СКОРОСТИ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В КОМПАКТНОЙ ВСПЫШКЕ КЛАССА X

Гопасюк О.С., Вольвач А.Е., Якубовская И.В.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Республика Крым, Россия

MAGNETIC RECONNECTION RATES IN CONFINED X FLARE

Gopasyuk O.S., Volvach A.E., Yakubovskaya I.V.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

We study the energy-release process in confined X2.2 flare that occurred on 6 September 2017 in AR 12673 using 1600 Å filtergrams from AIA/SDO, magnetograms from HMI/SDO. Analysis was supplemented with microwave (MW) data from the radio astronomy diagnostic complex of solar activity of the KrAO RAS (KRIM). The flare consisted of the quasi-circular and two elongated ribbons, inside and outside the quasi-circular ribbon, respectively. Magnetic reconnection rates and reconnection fluxes were derived. The total reconnection magnetic flux was $3.1 \cdot 10^{21}$ Mx which corresponds to approximately 10% of the total magnetic flux of active region. The maximum magnetic reconnection rates was $1.5 \cdot 10^{19}$ Mx/s. Magnetic reconnection rates are temporally correlated with the flare nonthermal emission. Intimate physical linkage between the remote ribbon and main site circular flare are observed. The low-frequency slope of MW spectrum is 1.02, which indicates the spatial inhomogeneity of the emission source and an increase in source area with decreasing frequency. The time delay in the transition from higher to lower frequencies in the centimeter range of wavelengths was about 12 seconds, and in the transition from the centimeter range to the meter was 23 seconds.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-93-96

Известно, что магнитное пересоединение играет важную роль в солнечной активности. В последнее время вызывают интерес кольцевые ленточные вспышки, которые являются особым типом вспышек, ленты которых имеют круглую или квазикруглую форму. В 3D режиме магнитного пересоединения кольцевая ленточная вспышка демонстрирует топологию веер-шип [1]. Кольцевая лента образуется на пересечении куполообразной поверхности веера и нижней атмосферы, тогда как центральная и внешняя ленты являются основаниями шипа внутри и снаружи закрытой поверхности веера, соответственно [см., например, 2].

Мы провели исследование процесса магнитного пересоединения во вспышке X2.2 6 сентября 2017 года в активной области NOAA 12673. Нами были использованы магнитограммы SDO/HMI и SDO/AIA изображения Солнца в полосе 1600 Å, а также данные микроволнового излучения, полученные в диапазоне 327 МГц – 10 ГГц радиоастрономическим диагностическим комплексом солнечной активности КрАО РАН (KRIM) [3].

По изображениям в ультрафиолете были определены границы вспышечных лент. В этом событии заметны несколько наблюдательных осо-

бенностей. Вспышка состояла из трех лент – квазиколецевой и двух вытянутых лент, внутри и снаружи колецевой. Кольцевая лента освещалась последовательно по часовой стрелке. Появление внешней, удаленной ленты, имело задержку около 1.5 минут. Кольцевая лента находилась в области положительной полярности, а центральная и удаленная ленты находились в области отрицательной полярности.

Магнитный поток в пикселях, охватывающих вспышечные ленты, считается пересоединенным. Для каждого временного шага вычислялся магнитный поток в только что освещенных вспышечных пикселях. Вспышечный пиксель считался только что освещенным и принадлежащим к определенной магнитной полярности, если (а) интенсивность пикселя превышала порог, (б) этот порог интенсивности не был превышен ни в одной из предыдущих 1600 Å фильтрограмм, и (в) абсолютное значение плотности магнитного потока нормальной составляющей магнитного поля было выше уровня шума ± 100 G.

Сначала вычислялась разница в потоке пересоединения между временными шагами t_k и t_{k-1} как $\Delta\phi(t_k) = \sum_i a_i(t_k) B_n(a_i)$, где $a_i(t_k)$ – только что освещенная вспышечная площадь между t_{k-1} и t_k ; $B_n(a_i)$ – компонент магнитного поля, нормальный к поверхности в только что освещенной области. Из этой последовательности мы получали кумулятивный поток пересоединения до момента времени t_k : $\Delta\phi(t_k) = \sum_{j \leq k} \Delta\phi(t_j)$. Скорость пересоединения, т.е. скорость изменения магнитного потока пересоединения, на каждом временном шаге рассчитывается как в работе [4]: $\dot{\phi}(t_k) = \Delta\phi(t_k) / (t_k - t_{k-1})$.

Общий поток пересоединения во вспышке определялся как среднее из абсолютных значений потоков пересоединения в обеих полярностях в конце временного ряда $\phi_{FL} = (|\phi_+| + |\phi_-|) / 2$, где ϕ_+ и ϕ_- – кумулятивные магнитные потоки в области положительной и отрицательной полярности, соответственно, и составил $3.1 \cdot 10^{21}$ Мх, что соответствует 10% общего магнитного потока активной области. Пиковые значения скорости пересоединения вычислялись как $\dot{\phi}_{FL} = (|\dot{\phi}_+| + |\dot{\phi}_-|) / 2 = 1.5 \cdot 10^{19}$ Мх/с, где $\dot{\phi}_+$ и $\dot{\phi}_-$ – максимальные значения скорости пересоединения в положительной и отрицательной полярности, соответственно.

На рис. 1 представлено сравнение скорости изменения магнитного потока пересоединения в областях положительной и отрицательной полярности и нетеплового излучения, аппроксимированного временной производной мягкого рентгеновского излучения SXR (данные 1–8 Å GOES). Как можно видеть из графика, скорости изменения потоков в области положительной и отрицательной полярности коррелируют во времени с нетепловой эмиссией вспышки (временной производной потока SXR), что теоретически ожидается и может продемонстрировать существенную роль маг-

нитного пересоединения в создании этого события. Аргумент в пользу тесной связи между удаленной вспышечной лентой и основной кольцевой вспышкой заключается в том, что удаленная яркость, как показывает наличие пика в скорости изменения отрицательного потока в районе 09:08 UT (отмеченного на графике RB) является одновременной со второй фазой выделения энергии вспышки, которая представлена отдельным пиком во временной производной потока SXR. Этот пик вызван удаленной яркостью, и он исчез бы, если бы в область отрицательного поля была включена только внутренняя лента шипа.

Рис. 1. Временные профили скорости изменения магнитного потока пересоединения в областях положительной и отрицательной полярности (сплошная и пунктирная черные кривые, соответственно) и нетеплового излучения (аппроксимировано временной производной мягкого рентгеновского излучения SXR (данные 1–8 Å GOES) – серая толстая сплошная кривая).

В период импульсной фазы между 09:01 UT (время появления удаленной яркости) и 09:10 UT (максимальная фаза вспышки по данным GOES) коэффициент корреляции между потоками удаленной и внутренней лентами составил 0.96 с наклоном аппроксимирующей прямой 0.7. Это указывает на то, что аналогичная величина отрицательного магнитного потока была пересоединена в основном месте вспышки и удаленной яркости во время импульсной фазы. Такая зависимость предполагает тесную физическую связь между двумя системами потоков – внутренней и удаленной.

По данным MW излучения был построен частотный спектр для времени максимума эмиссии (рис. 2а). Он не показал максимальной частоты, т.о. мы рассматривали только низкочастотную часть спектра, где излуча-

ющая среда становится оптически толстой. Низкочастотный наклон составил 1.02, что указывает на пространственную неоднородность источника эмиссии и увеличение площади источника с уменьшением частоты.

Рис. 2. Частотный спектр (2a) и наблюдаемое время максимума микроволновой эмиссии на различных частотах (2b).

Сравнение времен пиков максимального MW излучения (рис. 2b) показало, что более высокие частоты достигают максимума раньше, а более низкие частоты достигают пика позже. Временная задержка при переходе от более высоких к более низким частотам сантиметрового диапазона длин волн составила около 12 секунд, а при переходе от сантиметрового диапазона к метровому – 23 секунды. Задержка пика на более низких радиочастотах может быть приписана частотному дрейфу спектрального пика в сторону более низких частот из-за расширения радиоисточника. Расширение источника приводит к увеличению потока в оптически толстой области из-за увеличения площади источника, а также из-за уменьшения магнитного поля.

Литература

1. Lau, Y.-T., Finn, J.M. // *Astrophys. J.*, 1990, vol. 350, p. 672.
2. Masson, S., Pariat, E., Aulanier, G., Schrijver, C.J. // *Astrophys. J.*, 2009, vol. 700, p. 559.
3. Volvach, A.E., Yakubovskaya, I.V. // *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2019, vol. 31, No. 2, p. 389.
4. Veronig, A.M., Polanec, W. // *Solar Phys*, 2015, vol. 290, p. 2923.