КОРОНАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВСПЫШКИ В МОДЕЛИ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ЛОВУШЕК

Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е.

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

CORONAL HARD X-RAY SOURCES AT THE RISE PHASE OF THE FLARE IN THE COLLAPSING TRAP MODEL

Shabalin A.N., Charikov Yu.E.

Ioffe Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

The paper considers solar flare events in which a bright coronal source is observed in the hard X-ray range at energies above 20 keV at the preflare or early stage of the growth of the X-ray flux. An increase in the plasma density at the looptop due to the contraction of the loop during the relaxation of the closed loop magnetic field is considered as a possible reason (model of a collapsing trap). With a characteristic collapse time of about 10 s, the total energy of accelerated electrons in relation to the injected one increased by ~20–30%. The fraction of the HXR radiation flux in the energy range of 29–58 keV from the top in comparison with the footpoints is 15–30% higher in the model with collapsing traps.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-301-304

1. Введение

Концентрация частиц плазмы в корональной части петель на предвспышечной стадии не превышает 10^{10} см^{-3} . Поэтому, на первый взгляд, на ранней стадии вспышки поток жесткого рентгеновского (ЖР) излучения из верхней части магнитных петель не может быть достаточным для регистрации современными спектрометрами с высоким пространственным разрешением. Возможно, это и имеет место в большинстве солнечных вспышек, в которых не регистрировался корональный источник ЖР излучения. Локализация источника ЖР излучения высоко в короне предполагает соответствующую локализацию ускоренных электронов, то есть либо ускорение, либо их инжекцию и захват. Специфичность коронального источника ЖР излучения связана и с тем, что он локализован не во всей корональной части петли вплоть до хромосферы, хотя концентрация плазмы возрастает к хромосфере и, казалось бы, условия для генерации ЖР излучения улучшаются.

Для источника ЖР излучения в вершине необходимо, чтобы концентрация ускоренных электронов и плазмы были высокими, т.е. требуется их накопление/увеличение со временем. Увеличение концентрации ускоренных электронов в вершине происходит в случае, если электроны распределены квазипоперечно по питч-углам в момент их ускорения (инжекции) и/или в результате их последующего захвата. Эффективность захвата ускоренных электронов зависит от многих факторов, в том числе от геометрии магнитной петли, от того, насколько быстро происходит ускорение электронов, от того, насколько быстро происходит их захват и т.д.

ливается при высоком градиенте магнитного поля в сочетании с кулоновским рассеянием или при инжекции умеренно анизотропных электронов в присутствии рассеивающей их турбулентности, локализованной в корональной части петли, например, наличие ионно-звуковых фронтов или наличие магнитных неоднородностей [3]. К яркой ЖР вершине также приводит возрастание концентрации плазмы в результате эффекта испарения. Однако данный эффект существенен для фазы пика и спада вспышки, а не на ее ранней стадии [2]. Тем не менее, корональные источники ЖР излучения на ранней стадии вспышки наблюдаются. Рассмотрим некоторые из них в разделе 2. В разделе 3, на основе решения кинетического уравнения, будет произведен численный анализ модели коллапсирующих ловушек [1, 4, 6] как одной из возможных гипотез, способной объяснить появление ЖР источника в вершине в первые секунды – десятки секунд развития вспышки в ЖР диапазоне на энергиях >20 keV.

2. Корональный ЖР источник на начальной фазе вспышек

На рисунке 1 слева приведены временные профили ЖР излучения (RHESSI) в нескольких энергетических диапазонах для вспышки GOES X1.2-class SOL15-05-2013T01:25. Жесткий рентгеновский предвестник хорошо различим в диапазоне энергий 25–50 кэВ (помечен цифрой 1). Изображение в ультрафиолетовом диапазоне $131\text{\AA}$ для этого момента времени, полученное на SDO/AIA дано справа. Контурные линии соответствуют уровням 50, 70, 90% ЖР потока в диапазоне 20–30 кэВ. Из анализа вспышечного излучения в ультрафиолетовом, мягком и жестком рентгеновских

Рис. 1. Временные профили RHESSI в нескольких энергетических диапазонах для SOL15-05-2013T01:25 на левой панели. Справа – изображение SDO / AIA $131\text{\AA}$ и контурные линии RHESSI на 20–30 кэВ (50, 70, 90%) в момент предвестника жесткого рентгеновского излучения, отмеченного меткой 1 на левой панели.

диапазонах следует, что области максимума ЖР потока (рис. 1, справа) ассоциируются с двумя основаниями (контур 70% на юго-западе) и вершинной вспышечной аркады (контур 90% на северо-востоке). Таким образом, на начальной стадии вспышки на энергиях 20–30 кэВ наблюдается яркий корональный источник в вершине аркады.

Рис. 2. Изображения SDO / AIA на $131\text{\AA}$ (левая панель) и $171\text{\AA}$ (правая панель) с контурными линиями RHESSI 19–35 кэВ (зеленая пунктирная линия) во время нарастания и спада потока ЖР излучения (отмечены метками 2 и 3 на рис. 1 панель слева). Сплошная зеленая контурная линия – поток на длине волны $1700\text{\AA}$.

3. Модель коллапсирующей ловушки

Рассмотрим результаты решения кинетического уравнения [5] без учета турбулентных членов. Учет перестройки конфигурации магнитного поля в модели коллапсирующих ловушек приводит к ускорению электронов: бетатронному и Ферми. Потери энергии всех ускоренных электронов к моменту времени t^* как доля от всей инжектированной энергии за период времени от $t = 0$ с до $t = t^*$ представлена на рисунке 3 слева. В модели без бетатронного и Ферми ускорения (черная сплошная кривая) потери растут со временем вследствие кулоновских потерь и ухода частиц из ловушки и к $t = 6$ с потери составляют 40% от всей инжектированной энергии. В модели с коллапсирующей ловушкой в первые 1.5 с процессы доускорения электронов доминируют над потерями, что выражается в отрицательных потерях (красная пунктирная кривая) в этот период времени. Затем, начиная с $t = 1.5$ с, потери растут и к $t = 6$ с составляют лишь $\sim 10\%$ от всей инжектированной к этому моменту времени, энергии. В силу пропорциональности ЖР потока концентрации плазмы и ускоренных электронов, в модели с коллапсирующей ловушкой ожидается более высокая интенсивность излучения на энергиях >30 кэВ, чем в модели без бетатронного и Ферми доускорения.

Рис. 3. Слева – потери энергии всех ускоренных электронов к моменту времени t^* как доля от всей инжектированной энергии за период времени от $t = 0$ с до $t = t^*$. Справа – зависимость от времени доли корональной части петли в общем ЖР потоке для тех же двух моделей. Параметры моделей: $S(\alpha) = 1$; $\delta_1 = 7$; $E_{br} = 200$ кэВ; $\delta_2 = 10$; $B_{max}/B_0 = 8$; $b_1 = 0$ см; $s_1 = 0$ см;

На рис. 3 справа приведены относительные потоки ЖР излучения из вершины к интегральному по петле потоку в диапазоне 29–58 кэВ для обеих моделей. Как видно, в $t = 6$ с доли излучения из вершины в обеих моделях совпадают, что вызвано коллапсом магнитной ловушки и увеличением конуса потерь, что приводит к высыпанию электронов в хромосферу. Однако в начальный и момент пика инжекции электронов доля ЖР излучения из вершины в модели коллапсирующих ловушек превышает аналогичную в модели без коллапса на 15–30% и составляет $\sim 75\%$ от всего излучения вспыхивающей петли. Такое мощное излучение из вершины можно наблюдать на RHESSI для вспышек М и Х классов даже на начальной стадии, когда общий поток еще мал, что и было представлено в разделе 2. Столь яркую вершину в модели коллапсирующих ловушек обеспечивает рост концентрации плазмы при сжатии петли.

Работа поддержана Грантом РФФИ № 20-72-10158.

Литература

1. Bogachev, S.A., & Somov, B.V. // Astron. Reports, 2001, 45, 157.
2. Charikov, Y.E., & Shabalin, A.N. // Geomagn. Aeron., 2020, 60, 1071.
3. Charikov, Y.E., & Shabalin, A.N. // Tech. Phys., 2021, 66, 1204.
4. Karlický, M., & Kosugi, T. // Astron. Astrophys., 2004, 419 (EDP Sciences), 1159.
5. Shabalin, A.N., Charikov, Y.E., & Globina, V.I. // Geomagn. Aeron., 2020, 60, 1079.
6. Somov, B.V., & Kosugi, T. // Astrophys. J., 1997, 485, 859.