

ДИАГНОСТИКА ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ ДЕЦИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СЛАБОГО ТРАНЗИЕНТНОГО СОБЫТИЯ 16 МАРТА 2023 Г.

Кудрявцев И.В.¹, Овчинникова Н.Е.², Кальтман Т.И.²

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский филиал Специальной Астрофизической Обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

DIAGNOSTICS OF LANGMUIR TURBULENCE BASED ON DECIMETER EMISSION OF A WEAK TRANSIENT EVENT ON MARCH 16, 2023

Kudryavtsev I.V.¹, Ovchinnikova N.E.², Kaltman T.I.²

¹*Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg Branch of the Special Astrophysical Observatory of the RAS,
St. Petersburg, Russia*

The results of the analysis of a solar radio burst based on observations from the RATAN-600 in the 1–3 GHz range with high spectral resolution are presented. It is suggested that energy release in the region of bright coronal points was caused by magnetic reconnection, accompanied by electron acceleration and the development of plasma turbulence. In this paper, the radio emission of the burst is considered as the result of the merging of plasma waves, forming transverse electromagnetic waves observed on RATAN-600. Plasma wave spectra for different moments were obtained, allowing for the simulation of the measured radio burst emission spectra.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-193-196>

Введение

Корональные яркие точки (CBPs, см. [1]) с усиленным излучением в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах представляют собой систему маломасштабных петель в низкой короне.

Радионаблюдения CBPs являются важным инструментом для изучения процессов нагрева короны, ускорения частиц и динамики магнитных полей в маломасштабных структурах Солнца. Они дополняют данные, полученные в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, и помогают исследовать такие важные вопросы солнечной физики, как корональный нагрев и энергия, выделяемая в CBPs.

В работе исследуется транзитное событие, связанное с CBP, в дециметровом диапазоне по наблюдениям на РАТАН-600.

Наблюдения

16 марта 2023 года на РАТАН-600 были проведены наблюдения Солнца с использованием спектрополяриметрического комплекса диапазонов 1–3 ГГц [2] в двух поляризациях с разрешением 4 МГц и временным

разрешением 8 мс. В диапазоне 1–1.5 ГГц были зарегистрированы импульсы радиоизлучения J-формы длительностью 0.5 с и шириной 200–300 МГц. Эти импульсы совпали по времени с динамическим развитием CBPs, зафиксированных инструментом AIA на борту SDO. В предположении о плазменном механизме излучения было проведено следующее моделирование.

Моделирование

Солнечное радиоизлучение в области двойной плазменной частоты, как известно, может образовываться при слиянии ленгмюровских волн (см., например [2–5]). Это излучение характеризуется своим частотным спектром [6–8] и направленностью [9], которые зависят от спектров ленгмюровских волн и их углового распределения.

Спектральная мощность радиоизлучения, генерируемого этим механизмом, в неоднородной плазме объёмом V может быть записана в виде

$$P_{\omega}(\omega, \vartheta, \varphi) = \int_V Q_{\omega}(\vec{r}, \omega, \vartheta, \varphi) dV, \quad (1)$$

где ϑ и φ – полярный и азимутальный угол волнового вектора электромагнитной волны $\mathbf{k}$; Q_{ω} – спектральная плотность энергии, излучаемая единицей объёма плазмы, которая связана со спектральной мощностью излучения по волновому числу Q_k для различных направлений генерации излучения следующим соотношением (см., например, аналогичную формулу для изотропного случая в [10], а также [6]):

$$Q_{\omega} = k^2 Q_{\vec{k}} \frac{dk}{d\omega}, \text{ где согласно [10] } Q_{\vec{k}} = \int Q_{\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2} \cdot W_{\vec{k}_1}^l(\vec{r}) \cdot W_{\vec{k}_2}^l(\vec{r}) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2. \quad (2)$$

Выражение для $Q_{\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2}$ приведено в работе [10], $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$ – волновые вектора двух ленгмюровских волн.

Плотность энергии плазменных волн определяется выражением:

$$W = \int W_{\vec{k}_1}^l d\vec{k}_1. \quad (3)$$

Из выражений (2) следует, что спектр радиоизлучения, генерируемого при слиянии ленгмюровских плазмонов, будет зависеть от спектра ленгмюровских волн, что детально рассмотрено в работах [7, 8]. На рисунке (а-с) приведены спектры радиосплеска после вычитания фонового излучения для трех различных последовательных моментов времени и соответствующие модельные спектры. При этом спектр ленгмюровских волн задавался в виде:

$$W_{\vec{k}_{1,2}}^l = \begin{cases} A \cdot F(k) \cdot \cos^4(\vartheta) & \text{для } k_{\min} \leq k_{1,2} \leq k_{\max} \\ 0 & \text{для других } k_{1,2} \end{cases}, \quad (4)$$

где A – нормировочный множитель.

Спектры плазменных волн для двух первых моментов времени (рисунки а, б) могут быть описаны выражением:

$$F(k) = \begin{cases} (k_0/k)^\gamma ((k - k_{\min})/(k_0 - k_{\min}))^{\delta_1} & \text{для } k_{\min} \leq k \leq k_0 \\ \frac{(k_0/k)^{\delta_2} - (k_0/k_{\max})^{\delta_2}}{1 - (k_0/k_{\max})^{\delta_2}} & \text{для } k_0 \leq k \leq k_{\max} \\ 0 & \text{для других } k \end{cases} \quad (5)$$

Для спектра, представленного на рисунке а, $\delta_1 = 0.7$; $\delta_2 = 0.25$; $\gamma = 1$, при этом если $F(k) > 0.75$ согласно (5), то $F(k) = 0.75$. Для спектра б – $\delta_1 = 1$; $\delta_2 = 0.5$; $\gamma = 1$.

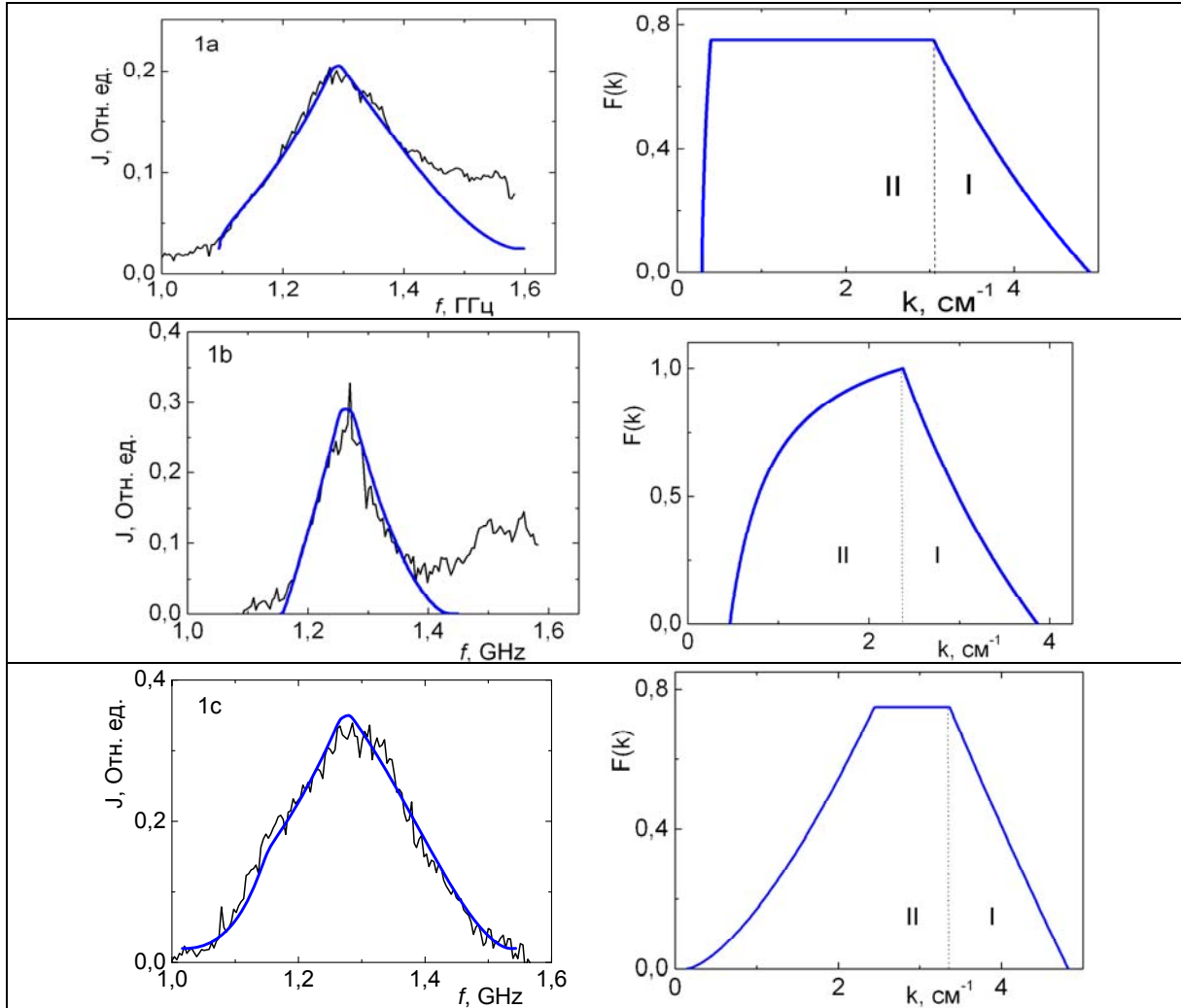


Рисунок. Измеренные и модельные спектры радиоизлучения (левая панель), и спектры ленгмюровских волн (справа). При $T^e = 10^6 K$ для угла наблюдения 90° (см., [7, 8]).
 1а – $n_e = 3.7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $k_{\min} = \omega_e/(30V_{Te})$; $k_{\max} = \omega_e/(1.8V_{Te})$; $k_0 = \omega_e/(3.35V_{Te})$;
 1б – $n_e = 4.1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $k_{\min} = \omega_e/(20V_{Te})$; $k_{\max} = \omega_e/(2.4V_{Te})$; $k_0 = \omega_e/(3.9V_{Te})$;
 1с – $n_e = 3.2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $k_{\min} = \omega_e/(60V_{Te})$; $k_{\max} = \omega_e/(1.7V_{Te})$; $k_0 = \omega_e/(2.8V_{Te})$.

Для третьего момента времени спектр ленгмюровских волн можно описать функцией при $\delta_1 = 1.5$; $\delta_2 = 0.6$ при

$$F(k) = \begin{cases} ((k - k_{\min})/(k_0 - k_{\min}))^{\delta_1} & \text{для } k_{\min} \leq k \leq k_0 \\ \frac{1 - (k/k_{\max})^{\delta_2}}{1 - (k_0/k_{\max})^{\delta_2}} & \text{для } k_0 \leq k \leq k_{\max} \\ 0 & \text{для других } k \end{cases}, \quad (6)$$

при этом, если $F(k) > 0.75$ согласно (6), то $F(k) = 0.75$.

На спектрах ленгмюровских волн можно выделить область I, которую можно интерпретировать как область генерации этих волн, и область II, которая сформирована при нелинейной перекачке волн в область малых волновых чисел при индуцированном рассеянии на частицах плазмы.

Выводы

1) Изучение спектров радиоизлучения в области второй плазменной частоты позволяет диагностировать плазменную турбулентность излучающей области. Для события 16 марта 2023 г. найдены значения концентрации электронов плазмы и спектры плазменных волн, позволяющие описать измеренные спектры радиоволн.

2) Нелинейное рассеяние ленгмюровских волн приводит к перекачке волн в область малых волновых чисел, что подтверждено моделированием спектров плазменных и электромагнитных волн.

3) Уникальное сочетание высокой чувствительности, высокого спектрального и временного разрешений дециметрового комплекса РАТАН-600 позволяет детально исследовать динамику солнечной атмосферы и процессы ускорения частиц, включая слабые всплески и тонкие структуры в радиоизлучении.

Благодарности

Авторы благодарят А.М. Рипака, В.М. Богода, и М.К. Лебедева за возможность использования новых данных, получаемых с помощью радиометра дециметрового диапазона высокого разрешения.

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Литература

1. *Madjarska M.S.* // *Liv. Rev. in Sol. Phys.*, 2019, V.16, I.1, article id. 2, 79 pp.
2. *Рипак А.М. и др.* // *Астрофизический Бюллетень*, 2023, Т. 78, с. 657.
3. *Гинзбург В.Л. и Железняков В.В.* // *Астрон. Журнал*, 1958, Т.35. С.694.
4. *Железняков В.В., Зайцев В.В.* // *Астрон. Журнал*. 1970. Т. 47. С.60.
5. *Каплан С.А., Цытович В.Н.* *Плазменная Астрофизика*. – М.: Наука. 1972. – 440 с.
6. *Willes A.J. et al.* // *Physics of Plasmas*. 1996, V.3. P. 149.
7. *Kudryavtsev I.V., Kaltman T.I., and M. Karlický* // *A&A*, 2022, 665, A98.
8. *Kudryavtsev I.V. and Kaltman T.I.* // *MNRAS*, 2021, V. 503, P. 5740–5745.
9. *Kudryavtsev I.V. and Kaltman T.I.* // *G&A*, 2020, V. 60, № 8, P. 1122–1125.
10. *Цытович В.Н.* *Теория турбулентной плазмы*. – М.: Атомиздат, 1971. – 424 с.