СТРУКТУРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: МИЛЛИСЕКУНДНЫЕ СПАЙКИ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ

Чариков Ю.Е.¹, Складорова Е.М.¹, Шувалова В.И.², Шабалин А.Н.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

X-RAY TIME STRUCTURE OF SOLAR FLARES: MILLISECONDS SPIKES AND QUASI PERIODIC PULSATIONS

Charikov Yu.E.¹, Sklyarova E.M.¹, Shuvalova V.I.², Shabalin A.N.¹

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

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

To search for HXR pulsations, we processed the BATSE/CGRO spectrometer data of high temporal resolution 0.016 s and 0.064 s. BATSE energy range is about 20 keV–1 MeV divided by 6 energy channels. For the M1.4 powerful solar flare SOL1991-12-25T12:54:15 the FFT and wavelet analysis show the presence of HXR pulsations of ~0.04 – 0.19 s. HXR-spikes were detected. The spike shape is practically triangular with FWHM about 100 ms. Simulations of kinetic models of electron transport with short pulses showed that when the duration of an individual spike is longer than ~ 80 ms, the smearing of pulses practically does not occur. Injection pulses shorter than 30–60 ms are not preserved even with a strongly anisotropic distribution of accelerated electrons and a small gradient of the magnetic field. In the isotropic case at the looptop, the decay phase of the X-ray spikes becomes longer compared to the rising phase which is not true for the anisotropic case. The pulse smearing effect is stronger for the softer energy spectra of accelerated electrons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-329-332

Введение

Чтобы определить возможный механизм ускорения заряженных частиц (электронов, в первую очередь) необходимо знание их характеристик – энергии, потока, энергетического спектра, распределения по питч-углам, временной структуры, причем в процессе ускорения. Однако это невозможно для электронов в коронально-хромосферной плазме замкнутых конфигураций магнитного поля активных областей. Из наблюдений вспышечного излучения в широком диапазоне длин волн в предположении механизма излучения возможно определение характеристик ускоренных электронов в момент излучения, но не ускорения. То есть для решения исходной задачи необходимо моделирование процесса переноса электронов в плазме вспышечной петли. В данной статье основное внимание уделяется изучению сверхтонкой временной структуры жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Для анализа используется база данных спектрометра BATSE/CGRO [1] в диапазоне энергий

20 кэВ–1 МэВ, полученных с высоким временным разрешением 16 мс – 2.048 с.

Данные жесткого рентгеновского излучения. Вспышка GOES класса M1.4 SOL1991-12-25T12:54:15

Рассмотрим процесс поиска отдельных импульсов миллисекундной длительности жесткого рентгеновского излучения (спайков) на примере мощной вспышки класса M1.4 SOL1991-12-25T12:54:12. На рис. 1 представлены: временной профиль вспышки в двух энергетических диапазонах (слева), справа сверху – отсчёты для тех же каналов (25 и 57 кэВ) после вычитания тренда ($200 \cdot 0.016 = 3.2$ с), справа внизу – профили импульсов для спайков в моменты времени $t \sim 16$ с–17 с после срабатывания триггера в диапазоне энергий 24–28 кэВ и 57.6–60.0 кэВ.

Рис. 1. Временные профили вспышки класса M1.4 SOL1991-12-25T12:54:15 в разных диапазонах энергий.

Временной интервал для анализа высокочастотной составляющей рентгеновского излучения выделен вертикальными прямыми на графике слева, т.е. соответствует пику скорости счета квантов. Из анализа высокочастотной составляющей рентгеновского ряда (справа сверху) следует наличие отдельных импульсов длительностью несколько секунд каждый в интервале времени от 10 с до 30 с после начала регистрации. Однако следует так же предположить и возможность наличия спайков, то есть субсекундной структуры в том же интервале времени. На рис. 1 справа внизу выделен фрагмент скорости счета квантов в узком временном

интервале 16.5 с – 17.5 с, т.е. длительностью 1000 мс. Временное разрешение составляло 16 мс. Особо отметим наличие многочисленных спайков треугольной формы, длительность которых меньше 100 мс в диапазоне энергий 24–28 кэВ и 57.6–60.0 кэВ.

Для этой же вспышки были определены периоды субсекундных пульсаций, полученных методом БПФ после вычитания низкочастотной составляющей. На рис. 2 изображены: сверху – отсчёты для каналов 24–28 кэВ и 57.6–60.0 кэВ после сглаживания ($20 \cdot 0.016 = 0.32$ с), вычитания тренда и нормирования на дисперсию. Внизу – спектры мощности этих же рядов, полученные в результате Фурье-анализа, где обозначены гармоники, значимые на уровне 99% выше уровня красного шума по методу Монте-Карло.

Рис. 2. БПФ преобразование высокочастотных рентгеновских рядов вспышки SOL1991-12-25T12:54:15

Спектры мощности свидетельствуют о наличии в этом временном интервале (0–30 с) высокочастотной компоненты с периодом 0.19 с и 0.04 с для энергий 25 кэВ и 57 кэВ.

Моделирование процесса генерации тонкой временной структуры жесткого рентгеновского излучения в плазме солнечных вспышек

Существенным для генерации тонкой временной структуры ЖР излучения является распределение концентрации плазмы в магнитной петле. Из результатов моделирования распространения ускоренных электронов на основе решения кинетического уравнения для ускоренных

электронов [2], которое учитывает неоднородность концентрации плазмы, магнитного поля, различную степень анизотропии источника электронов, прежде всего, отметим, что для всех рассмотренных параметров плазмы и пучка миллисекундная структура ЖР излучения из оснований петель (плотной плазмы с концентрацией не ниже 10^{12} см^{-3}) сохранялась для всего диапазона энергий квантов. При типичных концентрациях плазмы во вспышечных петлях в корональной части $< 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, миллисекундная структура сохраняется в излучении из вершины только при анизотропных источниках ускоренных электронов. Яркость вершины в этом случае, как правило, недостаточна для её наблюдения. В остальных случаях (изотропный источник электронов, более высокий градиент магнитного поля) излучение из вершины **не выявляет** миллисекундной структуры. Если же концентрация плазмы в вершине оказывается выше $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, то мс импульсы проявляют себя в ЖР излучении из **вершины** вспышечной петли. Таким образом, временной анализ с высоким пространственным и временным разрешением, при котором была бы возможность локализовать источник в вершине, позволяет независимо ограничить концентрацию плазмы снизу.

Литература

1. NASA database. Available at: <ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse>.
2. *Shabalin A.N., Charikov Y.E., Globina V.I.* Subsecond X-ray spikes in solar flares: kinematics of acceleration and transport of accelerated electrons // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. Vol. 60, № 8.