THE MODELING OF THE ACCELERATED ELECTRONS WITH THE FINE TEMPORAL STRUCTURE IN THE PLASMA OF FLARING LOOPS

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

Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

The millisecond time structure of hard X-rays in solar flares is a goal of this paper. For our analysis some power solar flares from BATSE data base were considered. The Wavelet analysis was applied to two series from the energy ranges – 25–50 keV, 50–100 keV. For a flare of 09-07-1996, data analysis found a thin temporal structure with subsecond pulses. The Fokker-Planck approach allowed to numerically trace the evolution of the electron distribution function along the magnetic loop in time. For a number of models – isotropic and anisotropic, it was found that the thin temporal structure of X-ray radiation at the looptop with a plasma density lower than 10^{11} cm^{-3} has no place. In footpoints of the loop a time structure of X-rays reveals ms-structure as a consequence of the time structure of accelerated electrons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-405-408

Жесткое рентгеновское излучение (в дальнейшем ЖРИ) по своей природе является тормозным излучением ускоренных электронов в плазме. Характеристики ЖРИ – поток, спектр, поляризация, пространственно-временное распределение позволяют восстанавливать характеристики электронов при задании параметров плазмы и магнитного поля в области распространения. В данной работе будем решать задачу определения временной структуры ЖР-излучения и ускоренных электронов начиная с момента их инжекции. В первую очередь нас будет интересовать временная структура ЖРИ солнечных вспышек на миллисекундной временной шкале. Рассмотрение моделей ускорения заряженных частиц (см., например, [2]) дает основание полагать возможным формирование импульсов ускоренных электронов мс- длительности, следующих непрерывно друг за другом. Поскольку экспериментальное определение характеристик электронов во вспышечной области невозможно, будем анализировать пространственно-временную структуру ЖРИ. Тонкая временная структура ЖРИ неоднократно регистрировалась на спутниках SMM [5], CGRO/BATSE [2], Konus-Wind [1]. Анализ ЖРИ в 640 вспышках позволил получить распределение 5340 отдельных импульсов по их длительности [2] и показать, что длительность в диапазоне 0.3–1.0 с наиболее типична.

Тонкая временная структура ЖРИ: наблюдения и анализ

С целью проведения моделирования процесса распространения электронов в плазме петель и их ЖР – излучения, для ряда вспышек из базы данных BATSE было проведено исследование временной структуры ЖРИ на миллисекундном масштабе. В статье обсуждаются результаты анализа данных для мощной вспышки SOL09-07-1996T09:09:01, GOES класс X2.6.

Рис. 1.

На рисунке 1 показан временной ход ЖРИ 22–56 кэВ слева и его высокочастотная составляющая справа, полученная после вычитания низкочастотной огибающей в ЖР – излучении. Производя далее Wavelet-преобразование высокочастотного ряда ЖРИ 22–56 кэВ, мы исследовали наличие структуры на миллисекундном уровне. Для оценки значимости выявленных пиков в Wavelet-спектре рассматривался красный шум, как наиболее отвечающий данным эксперимента. На рисунке 2 показаны результаты анализа: Wavelet-спектр высокочастотного ряда 22–56 кэВ (базисная функция Morlet) и его спектр мощности с указанием уровня красного шума.

Рис. 2.

Как следует из рисунка 2, в спектре можно выделить структуры длительностью от 0.1 до 0.3 с, мощность которых превышает уровень красного шума с вероятностью 99%. Подобный анализ проводился и для временного ряда в диапазоне больших энергий 56–105 кэВ (рис. 3). Отметим, что

ЖРИ на секундной временной шкале в этих двух каналах различаются как на фазе роста потока, так и фазе спада. Длительность всплеска 56–105 кэВ примерно в 2 раза меньше, чем всплеска 25–56 кэВ. Однако Wavelet-спектр ряда 56–105 кэВ в высокочастотной области практически идентичен спектру ЖРИ меньших энергий – также можно выделить структуры от 0.1 с до 0.3 с.

Рис. 3.

Моделирование тонкой временной структуры ЖРИ

Изменения потока ЖРИ во времени определяются концентрацией плазмы, излучающим кванты объемом, изменением магнитного поля вспышечной петли, функцией распределения ускоренных электронов в момент инжекции. Поскольку рассматриваются миллисекундные вариации потока ЖРИ, то изменения первых 3-х параметров на такой шкале маловероятны. Поэтому рассмотрим динамику функции распределения ускоренных электронов при их распространении в плазме вспышечных петель с заданной конфигурацией магнитного поля. Детальная постановка задачи приводится в [3]. Отметим, что численно интегрируется одномерное нестационарное уравнение Фоккера-Планка с заданными начальными и граничными условиями. В качестве начального временного распределения электронов принимается функция, по форме аналогичная временному ряду ЖРИ. Инжекция электронов происходит в вершине магнитной петли. Численное моделирование позволяет получить функцию распределения электронов и распределение яркости ЖРИ в различные моменты времени из локальных областей – вершины и двух оснований. Рассчитанные ряды ЖРИ подвергались обработке, аналогичной наблюдаемым рядам, с целью выявления тонкой временной структуры. На рисунке 4 приведены результаты подобного моделирования для обсуждаемой вспышки SOL09-07-1996T09:09:01.

Концентрация плазмы в вершине варьировалась от 10^{10} до $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, магнитное поле определялось отношением B_{max}/B_0 и варьировалось в пределах от 2 до 7, рассматривались изотропные и анизотропные начальные распределения. Из рисунка 4 для изотропного распределения $S(\alpha) = 1$ следует, что в вершине магнитной петли генерация тонкой структуры ЖРИ при данных параметрах невозможна (что верно при концентрации до $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, при концентрации $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ тонкая структура ЖРИ проявляется и в вершине петли). Что касается оснований петель с высокой концентрацией плазмы, то подобная тонкая структура ЖРИ может возникать, причем более вероятно с возрастанием отношения B_{max}/B_0 (см. нижний ряд на рис. 4). Как показывают расчеты, тому же способствует и анизотропия в распределении электронов в момент их инжекции.

Рис. 4.

Формирование импульсов электронов мс-длительности возможно в модели impulsive, bursty reconnection [4]. Суть модели в образовании многочисленных магнитных островов в результате тиринг-неустойчивости. Слияние островов приводит к ускорению электронов, причем время импульса определяется временем слияния, которое может составлять сотни миллисекунд.

Работа поддержана Грантом РФФИ N17-12-01378.

Литература

1. Aptekar R.L. et al. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS Wind spacecraft // Space Science Reviews. 1995. № 1–4 (71). P. 265–272.
2. Aschwanden M.J. Physics of the Solar Corona / M.J. Aschwanden, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 908 c.
3. Charikov Y.E., Shabalin A.N. Hard X-ray generation in the turbulent plasma of solar flares // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. № 8 (56). P. 1068–1074.
4. Kliem B. Coupled magnetohydrodynamic and kinetic development of current sheets in the solar corona / Springer Berlin Heidelberg, 1995. 93–114 c.
5. Orwig L.E., Frost K.J., Dennis B.R. The Hard X-Ray Burst Spectrometer on the Solar Maximum Mission // Solar Physics. 1980. № 1 (65). P. 25–37.