

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОБЫТИЯ 28.03.2022

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

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, 251 65 Ondřejov, Czech Republic

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

PRECURSORS AND SUB-TERAHERTZ EMISSION OF A SOLAR FLARE ON MARCH 28, 2022

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

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

²Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, 251 65 Ondřejov, Czech Republic

³Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Russia

Peculiarities of solar radio spectrum, as well as temporal profiles of flare emission indicate the thermal nature of the sub-terahertz rising with frequency component observed at 100–1000 GHz. For some events it was found that the beginning of a solar flare at 93 GHz was several minutes ahead of its impulsive phase. The present work is aimed at detailed analysis of a M4.0-class solar flare observed on March 28, 2022, which had sub-terahertz emission registered with the Bauman Moscow State Technical University Radio Telescope RT-7.5 at 93 GHz. We supply these data with multiwavelength solar observations in the X-ray (GOES, GBM/FERMI), extreme ultraviolet (AIA/SDO), and microwave (RT-2, RT-3, INAF RT) ranges. The millimeter emission was calculated based on the differential emission measure from AIA/SDO data and numerical calculations assuming thermal free-free mechanism. Heating of a sub-terahertz emission source located in the transition region and upper chromosphere of the Sun cannot be caused by electrons accelerated in the solar corona and heat fluxes from flare regions of the coronal looptop. A possible origin of the thermal precursor in the solar chromosphere is discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-209-212

Введение

Сравнительно недавно стало возможным проводить солнечные наблюдения в суб-терагерцовом (0.3–3 мм) диапазоне электромагнитного спектра на частотах 100–1000 ГГц [1]. Особый интерес представляет наличие суб-терагерцовой (суб-ТГц) вспышечной компоненты, сопровождаемой увеличением потока излучения с частотой, т.е. положительным наклоном спектра. В работе [2] был проведен статистический анализ суб-ТГц событий, который убедительно показал, что вопрос о механизмах в исследуемом диапазоне до сих пор остается открытым.

Другим немаловажным вопросом является проблема нагрева и передачи энергии ускоренных частиц в плотные слои атмосферы. В частности,

рентгеновские источники перед импульсной фазой вспышки могут располагаться в основаниях корональных петель, а их температура достигает 10–15 МК [3]. С другой стороны, суб-ТГц излучение связано с рентгеновским излучением [4], а за его генерацию может быть ответственна тепловая плазма короны, переходной области и верхней хромосферы. Следовательно, источник нагрева хромосферной плазмы может быть связан с ускоренными электронами, тепловыми потоками, ударными волнами, либо с энерговыделением *in situ*. Таким образом, целью данной работы является на примере вспышечного события 2022/03/28 (рис. 1) исследовать вклад корональной вспышечной плазмы и ускоренных электронов в генерацию суб-ТГц излучения, а также выяснить природу нагрева переходной области и верхней хромосферы Солнца, в первую очередь, на начальной фазе солнечной вспышки.

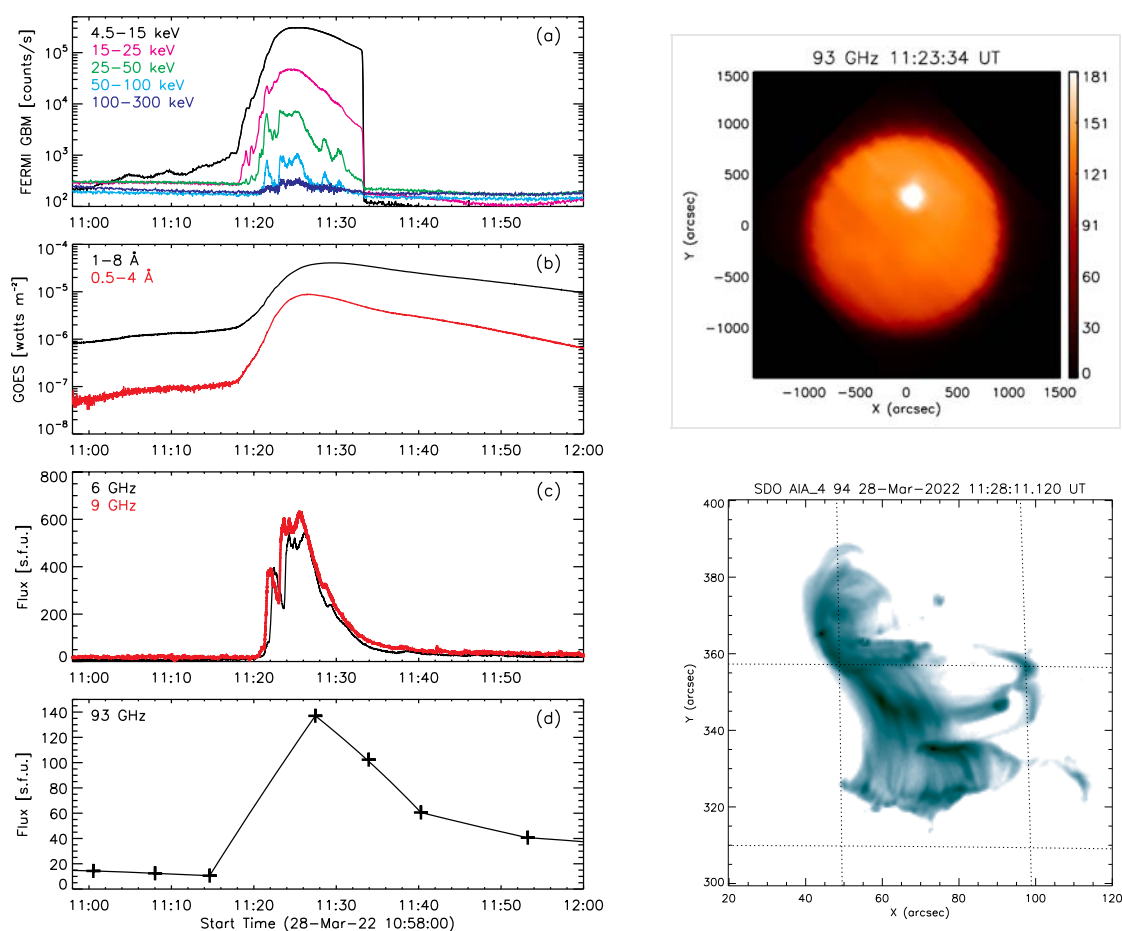


Рис. 1. Слева: временные профили солнечной вспышки 28/03/2022 в рентгеновском (а), (b), микроволновом (с) и суб-ТГц (d) диапазонах. Справа: карты солнечной вспышки 28/03/2022 – на частоте 93 ГГц (сверху), на длине волны 94 Å (снизу).

Анализ данных

Для выполнения поставленной задачи были проанализированы данные крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ), зарегистрированного с

помощью AIA/SDO, и рентгеновского (РИ) излучения по данным GBM/FERMI, которые позволяют получить информацию о тепловой вспышечной плазме и нетепловых ускоренных электронах. Также для более детального анализа вспышки 28/03/2022 использовались данные Кисловодской Горной астрономической станции (6 и 9 ГГц) и радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана (93 ГГц) (рис. 1).

Таким образом, с помощью AIA/SDO данных было проведено восстановление дифференциальной меры эмиссии (DEM, рис. 2) вспышечной плазмы вдоль луча зрения:

$$\phi(T) = n^2 \frac{dl}{dT}, \quad (1)$$

где n – концентрация тепловых электронов, l – размер источника вдоль луча зрения в диапазоне температур $T = 0.5 - 32$ МК, с помощью метода регуляризации Тихонова [5, 6] для двух временных интервалов, соответствующих начальной фазе (11:00:00–11:00:12 UT) и фазе максимума (11:28:00–11:28:12 UT) миллиметрового всплеска.

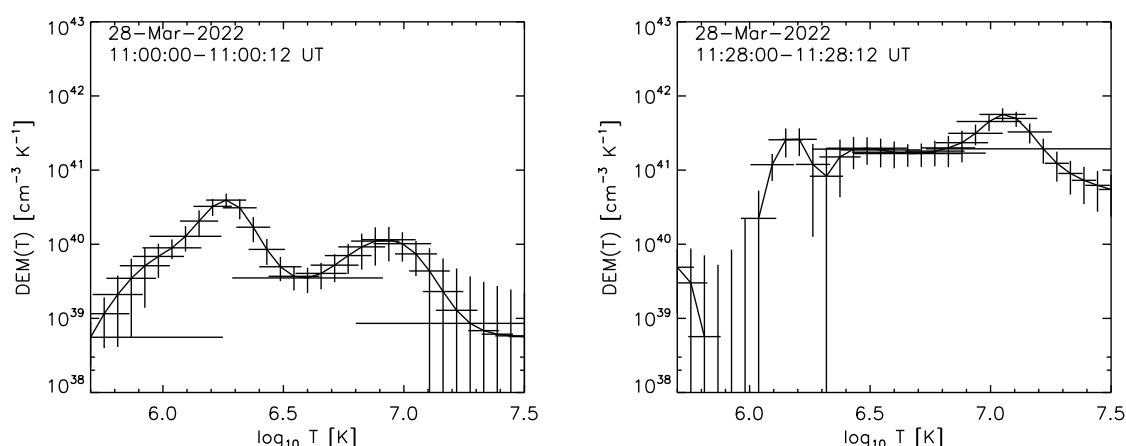


Рис. 2. Дифференциальная мера эмиссии солнечной вспышки 28/03/2022 для моментов времени 11:00:00–11:00:12 UT (слева) и 11:28:00–11:28:12 UT (справа).

На основе полученных распределений $\phi(T)$ был выполнен расчет миллиметрового излучения, используя известные соотношения для интегральной яркостной температуры и наблюдаемого потока теплового тормозного излучения [7, 8]. Площадь теплового источника $S = 7.8 \times 10^{18} \text{ см}^2$, ограниченная уровнем 50% от максимума интенсивности, определялась по КУФ картам во временном интервале 11:28:00–11:28:12 UT. В результате, были получены расчетные потоки на частоте 93 ГГц: 1.5 с.е.п. (11:00 UT) и 45 с.е.п. (11:28 UT), которые оказались явно заниженными, поскольку наблюдаемые значения равны 20 ± 5 и 125 ± 31 с.е.п. соответственно. Следовательно, вклад оптически тонкой вспышечной плазмы с температурой $0.5 \text{ МК} \leq T \leq 32 \text{ МК}$ в миллиметровое излучение пренебрежимо мал, и суб-

ТГц компонента генерируется более холодной плазмой из области соответствующей хромосфере.

Чтобы оценить вклад ускоренных электронов в наблюдаемое суб-ТГц излучение солнечной вспышки 28/03/2022, нами было произведено фитирование рентгеновских спектров для моментов времени 11:00:00–11:00:12 UT и 11:28:00–11:28:12 UT. Для фазы максимума были получены следующие параметры: $EM = 3.9 \times 10^{48} \text{ см}^{-3}$, $T = 17.1 \text{ МК}$, $F = 8.57 \times 10^{35} \text{ электроны/с}$, $\delta = 7.86$, $E_c = 18.57 \text{ кэВ}$. Так как показатель спектра ускоренных электронов ($\delta = 7.86$) большой, то вклад ускоренных электронов даже на фазе максимума в нагрев, в первую очередь, хромосферы должен быть незначителен [9].

Обсуждение результатов и выводы

Проведен анализ рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечной вспышки 28/03/2022, имеющей суб-ТГц излучение. Оценен вклад корональной вспышечной плазмы и ускоренных электронов в генерацию суб-ТГц излучения в начальной фазе и около максимума суб-ТГц излучения. Показано, что вспышечная корональная плазма вносит несущественный вклад в наблюдаемое миллиметровое излучение на частоте 93 ГГц. Параметры нетепловых электронов, а именно мягкий степенной спектр, отсутствие на начальной фазе вспышки наблюдаемого жесткого рентгеновского и микроволнового излучения свидетельствует о незначительном вкладе ускоренных электронов в нагрев хромосферной плазмы. Мы предполагаем, что нагрев вспышечной хромосферы скорее происходил *in situ* в результате джоулевой диссипации электрических токов [10].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ No.20-52-26006, РНФ No.22-12-00308, РНФ No.20-72-10158 и Минобрнауки (НИР No. 1021051101548-7-1.3.8; 075-03-2022-119/1).

Литература

1. Kaufmann P. et al. // ApJ, 2001, V. 548, L95.
2. Kontar E.P. et al. // A&A, 2018, V. 620, id. A95, 6 p.
3. Hudson H. et al. // MNRAS, 2021, V. 501, pp.1273-1281.
4. Kaufmann P. et al. // ApJ, 2009, V. 697, 420.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 286 с.
6. Hannah I.G. & Kontar E.P. // A&A, 2012, V. 539, id. A146, 14 p.
7. Tsap Yu.T. et al. // ASR, 2016, V. 57, I.7, pp. 1449-1455.
8. Dulk G.A. // Annual review of A&A., 1985, V. 23, 169 p.
9. Цан Ю.Т. Дис. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н., Крым, СПб, 2008, 280 с.
10. Stepanov A.V. & Zaitsev V.V. // Ge&Ae, 2016, V. 56, I.8, pp. 952-971.