**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЦА НА ДВОЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЕ В РАМКАХ
ПЛАЗМЕННОГО МЕХАНИЗМА ПРИ ИНЖЕКЦИИ
ВО ВСПЫШЕЧНУЮ ПЕТЛЮ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Кудрявцев И.В.¹, Кальтман Т.И.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²СПбф САО РАН, Санкт-Петербург, Россия

**THE PECULIARITIES OF THE MODELING OF THE SOLAR RADIO
EMISSION ON THE DOUBLE PLASMA FREQUENCY IN THE
FRAMEWORK OF THE PLASMA MECHANISM FOR THE INJEC-
TION OF FAST ELECTRONS IN THE FLARE LOOP**

Kudryavtsev I.V.¹, Kaltman T.I.²

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²SPb branch of SAO RAS, St. Petersburg, Russia

Traditionally, consideration of the self-consistent problem of the evolution of the electron distribution function and of the energy density of Langmuir turbulence during the propagation of accelerated electrons in the flare plasma occurs within a one-dimensional approximation. That is, it is assumed that all the electrons of the beam have the same direction throughout the propagation process and the generation of Langmuir waves occurs strictly in the direction of the electron beam. However, adequate description of generation of radio emission during solar flares at the confluence of Langmuir plasmons requires the rejection of the 1D model. Radio emission cannot be generated within the framework of one-dimensional turbulence. First, it is necessary to consider the generation of plasma waves as a result of the development of beam instability at different angles satisfying the resonance condition. Secondly, it is necessary to take into account the mechanisms leading to the appearance of waves with wave vectors of different directions (not only in the direction of movement of electrons or against it). Such mechanisms are, for example, the scattering of plasma waves by electrons and by ions of the flare plasma.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-255-258

В этой работе мы рассматриваем современное состояние моделирования взаимодействия ускоренных во вспышках электронов с плазменной турбулентностью, отмечаем недостатки такого моделирования для расчета радиоизлучения на двойной плазменной частоте (ω_{pe}) в рамках плазменного механизма и предлагаем возможные дальнейшие направления исследования.

Как известно, радиоизлучение солнечных вспышек несет информацию о процессах ускорения и распространения заряженных частиц в солнечной плазме. Это излучение может относиться к магнитормозному (синхротронному или гиротронному), когда излучение генерируется заряженной частицей, движущейся в магнитном поле (см., например, [1]). Ра-

диоизлучение может генерироваться и плазменной турбулентностью (см. например [2]), так, при слиянии двух ленгмюровских плазмонов может генерироваться поперечная электромагнитная волна на двойной плазменной частоте $2\omega_{pe}$, где $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n / m_e}$; e , n , m_e – заряд, концентрация и масса электрона. Обычно рассматривается образование ленгмюровских волн в результате пучковой неустойчивости ускоренных во вспышках электронов.

Традиционно рассмотрение самосогласованной задачи об эволюции функции распределения электронов и плотности энергии ленгмюровской турбулентности при распространении ускоренных во вспышках электронов во вспышечной плазме происходит в рамках одномерного приближения. В этом приближении рассмотрен хорошо известный случай квазилинейной релаксации пучка электронов. Рассмотрение динамики быстрых электронов (см., например, [2–4]) опирается на систему следующих дифференциальных уравнений для функции распределения электронов f и плотности энергии ленгмюровских волн W_k :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{4\pi^2 e^2}{m^2} \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{W(k = \omega_{pe}/v)}{v} \frac{\partial f}{\partial v} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_k}{\partial t} = \left(\frac{\pi \omega_{pe}}{n_e} v^2 \frac{\partial f}{\partial v} \right)_{v=\omega_{pe}/k} W_k. \quad (2)$$

При этом, как отмечено в работе [2], условие применимости данной системы уравнений предполагает использование одномерного приближения, т.е. делается допущение, что все электроны пучка имеют одно направление на протяжении всего процесса распространения и генерация ленгмюровских волн происходит строго в направлении движения пучка электронов.

В последнее время появился ряд работ (например [4, 5]) посвященных самосогласованному численному решению различных задач кинетики ускоренных электронов и динамики плазменной турбулентности. В основе рассмотрения лежит данная система уравнений с добавленными слагаемыми, учитывающими различные плазменные процессы. К таким процессам относятся: кулоновские столкновения быстрых электронов с частицами плазмы, взаимодействие ленгмюровских волн с ионно-звуковыми, индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на ионах плазмы, затухание ленгмюровских волн в результате кулоновских столкновений частиц плазмы. С использованием одномерного приближения был получен ряд интересных результатов. Особенно стоит отметить работу [4], где рассмотрена динамика быстрых электронов и ленгмюровской турбулентности в неоднородной плазме. В этой работе было показано, что взаимодействие с ленгмюровскими волнами в неоднородной плазме может приводить к пе-

пераспределению энергии быстрых электронов. При этом часть электронов отдаёт энергию плазменным волнам. Наличие неоднородности плазмы может приводить к трансформации спектра волн, появляются волны с большими фазовыми скоростями. Последние могут входить в резонанс с наиболее скоростными электронами, что приводит к дополнительному их ускорению [4]. Доля ускоренных электронов может быть достаточно большая для регистрации их рентгеновского излучения.

Однако, несмотря на все достигнутые успехи при рассмотрении динамики электронов и ленгмюровской турбулентности, применимость одномерной модели к описанию генерации радиоизлучения на частоте $2\omega_{pe}$ при слиянии ленгмюровских плазмонов представляется несколько устаревшей в настоящее время. Причина этого состоит в следующем.

Генерация радиоизлучения на двойной плазменной частоте в рамках плазменного механизма происходит при слиянии двух ленгмюровских плазмонов с образованием поперечной электромагнитной волны. При этом вероятность генерации электромагнитного кванта с волновым вектором $\vec{k}$ и частотой ω определяется выражением [2]

$$w_t^{||}(\vec{k}, \vec{k}_1, \vec{k}_2) = \frac{e^2 (2\pi)^6 (k_1^2 - k_2^2)^2 [\vec{k}_1 \vec{k}_2]^2}{32\pi m_e^2 \omega_{pe} k^2 k_1^2 k_2^2} \cdot \delta(\vec{k} - \vec{k}_1 - \vec{k}_2) \times \\ \times \delta(\omega - 2\omega_{pe} - \frac{3v_{Te}^2}{2\omega_{pe}} (k_1^2 + k_2^2)) \quad (3)$$

где $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$ – волновые вектора плазмонов.

Как легко видеть, эта формула определяет частоту излучения поперечной электромагнитной волны ω и её волновой вектор $\vec{k}$. Кроме этого, из данной формулы следует, что в случае одномерной турбулентности (вектора $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$ параллельны или антипараллельны) не происходит генерация электромагнитного излучения, так как

$$[\vec{k}_1 \vec{k}_2]^2 = k_1^2 k_2^2 \sin^2 \theta = 0, \quad (4)$$

где θ – угол между векторами $\vec{k}_1$ и $\vec{k}_2$.

Т.е., как следует из выражения (3), в рамках одномерной турбулентности невозможна генерация радиоизлучения ($w_t^{||} = 0$). Выражение аналогичное (3) приведено и в работе [6]. Однако это приближение используется в ряде случаев не только для изучения динамики ускоренных электронов, но и для изучения генерации электромагнитных волн в результате слияния ленгмюровских плазмонов. На наш взгляд, для адекватного описания генерации радиоизлучения на двойной плазменной частоте в результате слия-

ния ленгмюровских волн необходимо отказаться от использования одномерной модели.

Во-первых, необходимо рассматривать генерацию плазменных волн в результате развития пучковой неустойчивости под различными углами, удовлетворяющими условию резонанса. Выражение для инкремента неустойчивости приведено, например, в работе [6]. Во-вторых, в уравнении (2) необходимо учитывать механизмы, приводящие к появлению волн с волновыми векторами различных направлений (а не только по направлению движения электронов или против него). Такими механизмами являются рассеяние плазменных волн на электронах и ионах вспыхивающей плазмы (например, [2]). В работе [7] детально исследуется динамика изменения углового распределения ленгмюровских плазмонов при их индуцированном рассеянии на ионах окружающей плазмы. Показано, что данный процесс, хотя и не приводит к полной изотропизации волн, но существенно деформирует их угловое распределение. Индуцированное рассеяние на тепловых электронах также способствует изотропизации волн.

Таким образом, адекватное описание генерации радиоизлучения во время солнечных вспышек при слиянии ленгмюровских плазмонов требует отказ от 1D модели.

Работа Кальтман Т.И. поддержана Госзаданием №АААА-А17-117011810013-4; п.16.13.

Литература

1. Железняков В.В. Излучение в астрофизической плазме. Москва, «Янус-К», 1997.
2. В.Н. Цытович. Теория турбулентной плазмы – М.: Атомиздат, 1971.
3. Железняков В.В., Зайцев В.В. К теории всплесков солнечного радиоизлучения III типа // *Астрономический журнал*, 1970, 47, 60-75.
4. E.P. Kontar, H. Ratcliffe, and N.H. Bian. Wave-particle interactions in non-uniform plasma and the interpretation of hard X-ray spectra in solar flares // *A&A*, 2012, 539, A43.
5. Кудрявцев И.В., Чариков Ю.Е. Нелинейная релаксация электронного пучка и дополнительное ускорение быстрых электронов в солнечных вспышках // *Астрономический журнал*, 1999, 76, 464-469.
6. Melrose D.B. Instabilities in space and laboratory plasmas – Cambridge University press. 1986, 280 p.
7. Кудрявцев И.В. Динамика ленгмюровской турбулентности при рассеянии плазмонов на частицах фоновой плазмы / Сборник трудов XX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2016», С. 175-178.