ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПАЙКОВ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Чариков Ю.Е.¹, Шувалова В.И.², Складорова Е.М.¹, 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 SPIKES IN A PLASMA OF SOLAR FLARES

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

¹Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

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

Hard X-ray spike structure registered by BATSE/CGRO spectrometer of high temporal resolution 0.016 s in the energy range 20 keV–1 MeV and by Fermi Gamma-ray Burst Monitor of 0.064 s time resolution are analyzed. Almost all spikes are produced at or about the flare peak time. The duration of spikes is tens of ms up to seconds and depends on photon energy. The greater the energy of the spike, the longer its duration. The rise and decay times are different. The space location of spikes along the loop is unclear. Modeling of the kinetics of the accelerated electron beam in the plasma of flaring loops and their bremsstrahlung indicate the origin of spikes from the footpoint of the loop in the case of a sharply anisotropic pitch angle electron distribution.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-297-300

Введение

В настоящее время механизмы ускорения заряженных частиц: ускорение в электрических полях – драйсеровском (сверхдрайсеровском), в токовых слоях (X и O точках), в двойном слое, бетатронное; 2) стохастическое ускорение (Ферми 2-го рода) и 3) ускорение на ударных волнах (см. обзор [1]) позволяют электронам ускоряться до энергий 100 кэВ и выше в течение десятков–сотен мс. Однако ни одна модель не определяет угловое распределение частиц, обсуждается только возможный характер распределения – продольное, поперечное или изотропное относительно вектора электрического или магнитного полей. Если угловое распределение электронов в момент их ускорения будет определено, то это позволит ограничить механизм ускорения и условия, при котором он реализуется (конфигурация магнитного поля, высота области, плотность плазмы и т.д.). Однако если даже определить анизотропию ускоренных электронов по измерениям поляризации ЖР излучения, то, все равно, без модельных расчетов невозможно перейти к распределению электронов в момент их ускорения.

В настоящей работе изучается сверхтонкая временная структура ЖР излучения, зарегистрированная в виде отдельных мс-спайков на космических аппаратах BATSE и Fermi, моделируются процесс

распространения электронов во вспышечной петле и генерация тормозного излучения. Рассмотрим ряд солнечных вспышек, в которых были зарегистрированы ЖР спайки в разных энергиях.

ЖР спайки в солнечных вспышках. Наблюдения и анализ данных

BATSE: Вспышка 13 Nov 1997, (16:08:50 UT)

Рис. 1. Временной ход скорости счета в каналах энергии 24–25, 95–99 и 160–166 кэВ (слева), высокочастотная составляющая ЖР излучения для 24 кэВ (справа) и уровень 3σ (горизонтальная прямая).

Рассмотрим фрагмент ЖР излучения в момент пика 2.6 с.

Рис. 2. ЖР излучение вспышки в момент пика скорости счета для 2-х энергий квантов. Показаны уровни 3σ .

Анализ данных позволяет выделить несколько спайков в пике излучения: в канале энергий 24—25 кэВ на интервале длительностью около 500 мс уровень 3σ превышен в 5 спайках, причем только в одном из них 3-х точечная временная структура, в остальных профиль спайка определяется 5–6 временными точками. То есть длительность отдельного спайка не превышает 100 мс. Длительность фазы роста и спада потока в отдельном спайке различается в разных спайках, причем длительность фазы спада может быть как больше, так и меньше фазы роста. Как известно, в

элементарных (секундных) вспыхечных всплесках время нарастания потока всегда меньше времени спада. Несколько иная ситуация в канале 94.7–99 кэВ (фрагмент справа, рис. 2). Отчетливо выделяются 2 спайка, длительность каждого из них определяется 8-ю временными точками, то есть больше 100 мс, что вполне согласуется с временем кулоновских потерь энергии ускоренными электронами ($t \sim E^{3/2}$). И в этих спайках время роста–спада противоположное.

Вспышка 2014-02-25T00:42:44, X4.9 (Fermi GBM, $dt = 64$ мс)

Проанализируем временную структуру мощной солнечной вспышки (GOES класс X4.9), временной ход которой представлен на рис. 3.

Рис. 3. Временной ход и его отдельные фрагменты ЖР излучения вспышки 2014-02-25T00:42:44. Показан уровень 3σ . Отсчет (0 времени) времени начинается от 00:42:44UT.

Фрагменты внизу соответствуют фазе роста в диапазоне 50–100 кэВ и пика в 11–26 кэВ. Отметим неожиданный временной профиль в диапазоне 11–26 кэВ. Даже если не принимать во внимание 3-х точечные импульсы, то в момент $t = 1070$ с и 1070.5 с можно выделить спайки с многоточечными профилями. Характер излучения в этом диапазоне энергий соответствует скорее тепловому тормозному излучению горячей плазмы, чем тормозному излучению ускоренных электронов. В этом случае формирование импульсов мс-длительности в модели горячей плазмы предполагает чрезвычайно быстрое изменение температуры и/или меры эмиссии, что представляется довольно проблематичным. Излучение в более высоких энергиях 50–100 кэВ обнаруживает спайки на стадии роста (внизу, справа)

и пика (справа). Профили 6-и точечные (разрешение 64 мс), общая длительность ~300–400 мс. Изучение других вспышек, а также выводы из работы [2] позволили заключить, что ЖР спайки регистрируются как в мощных, так и менее интенсивных вспышках, причем чаще на стадии пика потока вплоть до энергий 100–300 кэВ. Длительность отдельного спайка может меняться от десятков до сотен мс.

Моделирование процесса ЖР излучения спайков

Примем модель вспышечной петли, состоящей из корональной части низкой плотности плазмы ($\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$), с переходом к плотной хромосферной части петли (от $10^{11-12} \text{ см}^{-3}$). Из наблюдений RHESSI не удается локализовать источник ЖР спайков, однако, модельные расчеты [3] кинетики ускоренных электронов показывают, что генерация ЖР спайков в вершине магнитной петли возможна только в случае возрастания плотности плазмы до значений $10^{11-12} \text{ см}^{-3}$ и квазипоперечного углового распределения по питч-углам. Скорее всего, ЖР спайки излучаются **высокоэнергичными электронами из подножий петель** с высокой концентрацией частиц и малым временем потерь энергии. Как показывает моделирование, временная структура таких электронов должна соответствовать спайковой структуре той же длительности и, что особенно важно, угловое распределение электронов должно быть **резко анизотропным** (например, $\cos^8 \Theta$), а спектр электронов достаточно жестким, с показателем $\delta \lesssim 5$.

Литература

1. *Aschwanden, M.J.* Physics of the Solar Corona. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2004
2. *Cheng, J.X., Qiu, J., Ding, M.D., & Wang, H.* // Astron Astrophys, 2012, 547
3. *Shuvalova, V.I., Sklyarova, E.M., Charikov, Y.E., & Shabalin, A.N.* // J. Phys. Conf. Ser., 2020, 1697, 012037