О ТЕПЛОВОЙ ПРИРОДЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 2 АПРЕЛЯ 2017

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

¹ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

²НИРФИ ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³КрАО РАН, Научный, Крым, Россия

⁴Университет Турку, Турку, Финляндия

⁵ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

ON THE THERMAL NATURE OF MILLIMETER EMISSION FROM THE 2 APRIL 2017 SOLAR FLARE

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

¹Pulkovo Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia

²Radiophysical Research Institute of Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russia

³Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia

⁴University of Turku, Turku, FI20014 Finland

⁵Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Analysis of millimeter (93 and 140 GHz) emission, obtained by the RT-7.5 radio telescope of the Moscow State Technical University, from the 2 April 2017 solar flare (M 6.4 X-ray class) was carried out using of the Radio Solar Telescopes Network (RSTN, 4.9, 8.8 and 15.4 GHz) and space instruments: SDO/AIA (EUV), GOES (soft X-ray), RHESSI, and Konus-Wind (hard X-ray). It is founded, that the spectral flux density is growing with the frequency during a flare. Similarity of millimeter and soft X-ray time profiles shows evidence in favor of the thermal nature of millimeter emission. Numerical calculations of the free-free emission based on the fitting of EUV and soft X-ray spectrums, suggests the negligible contribution of coronal plasma to the microwave spectrum. The thermal emission from the chromosphere model proposed by Machado et.al. (1980) lead to several times lower millimeter fluxes than observed ones. Implications of obtained results are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-295-298

Суб-терагерцовые (0.1–1 ТГц) радионаблюдения позволяют диагностировать наиболее труднодоступную область для исследователей Солнца – вспышечную хромосферную плазму. В последнее время все больший интерес вызывает необычное поведение спектрального потока суб-терагерцового (суб-ТГц) радиоизлучения F_ν солнечных вспышек, которое заключается в увеличении потока F_ν с частотой ν [1]. На наш взгляд, в ряде случаев его происхождение можно связать с тепловым тормозным механизмом излучения [2]. При этом, несмотря на возможный значительный вклад в излучение хромосферной вспышечной плазмы, детальных расчетов до сих пор детально не рассматривалось.

Цель настоящей работы – исследовать природу суб-ТГц излучения вспышки 02 апреля 2017 г. с положительным наклоном спектра, зарегистри-

стрированной с помощью радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частотах 93 и 140 ГГц.

Для решения поставленной задачи были привлечены наблюдения в рентгеновском, ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах, временные профили которых представлены на рис. 1. В первую очередь обращает на себя внимание, что спектральный поток излучения на 140 ГГц превышал поток на 93 ГГц на протяжении всей вспышки (рис. 1d). Микроволновое излучение по данным радиотелескопов службы RSTN (San Vito) на частотах 4.9, 8.8 и 15.4 ГГц имело ярко выраженные пики (рис. 1c), которые согласно наблюдениям на спутнике Конус-Винд [3] в диапазонах энергий 20–76, 76–302, 302–1143 кэВ также, хотя и довольно слабо, проявлялись в жестком рентгене (рис. 1b). Характер эволюции миллиметрового излучения скорее согласуется с мягким рентгеновским, полученным спутником GOES в каналах 1–8 и 0.5–4 А (рис. 1a), хотя суб-ТГц максимум наступает на несколько минут позже. Относительная гладкость миллиметрового профиля и отсутствие резких пиков, которые имеют место в микроволновом и жестком рентгеновском излучении говорят в пользу тепловой природы всплеска на частотах 93 и 140 ГГц. При этом источник миллиметрового излучения должен быть оптически толстым, чтобы обеспечить положительный наклон спектра на частотах выше 93 ГГц.

С помощью данных, полученных в крайнем ультрафиолетовом излучении (КУФ) на космическом аппарате SDO/AIA, методом регуляризации Тихонова [4] нами была рассчитана зависимость дифференциальной меры эмиссии 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, от температуры в диапазоне от $T_{min} = 3 \cdot 10^5$ К до $T_{max} = 3 \cdot 10^7$ К для двух временных интервалов, соответствующих фазам роста (08:02:07–08:02:14 UT) и спада (08:35:28–08:35:37 UT) миллиметрового всплеска. Восстановить дифференциальную меру эмиссии $\phi(T)$ в максимуме вспышки не удалось из-за насыщения детекторов AIA и, как следствие, засветки КУФ-карт.

Полученные значения $\phi(T)$ позволили нам рассчитать микроволновые спектры данной тепловой плазмы, используя известные соотношения для интегральной яркостной температуры и наблюдаемого потока теплового тормозного излучения [2, 5]. Площадь теплового источника $S = 1.3 \cdot 10^{18}$ см², ограниченная уровнем 50% от максимума интенсивности, определялась по картам мягкого рентгеновского излучения, полученным по данным спутника RHESSI, в диапазоне энергий 7–10 кэВ и временном интервале 07:56–07:57 UT. Таким образом, было установлено, что вклад оптически тонкой плазмы с температурой $T > 3 \cdot 10^5$ К в наблюдаемое миллиметровое излуче-

ние не превышает 3 с.е.п., т.е. является пренебрежимо малым. Следовательно, относительно горячая вспышечная плазма не может быть ответственна за наблюдаемый за миллиметровый всплеск.

Рис. 1.

Рис. 2.

В связи с этим было бы естественным предположить, что генерация излучения вспышки 2 апреля 2017 г. на частотах 93 и 140 ГГц определялась плазмой солнечной хромосферы и переходной области с температурой $T < 3 \cdot 10^5$ К. Для проверки этой гипотезы мы рассмотрели полуэмпирическую модель хромосферы Machado [6], разработанную на основе оптических наблюдений континуума и линий H I, Si I, C I, Ca II, Mg II ряда солнечных вспышек. На рис. 2 (верхняя и средняя панель) показаны распределения температуры и электронной концентрации по высоте для спокойного Солнца (сплошная линия) и моделей слабой (пунктирная линия) и сильной (штриховая линия) вспышек [6]. Вспышечную плазму отличает, в первую очередь, значительное увеличение концентрации электронов (на один – два порядка) по всей высоте. Обращает также на себя внимание уменьшение высоты оснований переходной области, а также несколько более высокая температура хромосферы по сравнению со спокойным Солнцем.

Используя гирорезонансный код Флейшмана и Кузнецова [7], мы провели расчет микроволнового спектра столба хромосферной плазмы с пара-

метрами, представленными на рис. 2, приняв, согласно рентгеновским данным, площадь $S = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Программа позволяет решать уравнение переноса для теплового тормозного излучения плазмы неоднородного вдоль луча зрения источника с учетом влияния нейтральных атомов.

На рис. 2 (снизу) сплошной линией показан микроволновый спектр излучения для спокойного Солнца, пунктирной – для модели слабой вспышки, штриховой – для сильной. Видно, что в случае модели слабой вспышки потоки в миллиметровом диапазоне увеличиваются лишь в несколько раз относительно фоновых значений. Для модели же сильной – они увеличиваются более чем на порядок по сравнению с уровнем спокойного Солнца, составляя 20 и 30 с.е.п. на частотах 93 и 140 ГГц соответственно. Хотя в миллиметровом диапазоне и формируется положительный наклон спектра, примерно совпадающий с наблюдаемым в момент максимума всплеска, однако значения потоков оказываются в несколько раз меньше требуемых величин. Предположение о большей (в 3–5 раз) площади суб-ТГц источника, хотя и решает проблему малых значений спектральных потоков, тем не менее, оно накладывает серьезные ограничения на поведение временных профилей излучения в разных диапазонах [8]. Необходимо также отметить, что ранее при проведении наблюдений на РТ-7.5 солнечной вспышки 4 июля 2012 рентгеновского класса М 5.3 был также зафиксирован длительный миллиметровый всплеск с положительным наклоном спектра [2], а потоки в максимуме вспышки рентгеновского класса М на 93 и 140 ГГц составляли соответственно 20 и 30 с.е.п., что хорошо согласуется с моделью вспышечной хромосферы и переходного слоя [6], но только для случая сильной вспышки. На наш взгляд, данное противоречие и полученные в работе результаты свидетельствуют, что обнаруженное несоответствие, вероятно, связано с дополнительным вкладом переходной области в миллиметровое излучение, что требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке грантов: РНФ 16-12-10448 (Смирнова В.В.), РФФИ 18-02-00856 А (Цап Ю.Т.), программами ПРАН П-28 и научной школы НШ-7241.2016.2 (Моторина Г.Г.) и финансовой поддержке Минобрнауки (госзадание № 3.2722.2017/4.6) (Моргачев А.С.).

Литература

1. *Krucker S., et al. // A&A Rev.*, 2013, V. 21. № 1. ID 58.
2. *Tsap Yu.T., et al. // ASR.*, 2016, V. 56. N. 7. p. 1449.
3. *Aptekar R.L., et al. // Space Science Reviews.*, 1995, V. 71. № 1-4. P. 265.
4. *Hannah I.G. & Kontar E.P. // A&A.*, 2012, V. 539. ID. A146. P. 14.
5. *Dulk G.A. // Annual review of A&A.*, 1985, V. 23. P. 169.
6. *Machado M.E., et al. // ApJ*, 1980, V. 242. № 15. P. 336.
7. *Fleishman G.D. and Kuznetsov A.A. // ApJ.*, 2014, V. 781. Issue 2, P. 16.
8. *Tsap Yu.T., et al. // SoPhys*, 2018, V. 293. Issue 3, ID. 50. P. 15.