ХРОМОСФЕРНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ И СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

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

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия*

²*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*

³*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic*

CROMOSPHERIC CONDENSATION AND SUB-TERAHETZ EMISSION FROM SOLAR FLARES

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

¹*Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia*

³*Pulkovo Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia*

⁴*Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic*

On the basis of F-CHROMA solar flare model database (<https://www.fchroma.org>) the temporal evolution of thermal bremsstrahlung in the sub-terahertz frequency range (at 93 and 140 GHz) from the flare chromosphere and transition region is calculated. The model is based on RADYN numerical code, which describes the response of chromospheric background plasma to the action of a beam of accelerated electrons in the form of a triangular pulse. It has been shown that the positive slope of the spectrum in the 93-400 GHz frequency range during the entire burst is formed. The time profile of the sub-THz emission is quite complex and has several maxima due to gas-dynamic phenomena. The region of low temperature and high plasma density (so-called chromospheric condensation) appears and moves to the region of high altitudes from the 6th to 11th second and then disappears. It determines a complex temporal profile of sub-THz emission which can be used for flare plasma diagnostics.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-221-224

Введение

Вопрос о происхождении оптического излучения солнечных и звездных вспышек все еще остается открытым. До сих пор неясно, каким образом происходит нагрев и передача энергии ускоренных частиц в плотные слои атмосферы. В частности, в солнечную фотосферу могут проникнуть только такие электроны, энергия которых превышает сотни кэВ. Однако, принимая во внимание степенной спектр электронов, а также полагая нижнюю пороговую энергию равной 10–20 кэВ, нетрудно прийти к выводу, что на долю таких частиц приходится пренебрежимо малая часть энергии вспышки.

Решение этой проблемы может быть связано с излучением хромосферной конденсации, образующейся в результате газодинамических яв-

лений [1–3]. В частности, около 40 лет назад в работе [2] на основе численных расчетов было показано, что поток электронов с плотностью энергии 10^{12} эрг см^{-2} с^{-1} приводит к формированию солнечной хромосферной конденсации толщиной несколько десятков км, движущейся вниз со скоростью ~ 10 км/с. При этом образование плотной ($\sim 10^{15}$ см^{-3}) и холодной ($\sim 10^4$ К) конденсации сопровождается испарением хромосферного вещества с температурой, превышающей миллионы градусов. В настоящее время эти два явления рассматриваются как два фундаментальных процесса вспышечного энерговыделения.

Вплоть до последнего времени исследование свойств хромосферных конденсаций ограничивалось ближним ультрафиолетовым и оптическим диапазоном. В хромосферных линиях, и, прежде всего, в линии H α , они проявляются в виде асимметрии красного крыла линий. Между тем, поскольку вклад в излучение может вносить не только хромосферная конденсация, но окружающая ее плазма, то это существенно затрудняет проведение диагностики этого газодинамического образования. На наш взгляд, именно наблюдения вспышечного суб-ТГц излучения солнечных и звездных вспышек с положительным наклоном спектра, за которое ответственна тепловая плазма [4], позволяют получить важную информацию о свойствах хромосферной конденсации. Изучению этого вопроса и посвящена настоящая работа.

Моделирование суб-ТГц радиоизлучения

Нами был выполнен расчет теплового тормозного излучения в суб-терагерцовом диапазоне для одномерных моделей вспышечной хромосферы и переходной области, полученных на основе численного решения системы нелинейных уравнений газодинамики и переноса излучения в не-ЛТР приближении с помощью программного кода RADYN [5]. В качестве рабочей была выбрана модель №27 вспышечной хромосферы и переходной области, полученная в рамках международного проекта F-CHROMA (<https://www.fchroma.org>). Модель описывает отклик невозмущенной солнечной атмосферы типа VAL-C [6] на поток высокоэнергичных нетепловых электронов со степенным энергетическим спектром δ в виде импульса треугольной формы длительностью 20 сек (рис. 1, правая нижняя панель). В данной модели спектральный индекс $\delta = 5$, нижняя граница энергии ускоренных электронов $E_c = 15$ кэВ и их полный поток $F_e = 3 \times 10^{11}$ [эрг $\times$ $\text{с}^{-1} \times \text{см}^{-2}$].

Используя модельные высотные зависимости температуры и концентрации плазмы в каждый момент времени, были рассчитаны высотное распределение потока теплового тормозного излучения на частотах 93 и 140 ГГц, временной профиль полного потока излучения модели, а также функция вклада источника (рис.1), используя методику, описанную в работе [7].

а)

б)

Рис. 1. Левая панель: высотное распределение потока излучения $F(h)$, температуры и концентрации электронов плазмы модельной атмосферы, функции вклада $CF(h)$ источника излучения на частотах 93 (сплошная линия) и 140 ГГц (штриховая линия) в моменты времени $t = 8.5$ с (а) и $t = 11$ с (б). Правая панель: временные профили суб-ТГц излучения на частотах 93 и 140 ГГц и функция инъекции электронов. Вертикальная сплошная линия определяет соответствующие моменты времени, принятые на левой панели.

На рис. 1 (левая панель) представлены результаты расчетов для двух моментов времени $t = 8.5, 11$ с. На высотных профилях можно видеть два ярко выраженных всплеска («антивсплеска») по плотности и температуре, которые соответствуют хромосферным конденсациям. Наиболее интересной особенностью этих образований является то, что они медленно движутся вверх и, как показывают обстоятельные расчеты, вклад конденсаций толщиной всего в несколько десятков километров в суб-ТГц излучение на частотах 93 и 140 ГГц в соответствующие моменты времени является определяющим (см. на рис.1 график высотного распределения потока излучения $F(h)$ и функции вклада CF).

Обсуждение результатов и выводы

Как следует из расчетов, временной профиль модельного суб-ТГц излучения, в отличие от профиля импульса инжектируемых электронов, имеет два выраженных пика (рис. 1 справа), что связано с неоднородностью плазмы хромосферы и переходной области. При этом максимум суб-ТГц всплеска наступает раньше максимума функции инъекции. Наклон спектра на протяжении всего промежутка времени, длительностью 50 сек, оставался положительным. Образование и релаксация хромосферных конденсаций, характеризующихся пониженной температурой и повышенной плотностью плазмы, сопровождалась существенными изменениями временных профилей суб-ТГц излучения, что, на наш взгляд, может быть использовано для диагностики этих плазменных образований. Это также предполагает заметные различия в поведении временных профилей суб-ТГц и жесткого рентгеновского излучения в пределах десятков секунд, что хорошо согласуется с наблюдениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-72-10158 (ГМ) и Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006) (ЮЦ, ВС).

Литература

1. Kostiuk N.D., Pikelner S.B. // Soviet Astron., 1975, 18, 590.
2. Livshits, M.A., Badalian, O.G., Kosovichev, A.G., Katsova, M.M. // Solar Phys., 1981, 73, 269.
3. Kowalski A. F., Allred J.C. // ApJ, 218, 852, 61.
4. Kontar, E.P., Motorina, G.G., and Jeffrey, N.L.S., et al. // Astron. Astrophys., 2018, 620, id A95.
5. Allred J.C., Kowalski A.F., Carlsson M. // Astrophys. J. V. 809. ID. 104. 2015.
6. Vernazza, J.E., Avrett, E., Loeser, R. // Astrophys. J. Suppl. Ser., 1981, vol. 45, pp. 635–725.
7. Morgachev A.S., Yu.T. Tsap, V.V. Smirnova, et al. // Ge&Ae, in press.