МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СИСТЕМЕ ПЛАЗМА – ПУЧОК УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

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

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

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

SIMULATION OF QUASI-PERIODIC VARIATIONS IN THE HARD X-RAY EMISSION OF SOLAR FLARES IN THE PLASMA – PARTICLE BEAM SYSTEM

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 effects of electron acceleration in oscillating magnetic traps that are contained within the cusp magnetic structure and the appearance of the QPP HXR are studied. A collapse of the magnetic field loop results followed by an oscillation of the magnetic field in magnitude and direction with attenuation. Calculations are made taking into account Coulomb losses and diffusion, reflection on magnetic mirrors, reverse current, magnetic fluctuations, betatron and Fermi accelerations.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-439-442

Квазипериодические пульсации (КПП) жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) в солнечных вспышках наблюдаются в широком временном интервале – от сотен миллисекунд до 2–4 минут. В [1, 2] КПП с периодами $P > 1$ мин интерпретируются как результат осцилляции всей магнитной петли. В качестве причины осцилляций с периодами 10–60 с в [3] был предложен механизм на основе БМЗ волн, которые генерируются в корональной части петли. Модель коллапсирующих ловушек рассматривалась в работах [4, 5] как причина ускорения электронов и как причина КПП в микроволновом диапазоне. В данной работе мы рассмотрели появление КПП ЖРИ в солнечных вспышках в результате динамического изменения магнитного поля, которое можно описать как коллапс магнитной петли с последующей осцилляцией магнитного поля по величине и направлению с затуханием. Вычисления функции распределения ускоренных электронов произведены с учётом кулоновского рассеяния, магнитного отражения, обратного тока, магнитных флуктуаций, бетатронного и Ферми ускорений [5, 6]. Магнитное поле изменялось от 20 Гс в $t = 0$ до ~200 Гс с периодом изменения 16 с и 30 с (см. рис. 1б кривая №1 – ей соответствует правая ось ординат). Концентрация фоновой плазмы в магнитной петле изменялась при сжатии/растяжении петли по радиусу и по длине в соответствии с из-

менением магнитного поля. Кривым № 2 и 3 на рис. 1 соответствуют модели с ускорительными членами в уравнении Фоккера-Планка и без них соответственно. В обоих случаях предполагалось, что изотропный источник электронов располагался в вершине петли, энергетический спектр с показателем $\delta = 5$ в диапазоне 30–200 кэВ и $\delta = 10$ в диапазоне 0.2–10 МэВ. Источник электронов представлял собой одиночный импульс длительностью 50 мс (кривая 1 на рис. 1а). Суммарная энергия ускоренных электронов в петле представлена кривыми 2,3 на рис. 1а. (в единицах эрг). Без ускорительных членов (кривая 3) общая энергия ускоренных электронов в магнитной петле стремится к нулю уже к 8-й секунде после инъекции. Кривые 2, 3 на рис. 1б представляют собой суммарные потери энергии в петле к моменту $t = t^*$ как часть всей инжектированной энергии в петлю за время от $t = 0$ до $t = t^*$. Видно (кривая №3), что в модели без ускорения электронов потери инжектированной энергии к 8-й секунде составили ~100%. В модели с ускорением (кривые 2 на рис. 1а,б) первоначальная энергия увеличивается в 8 раз с ростом магнитного поля в вершине петли (коллапсом ловушки) от 20 Гс до 340 Гс (кривая 1, рис. 1б). Затем наблюдаются затухающие осцилляции общего количества энергии в петле, синхронные с вариациями магнитного поля.

Рис. 1.

На рис. 2 представлены рассчитанные для модели с ускорением временные кривые ЖР излучения из вершины (кривая 4) и основания петли (кривая 3). На рисунок также нанесен профиль изменения магнитного поля в вершине (кривая 2) и инжектора (кривая 1, правая ось ординат). Первоначальный импульс ускоренных электронов 50 мс (рис. 2, кривая 1) обусловил возникновение 4-х импульсов в ЖР излучении из основания (кривая 3). ЖР излучение в целом коррелирует с изменением магнитного поля, однако также наблюдаются и субпики, которых не было в исходном профиле вариаций магнитного поля.

Рис. 2.

На рис. 3 представлены глобальные вейвлет-спектры для источников, соответствующих левому основанию и вершине вспыхивающей петли. Красными линиями обозначены уровни значимости 95% и 99% выше уровня красного шума. Видно, что слева присутствуют значимые пульсации с периодами около 8 и 16 секунд, в то время как в вершине наблюдается только 16-секундная гармоника. Появление дополнительной гармоника, не связанной с осцилляциями магнитного поля, вызвано эффектами распространения в динамической магнитной ловушке.

Рис. 3.

Результаты расчетов показывают высокую эффективность бетатронного и Ферми ускорения электронов и подтверждают теоретическую возможность модулирования потока ЖР излучения за счет присутствия БМЗ волн в касповой части магнитной петли. Однако, присутствие магнитных флуктуаций (см. штриховые кривые на рис. 4), с уровнем $\delta B/B = 5 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda_B = 10^7$ см) приводит к относительно быстрому высыпанию ускоренных

Рис. 4. *Левая панель* – интегральный поток ЖРИ (эрг/с стер). *Правая панель* – суммарная энергия ускоренных электронов в петле (эрг) и источник электронов (эрг/с). Штриховая кривая – модель с магнитными флуктуациями. Сплошные кривые – без флуктуаций (с ускорением и без).

электронов из магнитной петли вследствие диффузии, в целом к уменьшению эффективности ускорения, а также к подавлению модуляции ЖР излучения.

Работа поддержана грантом №9 ПРАН.

Литература

1. Foullon C., et al. // A&A. 2005. V. 440. № 2. P. L59–L62.
2. Nakariakov V.M., et al. // A&A. 2006. V. 452. № 1. P. 343–346.
3. Jakimiec J., Tomczak M. // Solar Physics. 2010. V. 261. № 2. P. 233–251.
4. Bogachev S.A., Somov B.V. // Astronomy Letters. 2005. V. 31. № 8. P. 537–545.
5. Filatov L.V., et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53. № 8. P. 1007–1012.
6. Charikov Y.E., Shabalin A.N. // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55. № 8. P. 1104–1111.