

ОСОБЕННОСТИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШКИ SOL20130416T07:30 КЛАССА C

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

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия*

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

³*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

SUBTERAHERTZ RADIATION FROM THE SOL20130416T07:30 C-CLASS SOLAR FLARE

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

¹*Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

Solar subterahertz (sub-THz) events characterized by a positive slope of the radio flux density spectrum are usually associated with M and X class solar flares according to the GOES classification. In weaker B and C class flares, the sub-THz radiation was observed extremely rare, and properties of the emission source plasma parameters have not yet been studied in detail.

The analysis of sub-THz radiation at different phases of the SOL20130416T07:30 C-class solar flare is presented based on the Bauman Moscow State Technical University Radio Telescope RT-7.5, at frequencies of 93 and 140 GHz. The relationship between sub-THz, X-ray and EUV emission are analyzed. It is shown that the coronal plasma makes a significant contribution to the sub-THz emission at the pre-impulsive and post-impulsive phases of the flare, while at the impulsive phase the sub-THz radiation is determined by the chromosphere.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-281-284>

Введение

Ранее по данным наблюдений на РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, на частотах 93 и 140 ГГц и космическом аппарате SDO, на инструменте AIA (AIA/SDO) в крайнем ультрафиолетовом излучении (КУФ), нами было показано, что для большинства вспышечных событий М и X рентгеновских классов тепловое тормозное (free-free emission) субтерагерцовое (суб-ТГц) радиоизлучение формируется в хромосфере [1]. Для вспышки 04.05.2022 г. рентгеновского класса M5.7 мы также установили, что существенный вклад в суб-ТГц компоненту могут вносить «холодные» корональные петли ($T < 10^5$ K) [2]. В свою очередь, согласно наблюдениям на радиоинтерферометре ALMA (94 и 230 ГГц) и AIA/SDO, для событий класса В на постимпульсной фазе вспышки, были получены указания об определяющем вкладе «горячих» (10^5 – 10^6 K) КУФ-петель в суб-ТГц радиоизлучение [3]. Следовательно, можно ожидать, что вклад корональной тепловой плазмы в суб-ТГц компоненту для слабых вспышечных событий должен

существенно возрасти. В связи с этим возникает необходимость проведения детальных исследований особенностей суб-ТГц, КУФ и рентгеновского излучения микровспышек.

Целью данной работы является исследование связи источников суб-ТГц излучения с корональной плазмой на разных фазах вспышечного энерговыделения, на примере события SOL20130416T07:30 рентгеновского класса C.

Методика и анализ данных

Вспышка SOL20130416T07:30 рентгеновского класса C1.3 наблюдалась на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана [4] на частотах 93 и 140 ГГц, а также на космическом аппарате SDO в линиях КУФ. В предимпульсной фазе вспышки поток суб-ТГц излучения составлял $\sim 1.8 \pm 0.2$ с.е.п. (93 ГГц) и 2.2 ± 0.4 с.е.п. (140 ГГц). На рис. 1 слева представлены временные профили вспышки мягкого рентгеновского излучения и температуры по наблюдениям на спутнике GOES, мягкого и жесткого рентгеновского излучения по данным спутника RHESSI, а также профили на частотах 93 и 140 ГГц. Видно, что, в отличие от мягкого рентгеновского излучения, суб-ТГц временной профиль не имеет выраженного пика, а максимум потока на 140 ГГц отстает от пика мягкого рентгеновского излучения на 5 мин. Справа представлены спектры плотности потока суб-ТГц излучения для предимпульсной, импульсной и постимпульсной фаз вспышки. Положительный наклон спектра (~ 1.7) надежно наблюдался только в импульсной фазе вспышки, тогда как в предимпульсной и постимпульсной фазах, в пределах ошибок измерения он, скорее, плоский. Более того, обращает на себя внимание, что формально наклон спектра в постимпульсной фазе вспышки стал отрицательным.

Чтобы оценить вклад корональной неоднородной плазмы в суб-ТГц излучение вспышки, мы рассчитали дифференциальную меру эмиссии (DEM) по данным AIA/SDO в диапазоне температур $0.5 \leq T \leq 25$ МК [5] и оценили ожидаемый поток суб-ТГц излучения на трех фазах вспышки. На рис. 2 показаны рассчитанные по DEM спектры плотности потока радиоизлучения с помощью методики, которую впервые предложили Landi and Chiuderi Drago (2008) [6]. Как видно, расчетные значения потока, генерируемого тепловой корональной плазмой в предимпульсной фазе, на частотах 93 и 140 ГГц в 07:15:00 UT составляют ~ 1.5 с.е.п. (панель а), что сопоставимо в соответствующий момент времени с наблюдаемыми величинами ~ 2 с.е.п. (см. рис. 1). Между тем, как видно из рис. 2b, расчетные спектры плотности потока в импульсной (07:42:00 UT) и постимпульсной (07:45:00 UT) фазе практически совпадают, и для заданных моментов времени спектральная плотность потока ~ 1 с.е.п. Это предполагает пренебрежимо малый вклад в суб-ТГц радиоизлучение корональных источников в максимуме импульсной фазы, и весьма существенный на послеимпульсной, поскольку

наблюдаемые характерные значения составили соответственно 2.5–6 и ~ 2 с.е.п.

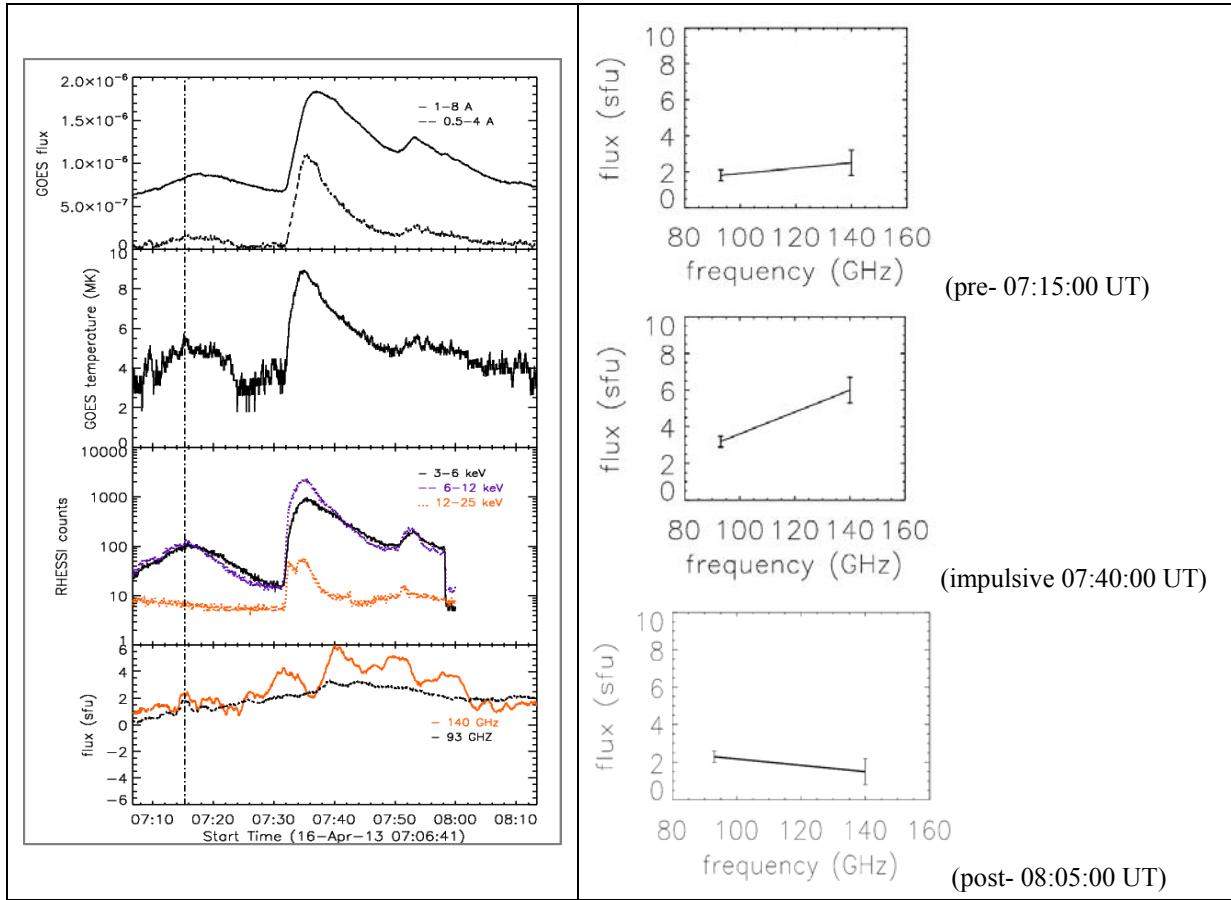


Рис. 1. Слева: временные профили вспышки, построенные по данным о мягком рентгеновском излучении (GOES, RHESSI) и по наблюдениям на частотах 93 и 140 ГГц. Справа: спектры потока суб-ТГц излучения на частотах 93 и 140 ГГц, для пред-, импульсной и постимпульсной фаз вспышки.

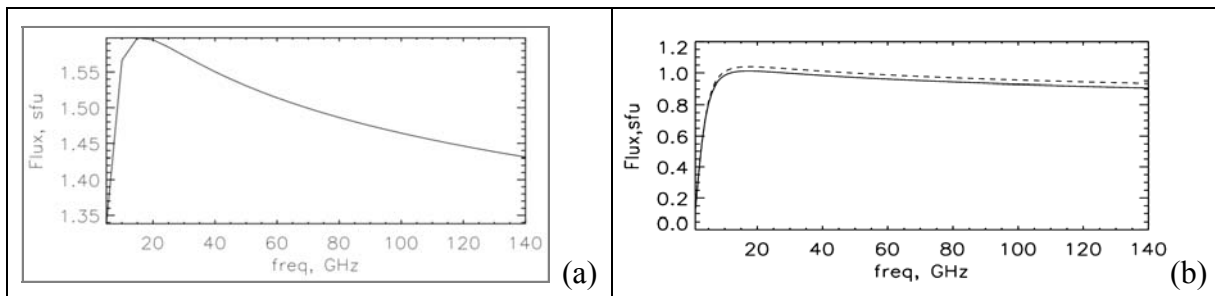


Рис. 2. а) Рассчитанный по DEM спектр плотности потока радиоизлучения на предимпульсной фазе вспышки. На частотах 93 и 140 ГГц расчетный поток составил ~ 1.4 сеп, б) То же что и рис. 2а, но для импульсной (сплошная линия) и пост-импульсной (пунктирная линия) фаз вспышки.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о значительном вкладе тепловой плазмы “горячих” корональных пе-

тель в генерацию суб-ТГц радиоизлучения, по меньшей мере, для исследуемого события на предимпульсной и постимпульсной фазе вспышечного энерговыделения. Это может свидетельствовать о том, что для слабых вспышечных событий на предимпульсной стадии выделяемой тепловой энергии явно недостаточно для прогрева хромосферной плазмы, тогда как на поствспышечной фазе, вследствие испарения хромосферы и конденсации коронального вещества, происходит относительное усиление вклада в суб-ТГц компоненту радиоизлучения «горячих» корональных петель.

Выводы

Сформулируем основные результаты работы:

1. Проведен анализ вспышки рентгеновского класса C1.3 с положительным суб-ТГц наклоном спектра в максимуме импульсной фазы.
2. На основе дифференциальной мере эмиссии (DEM), полученной по данным AIA/SDO, показано, что основной вклад в суб-ТГц излучение вспышки в предимпульсной и постимпульсной фазах вносит корональная плазма с $T = 10^5\text{--}10^6$ К, тогда как в импульсной фазе вклад «горячих» корональных петель в суб-ТГц излучение оказывается незначительным.
3. В отличие от вспышек M и X рентгеновского класса тепловая корональная плазма может давать существенный вклад в суб-ТГц излучение слабых вспышечных событий в предимпульсной и постимпульсной фазах, что хорошо согласуется с результатами, полученными на ALMA в работе [3].

Работа выполнена при поддержке Госзаданий № 122022400224-7 и № FFUG-2024-0002.

Литература

1. Tsap Yu.T., Smirnova V.V., et al. // ASR, 2016, V. 57, p. 1449.
2. Smirnova V.V., Tsap Y.T., Ryzhov V.S. et al. // Ge Ae, 2023, V. 63, p. 527.
3. Skokić, I., Benz, A.O., Brajša, R., et al. // A&A, 2023, 669, A156.
4. Tsap, Y.T.; Smirnova, V.V.; et al. // Sol. Phys., 2018, V. 293, p. 50.
5. Hannah I.G. & Kontar E.P. // A&A, 2012, V. 539, id. A146.
6. Landi E., Chiuderi Drago F. // ApJ, 2008, V. 675, p. 1629.