ОБ ИСТОЧНИКЕ ГЕНЕРАЦИИ СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 2 АПРЕЛЯ 2017

Моргачев А.С.^{1,2}, Цап Ю.Т.^{2,3}, Моторина Г.Г.^{2,4}, Смирнова В.В.^{2,5}

¹НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

²ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

³КрАО РАН, Научный, Крым, Россия

⁴Астрономический институт Чешской академии наук, Чешская Республика

⁵Университет Турку, Турку, Финляндия

SOURCE OF SUB-TERAHETZ EMISSION FROM THE 2 APRIL 2017 SOLAR FLARE

Morgachev A.S.^{1,2}, Tsap Yu.T.^{2,3}, Motorina G.G.^{2,4}, Smirnova V.V.^{2,5}

¹Radiophysical Research Institute of Lobachevsky University, Nizhny Novgorod

²Pulkovo Observatory of RAS, St. Petersburg

³Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea

⁴Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic

⁵University of Turku, Turku, FI20014 Finland

Analysis of millimeter (93 and 140 GHz) emission, obtained by the RT-7.5 radio telescope of the Bauman Moscow State Technical University, from the 2 April 2017 solar flare was carried out. Based on flaring atmosphere model by Machado et al. [3] the emission contribution function was calculated and main radiation characteristics were determined. It is shown that the sub-THz emission is formed in thin layer with depth of about 10 km and plasma temperature of order 10^5 K. The model of this chromospheric layer is calculated. The obtained results suggest the chromosphere source heating by thermal flows from overlying flaring regions.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-301-304

К настоящему времени получено много указаний, свидетельствующих об определяющем вкладе в суб-терагерцевое (0.1–1 ТГц) излучение с положительным наклоном спектра тепловой плазмы [2, 4–6]. Однако вопрос о природе источника излучения остается открытым. Решение данной проблемы позволит получить ценную информацию о механизмах нагрева вспышечной плазмы. При этом большую помощь может оказать исследование временных задержек между профилями излучения в различных диапазонах. Ранее авторы работы [4] провели анализ микроволнового, ультрафиолетового и рентгеновского излучения солнечной вспышки 2 апреля 2017 г. с положительным наклоном спектра между частотами 93 и 140 ГГц, обнаруженным на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Подобие в поведении временных профилей наблюдаемого миллиметрового и мягкого рентгеновского излучений легло в основу предположения о тепловой природе миллиметрового всплеска. Исходя из расчета дифференциальной меры эмиссии, был сделан вывод о пренебрежимо малом вкладе в

миллиметровую компоненту тепловой корональной плазмы с температурой $T = 3 \cdot (10^5 - 10^7)$ К и соответственно важной роли вспышечной хромосферной плазмы в генерации излучения.

Цель настоящей работы – определить характеристики источника миллиметрового излучения, а также по возможности выяснить природу нагрева теплового хромосферного источника во вспышке 2 апреля 2017 г.

Нами была рассмотрена полуэмпирическая модель вспышечной атмосферы [3] для случая сильной вспышки. Используя модельные высотные распределения температуры и концентрации плазмы (рис. 1), рассчитана зависимость спектрального потока излучения

$$F_\nu(h) = \frac{S}{R^2} \int_0^h CF(h') dh', \quad (1)$$

функции вклада

$$CF(h) = \eta_\nu(h) \exp \left(- \int_h^H k_\nu dh \right) \quad (2)$$

и оптической толщины источника

$$\tau_\nu(h) = \int_h^H k_\nu dh, \quad (3)$$

где η_ν и k_ν – коэффициенты излучения и поглощения тепловой плазмы [1], $S = 1.4 \cdot 10^{18}$ см² – площадь источника, оцененная по картам жесткого рентгеновского излучения [4] и расстояние $R = 1$ а.е. Как видно из рис. 1, поток излучения на частоте 140 ГГц больше, чем на 93 ГГц, т.е. наклон спектра – положительный. Значение функции вклада $CF(h)$ ниже определенной высоты близко к нулю из-за сильного поглощения в плотной и относительно холодной хромосферной плазме (рис. 1). Излучение на частотах 93 и 140 ГГц определяется плазмой верхней хромосферы и переходной области. Наибольший вклад в излучение вносит хромосферный слой толщиной менее 10 км с температурой $(3-10) \cdot 10^4$ К и электронной концентрацией $n_e = 10^{12} - 10^{13}$ см⁻³.

Однако объяснить наблюдаемые во вспышке 2 апреля 2017 г. максимальные потоки излучения (рис. 3 сверху) в рамках рассмотренной модели атмосферы не удастся. В связи с этим, мы оценили температуру и концентрацию электронов геометрически тонкого ($l = 10$ км) однородного теплового источника, при которых расчетные потоки излучения на частотах 93 и 140 ГГц соответствовали бы наблюдаемым во вспышке 2 апреля 2017 г. с учетом погрешностей измерений радиотелескопа РТ-7.5, равным 15 и 30% (рис. 3 верхняя панель, сплошная и пунктирная линии). Результаты численных расчетов представлены на рис. 2. Для каждого момента времени разброс найденных значений температуры плазмы сравнительно мал, тогда как электронную концентрацию можно определить лишь с точностью до порядка. Последнее обстоятельство объясняется слабой зависимостью ин-

тенсивности оптически толстого теплового источника от плотности плазмы. Характерные значения температуры модельного источника на фазе роста и спада миллиметрового всплеска составляют 10^5 – $3 \cdot 10^5$ МК и только в максимуме вспышки достигают $6 \cdot 10^5$ МК, что соответствует переходной области хромосферы. Это хорошо согласуется с расчетами меры эмиссии вспыхивающей плазмы, выполненными в работе [4] по наблюдениям крайнего ультрафиолетового излучения на AIA/SDO, согласно которым корональная плазма с $T > 6 \cdot 10^5$ МК не вносит существенный вклад в наблюдаемое миллиметровое излучение.

Для того чтобы выявить механизм нагрева источника миллиметрового излучения, мы исследовали наблюдаемые временные задержки между мягким рентгеновским и миллиметровым излучением. Как следует из проведенных расчетов, температура рентгеновской плазмы достигает максимума раньше (07:58 UT, рис. 3, нижняя панель) пика миллиметрового излучения на 6 мин. 40 сек (рис. 3 верхняя панель). На наш взгляд, столь значительную временную задержку можно объяснить тем, что основной вклад в нагрев плазмы переходной области и хромосферы вносят тепловые корональные потоки.

Предположим, что нагрев происходит в результате передачи тепла из верхних слоев атмосферы нижним посредством теплопроводности. Как известно, мощность теплопроводного нагрева слоя столкновительной плазмы толщины l согласно [7] можно оценить следующим образом:

$$q = \kappa \frac{d}{ds} \left(T^{5/2} \frac{dT}{ds} \right) = \kappa \frac{2}{7} \frac{d}{ds} \left(\frac{dT^{7/2}}{ds} \right) = \kappa \frac{2}{7} \frac{d^2 T^{7/2}}{ds^2} \approx \frac{2}{7} \frac{T^{7/2}}{l^2} \quad (4)$$

где T – температура плазмы, $\kappa = 10^{-6}$ эрг $\text{см}^{-1} \text{с}^{-1} \text{К}^{-1}$ – коэффициент электронной теплопроводности Спитцера. Откуда, положив концентрацию нейтральных атомов $n_H = n_e$ (Machado et al., 1980), что соответствует тепловой энергии плазмы $E_{th} \approx 3/2(n_e + n_i + n_H) = 9/2 n_e k_B T$, где постоянная

Рис. 1.

Больцмана $k_B = 1.38 \times 10^{-16}$ эрг К⁻¹, для характерного времени теплопроводного нагрева хромосферной прослойки получим:

$$\tau \approx \frac{E_{th}}{q} = \frac{63k_B n_e}{4\kappa T^{5/2}/l^2} \quad (5)$$

Рис. 2.

Рис. 3.

Полагая в формуле (5) $l = 10^6$ см, $T = 3 \cdot 10^5$ К и $n_e = 10^{13}$ см⁻³, находим $\tau \approx 435$ с. Полученное значение $\tau \approx 7$ мин приблизительно совпадает с характерным временем задержки между пиками миллиметрового излучения и температуры. Следовательно, можно предположить, что именно тепловой поток, направленный из короны в нижнюю атмосферу, мог привести к нагреву хромосферного источника, ответственного за генерацию наблюдаемого миллиметрового излучения.

Работа выполнена при поддержке грантов: РФФИ 18-02-00856 А (Цап Ю.Т.), программой ПРАН П-12 (Смирнова В.В., Цап Ю.Т.) «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной», научной школы НШ-7241.2016.2 и проектов RVO:67985815, LM2015067: EU-ARC.CZ – National Research Infrastructure by Ministry of Education of the Czech Republic (Моторина Г.Г.) и финансовой поддержке Минобрнауки (госзадание № 3.2722.2017/4.6) (Моргачев А.С.).

Литература

1. Dulk G.A. Annual review of A&A., 1985, V. 23. P. 169.
2. Kontar E.P. et al. A&A, 2018, V. 620, id.A95, 6 p.
3. Machado M.E. et al. ApJ Pt.1, 1980, V. 242. № 15, P. 336-351.
4. Morgachev A.S. et al. Ge&Ae, 2018, V. 58. Issue 8, P. 1113-1122.
5. Trotter G. et al. SoPh, 2011, V. 273. Issue 2, P.339-361.
6. Tsap Yu.T. et al. ASR, 2016, V. 57 № 7, P. 1449-1455.
7. Tsap Yu.T. et al. Ge&Ae, 2016, V.56. Issue 8, P.1104-1109.