

МАГНИТНАЯ ДЕТОНАЦИЯ И УСКОРЕНИЕ КВМ ВО ВСПЫШКЕ X3.4 13 ДЕКАБРЯ 2006

Струминский А.Б.¹, Садовский А.М.¹, Григорьева И.Ю.²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

MAGNETIC DETONATION AND CME ACCELERATION DURING THE FLARE X3.4 ON DECEMBER 13, 2006

Struminsky A.B.¹, Sadovskii A.M.¹, Grigoryeva I.Yu.²

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

²Main Astronomical (Pulkovo) Observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia

Detonation is a self-sustaining process of propagation of a chemical reaction zone at supersonic speed due to the energy releasing in a chemical reaction. By magnetic detonation, we mean the process of propagation of multiple magnetic reconnection at supersonic speed in eruptive flares, leading to the acceleration of interplanetary coronal mass ejections (CMEs) with maximal velocities, when a strong magnetic field rises into the corona. The process of magnetic detonation is considered on the example of the development of the X3.4 eruptive flare on December 13, 2006. It is shown that when the plasma (>610 MHz) with strong magnetic field rises into a region with lower densities (<410 MHz) and weaker field strengths, the process of magnetic detonation can develop, leading to CME and acceleration of relativistic protons. The energy of the magnetic field in the flare volume is sufficient to accelerate the CME with the observed mass and velocity.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-251-254

Детонация – самоподдерживающийся процесс распространения зоны химической реакции со сверхзвуковой скоростью за счет энергии, выделяющейся в химической реакции. Под магнитной детонацией мы понимаем процесс распространения множественного магнитного пересоединения со сверхзвуковой скоростью в эруптивных вспышках, приводящий к ускорению межпланетных корональных выбросов массы (КВМ) с предельными скоростями. Фактически, понятие магнитной детонации использовалось, например, Леденевым [1] для определения скорости стационарной ударной волны при выходе сильного магнитного поля в корону. Здесь мы покажем развитие нестационарного процесса магнитной детонации на примере расширения источника мягкого рентгеновского излучения (SXR) в вспышке X3.4 13 декабря 2006 года.

Выбор события обусловлен тем, что оно уже изучалось нами [2–3]. Также процесс эрупции в этом событии подробно исследован в работах [4–6]. Мы рассматриваем произошедшие явления (рис. 1) относительно выбранного нуля – 02:22 UT [2], что на 1 мин позже начала радиоизлучения на 15.4 ГГц (RSTN). Вблизи 0 мин начинается рост жесткого рентгеновско-

го (HXR) излучения (>150 кэВ) – темпа счета ACS SPI [2], рост меры эмиссии (EM). Отметим, КА RHESSI вышел из тени Земли только на (+6) мин и пропустил начало эрупции и HXR излучения.

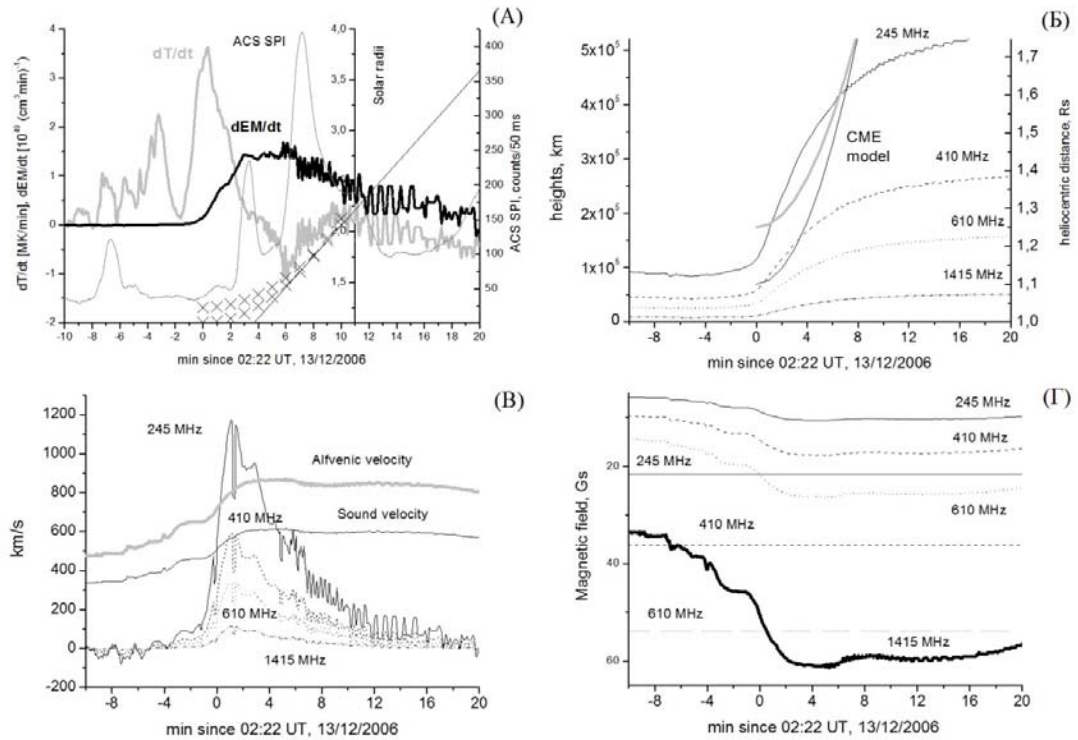


Рис. 1.

Аналогично [7] мы рассматриваем временные зависимости производных температуры $dT(t)/dt$ и меры эмиссии $dEM(t)/dt$ вспышечной плазмы (рис. 1A), которые наглядно показывают нагрев вспышечной плазмы и «хромосферное испарение». До 0 мин происходил только рост T без роста EM , «хромосферное испарение» было недостаточным. Рост EM разумно связать с развитием эрупции. Поэтому ускорение КВМ с конечной величиной началось вместе с ростом EM около 0 мин, до основных пиков HXR излучения. Согласно линейной аппроксимации (рис. 1A) «мгновенное» ускорение КВМ должно быть на (+4) мин, что совпадает с началом радиоизлучения II типа. В момент (+4) мин ударная волна уже сформировалась, т.е. движение плазмы было сверхзвуковым.

Для восстановления положения КВМ до его первого появления в поле зрения коронографа мы применяем метод сшивки предполагаемого равноускоренного и наблюдаемого в LASCO C2 ($1.5-6 R_s$) и C3 ($3.7-30 R_s$) равномерного движения [7]. Пусть КВМ начал двигаться из положения R_0 в момент t_0 с начальной скоростью $V_0 = 0$ и ускорением $a = const$ до момента t . После момента t КВМ движется со скоростью $V = const$, которая известна из наблюдений коронографа LASCO. Так как $R = \alpha + \beta t$, $V = \beta$, $a = \beta/(t-t_0)$, то из условия сшивки равноускоренного и равномерного движений нахо-

дим $t = (2R_0 - 2\alpha - \beta t_0)/\beta$. Результаты сшивки представлены в табл. 1, нижние индексы при t и a соответствуют $R_0 - 1.1R_S$ или $1.25R_S$.

Таблица 1.

t_0 [s]	α [km]	β [km/s]	$t_{1.1}$ [s]	$a_{1.1}$ [s]	$t_{1.25}$ [s]	$a_{1.25}$ [s]
0	371118	1774	444	4.0	563	3.2

Регистрации излучения на частотах менее 2 ГГц, где тепловое и плазменное излучение преобладает над гиросинхротронным (например, фиксированные частоты RSTN 1415, 610, 410 и 245 МГц) позволяет оценить концентрацию плазмы $n_0(t)$ по плазменной частоте $\nu_p = 9000\sqrt{n_0}$, а характерный размер $L_0(t)$ радиоисточника по SXR наблюдениям. Мы предполагаем, что в области радиоисточника находится SXR источник с концентрацией $n(t)$, где $n(t) > n_0(t)$ и характерным размером $L(t) < L_0(t)$. Из SXR наблюдений GOES вычисляется температура $T(t)$ и мера эмиссии $EM(t)$ вспышечного источника. Если источник SXR излучения представляет полусферу с объемом $V = 2\pi L^3/3 \approx 2L^3$, то $EM(t) = 2n(t)^2 L(t)^3 > 2n_0(t)^2 L_0(t)^3$ и $L(t) < \sqrt[3]{EM(t)/2n_0(t)^2}$. Так можно оценить $L(t)$ – минимальный и $L_0(t)$ – максимальный размер SXR источника (при условии $T(t) = T_0(t)$).

На рис. 1Б представлены результаты расчета линейных размеров SXR источника с плотностью (плазменной частотой), соответствующей четырем частотам RSTN. Мы видим, что ожидаемые положения KBM находятся внутри SXR источника с плазменными частотами 410 и 245 МГц примерно до (+5) мин. Скорость расширения SXR источника $v(t) = dL(t)/dt$ показана (рис. 1В). Первое открытие магнитных структур, по-видимому, происходит в максимуме T . Далее начинается свободное расширение плазмы, не сопровождающиеся видимым нагревом [2]. Условие замагниченности плазмы $B^2/8\pi = 2nkT$ позволяет оценить величину равновесного магнитного поля B в замкнутых структурах SXR источника.

При переходе всей энергии магнитного поля в кинетическую энергию плазмы с концентрацией n_0 , максимальная возможная скорость KBM будет $V_{CME} = V_A = B/\sqrt{4\pi m_p n_0}$. В случае равновесия альвеновская скорость в корень из двух раз больше тепловой скорости $V_T = \sqrt{2kT/m_p}$. На рис. 1В жирные серая и черная кривые показывают изменения V_T и V_A в ходе развития вспышки. Видно, что только при плазменной частоте <410 МГц скорость расширения SXR может стать сверхзвуковой, а при <245 МГц – сверхальвеновской. т.е. с момента регистрации излучения на 245 и 410 МГц на (+2) мин начинается сверхзвуковое расширение замагниченной плазмы. При больших концентрациях плазмы сверхзвуковой режим течения не реализуется, так как малы $L(t)$ и велики характерные времена.

На рис. 1Г кривые показывают рассчитанные величины равновесного B для четырех плазменных частот, а горизонтальные линии – необходимые величины B для достижения наблюдавшейся $V_{CME} = V_A = 1774$ км/с.

Сравнение равновесных величин магнитного поля и его величин, необходимых для достижения наблюдаемой скорости КВМ (рис. 1Г), показывает, что энергии магнитного поля, запасенного в структурах с плазменными частотами <410 МГц, недостаточно для ускорения КВМ с $V_{CME} \geq 1774$ км/с. Однако при подъеме более плотных структур (>610 МГц) с большими магнитными полями в области (<410 МГц) энергии поля может быть достаточно для осуществления магнитной детонации.

Таблица 2.

MHz	$n[\text{cm}^{-3}]$	L [Mm]	M[g]	dL/dt [km/s]	$ndL/dt[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	B[Gs]	E [V/cm]
1415	$2.5 \cdot 10^{10}$	22	$4.3 \cdot 10^{14}$	90	$2.3 \cdot 10^{17}$	59	5.3
610	$4.6 \cdot 10^9$	68	$2.3 \cdot 10^{15}$	278	$1.3 \cdot 10^{17}$	26	7.2
410	$2.1 \cdot 10^9$	116	$5.2 \cdot 10^{15}$	472	$1.0 \cdot 10^{17}$	17	8.0
245	$7.4 \cdot 10^8$	230	$1.4 \cdot 10^{16}$	936	$7.0 \cdot 10^{16}$	10	9.3
245	$7.4 \cdot 10^8$	230	$1.4 \cdot 10^{16}$	936	$7.0 \cdot 10^{16}$	59*	55

В табл. 2 приведены рассчитанные параметры расширения SXR источника на (+2) мин – начало детонации. Процесс развивается на высотах от 20 до 200 Мм, линейная скорость меняется от 90 до 900 км/с, поток вещества снизу вверх уменьшается, его величину вполне может обеспечить хромосфера (хромосферное испарение). Масса плазмы, заключенная в замкнутые структуры вспышки, может быть основой для КВМ с массой $7.5 \cdot 10^{15}$ г [9]. На этих высотах величина равновесного магнитного поля составляет примерно 60–10 Гс. При таких скоростях и магнитных полях напряженности электрического поля $E = eVB/c$ будут превышать поле Драйзера на всех высотах развития эрупции. Отметим, что наши оценки поля практически совпадают оценкой ~ 10 В/см [8], которая сделана для значительно меньших высот, где поле 650 Гс и скорость 14 км/с. Необходимая длина пути для ускорения протонов до релятивистских энергий может быть достигнута во множестве элементарных актов. В этом случае источник солнечных релятивистских протонов будет совпадать как с местом солнечной вспышки, так и с областью ускорения КВМ.

Литература

1. Леденев В.Г. // Австрон.Ж., 1980, т. 37, р. 113.
2. Струминский А.Б. и Зимовец И.В. // Письма в АЖ, 2008, т.34, с. 777.
3. Zimovets I.V., Gros M., Struminsky A.B. // Adv. in Space Res., 2009, v. 43, p. 680.
4. Asai A., Hara H., Watanabe T., et al. // Astrophys. J., 2008, v. 685, p. 622.
5. Sterling A.C., Moore R.L., Harra L.K. // Astrophys. J., 2011, v. 743, p. 63.
6. Grechnev V.V., Kisilev V.I., Uralov A.M., et al. // PASJ, 2013, v. 65, p. S9.
7. Григорьева И.Ю. и Струминский А.Б. // Астрон. журн., 2022, т. 99, с. 486.
8. Li C. et al. // A&A, 2009, v. 503. p. 1013.
9. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list