

**ДИНАМИКА ЛЕНГМЮРОВСКИХ ВОЛН
ПРИ ИНДУЦИРОВАННОМ РАССЕЙАНИИ
НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНАХ И ИОНАХ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ.
АНИЗОТРОПНЫЙ СЛУЧАЙ**

Кудрявцев И.В., Ватагин П.В.

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

**THE LANGMUIR WAVES DYNAMICS UNDER INDUCED
SCATTERING ON THERMAL ELECTRONS AND IONS
OF SOLAR PLASMA. THE ANISOTROPIC CASE**

Kudryavtsev I.V., Vatagin P.V.

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

The time evolution of the spectral energy density of Langmuir waves in the case of induced scattering by thermal particles of solar plasma for the anisotropic case is considered. The results of numerical calculations are presented. It is shown, that the induced scattering of plasma waves result in not only to transfer the wave energy from waves with the big values of a wave vector k to waves with smaller values k , but also change of angular distribution of plasma waves. In this case, the full isotropization of Langmuir waves do not occur.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-169-172

Ленгмюровские волны играют важную роль при распространении в солнечной плазме электронов, ускоренных во время солнечных вспышек (например, [1]) и при генерации радио излучения в солнечной плазме [2–5]. Как известно, быстрые электроны при распространении в солнечной плазме возбуждают плазменные волны при развитии пучковой неустойчивости, и плотность энергии этих волн может достигать $(10^{-4}–10^{-3})W_T$, где W_T – плотность тепловой энергии плазмы. В работе [6] изучено индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на тепловых частицах плазмы в стационарном изотропном приближении и было показано, что такое рассеяние приводит к трансформации спектра ленгмюровских волн в область малых волновых чисел. Происходит "перекачка" энергии ленгмюровских волн из области больших волновых чисел k в область малых k . Рассмотрим динамику ленгмюровских волн при их индуцированном рассеянии на тепловых частицах плазмы при анизотропном распределении волн. Согласно [4, 7] будем использовать следующее уравнение для функции распределения ленгмюровских плазмонов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{\vec{k}}^l}{\partial t} = & N_{\vec{k}}^l \frac{3V_{Te}}{2m_e n \omega_{pe}} \int \frac{N_{\vec{k}_1}^l (\vec{k}\vec{k}_1)^2 [\vec{k}\vec{k}_1]^2 (k_1^2 - k^2)}{(2\pi)^{5/2} k^2 k_1^2 |\vec{k} - \vec{k}_1|^3} d\vec{k}_1 + \\ & + N_{\vec{k}}^l \frac{3\omega_{pe} T_e / T_i}{8n m_e V_{Ti} (1 + T_e / T_i)^2} \int \frac{N_{\vec{k}_1}^l (\vec{k}\vec{k}_1)^2 (k_1^2 - k^2)}{(2\pi)^{5/2} k^2 k_1^2 |\vec{k} - \vec{k}_1|} \exp\left(-\frac{\omega_-^2}{2k_-^2 V_{Ti}^2}\right) d\vec{k}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\omega_- = \omega_k - \omega_{k_1}$; $\vec{k}_- = \vec{k} - \vec{k}_1$; ω_k и $\vec{k}$ – частота и волновой вектор ленгмюровских волн, n – концентрация электронов плазмы, m_e – масса электрона, T_e и T_i – электронная и ионная температура плазмы, V_{Ti} и V_{Te} – тепловые скорости ионов и электронов плазмы.

Первое слагаемое правой части (1) описывает индуцированное рассеяние волн на тепловых электронах [7], а второе – на ионах [4]. Выражение для частоты ленгмюровской волны имеет вид

$$\omega_k^l = \sqrt{\omega_{pe}^2 + 3k^2 V_{Te}^2}. \quad (2)$$

Функция $N_{\vec{k}}^l$ связана с плотностью энергии волн W условием [4].

$$W = \int \frac{\omega_k^l N_{\vec{k}}^l}{(2\pi)^3} d\vec{k}. \quad (3)$$

Для расчетов будем использовать спектральную плотность энергии волн $W_{\vec{k}}$, введенную согласно выражению

$$W = \int W_{\vec{k}} d\vec{k}; \text{ тогда } W_{\vec{k}} = \frac{\omega_k^l N_{\vec{k}}^l}{(2\pi)^3}. \quad (4)$$

Уравнение (1) описывает изменение $W(t, \mathbf{k})$ на временах, много меньших времени кулоновских столкновений. Выберем начальное условие. Пусть в момент времени $t = 0$ ленгмюровские волны возбуждены в диапазоне волновых чисел $0 \leq k \leq k_{max}$, а при $k > k_{max}$ имеем $W(t, \mathbf{k}) = 0$. Тогда рассмотрим начальное условие в виде

$$W(t=0, \vec{k}) = A \cdot F(k) \cdot \chi(\theta, \varphi) \text{ и } F(k) = (k_{max} - k) \cdot k^2 \cdot \exp\left(-\frac{(k - k_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

где $\chi(\theta, \varphi)$ описывает угловое распределение ленгмюровских волн, θ и φ – полярный и азимутальный углы, θ – угол между вектором $\mathbf{k}$ и осью симметрии. A – нормировочный коэффициент, определяемый выражением

$$W(t=0) = \int W(t=0, \vec{k}) d\vec{k} = A \cdot \int_{k_{min}}^{k_{max}} F(k) k^2 dk \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \chi(\theta, \varphi) d\varphi \cdot \sin(\theta) d\theta. \quad (6)$$

Тогда

$$A = W(t=0) / \left(\int_{k_{min}}^{k_{max}} F(k) k^2 dk \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \chi(\theta, \varphi) d\varphi \cdot \sin(\theta) d\theta \right) \quad (7)$$

Рассмотрим случай осевой симметрии и будем считать, что максимум углового распределения плазменных волн достигается при $\theta = 0$, и выберем $\chi(\theta, \varphi)$ в виде

$$\chi(\theta, \varphi) = b + \cos^2 \theta, \quad \text{для } 0 \leq \theta \leq \pi/2, \\ \chi(\theta, \varphi) = b, \quad \text{для } \pi/2 < \theta \leq \pi \quad (8)$$

В качестве оси симметрии может быть выбрано направление распространения быстрых частиц возбуждающих ленгмюровские волны. Рассмотрим результаты расчетов для характерных для солнечной атмосферы значений концентрации электронов и температуры, а также при $C = 10^{-3}$, где

$$C = W / \left(\frac{3}{2} n k_B T_e \right). \quad (13)$$

На рис. 1–2 приведены результаты расчета при $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, $T_e = T_i = 5 \cdot 10^6 \text{ К}$, $\sigma = 0.1 k_{max}$, $k_{max} = \omega_{pe} / (2.5 V_{Te})$, $k_0 = 0.9 k_{max}$ и $b = 0.01$. Динамика спектральной плотности энергии ленгмюровских волн при $\theta = 0$ и $\theta = 180^\circ$ показана на рис. 1. Как видно из рисунков, при индуцированном рассеянии происходит «перекачка» энергии от волн с большими волновыми числами k к волнам с меньшими k . Этот эффект рассмотрен в работе [6] для изотропной плазмы. В анизотропном случае происходит угловое рассеяние волн, и появляются волны с $90^\circ < \theta < 180^\circ$. Появление плазменных волн с такими углами может приводить к нарушению условия резонанса с быстрыми электронами, которые обычно и возбуждают эти волны.

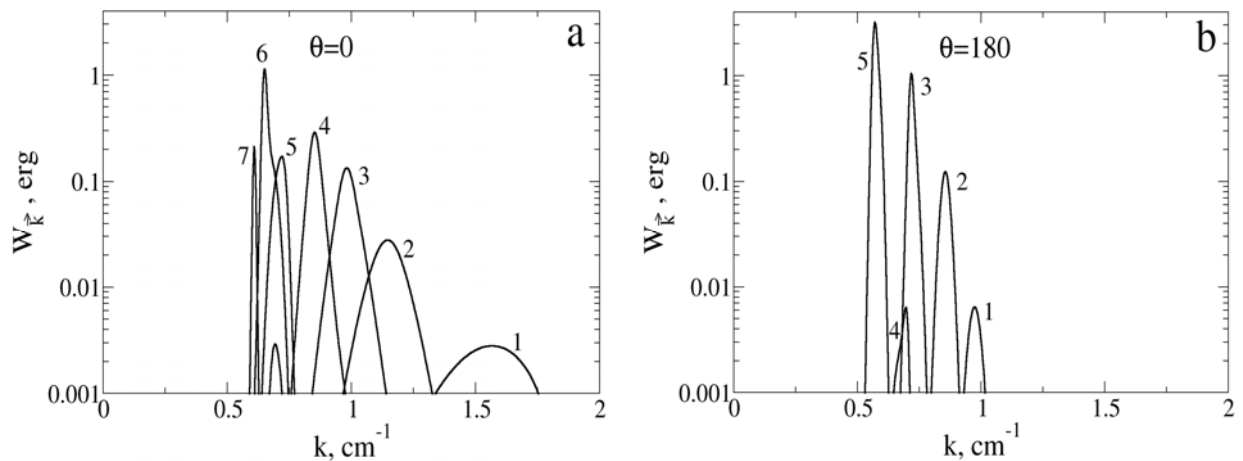


Рис. 1. Спектральная плотность энергии ленгмюровских волн для $\theta = 0$ (а): 1 – $t = 0 \text{ с}$, 2 – $t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, 3 – $t = 10^{-4} \text{ с}$, 4 – $t = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 5 – $t = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 6 – $t = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 7 – $t = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ и $\theta = 180^\circ$ (б): 1 – $t = 10^{-4} \text{ с}$, 2 – $t = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 3 – $t = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 4 – $t = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, 5 – $t = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

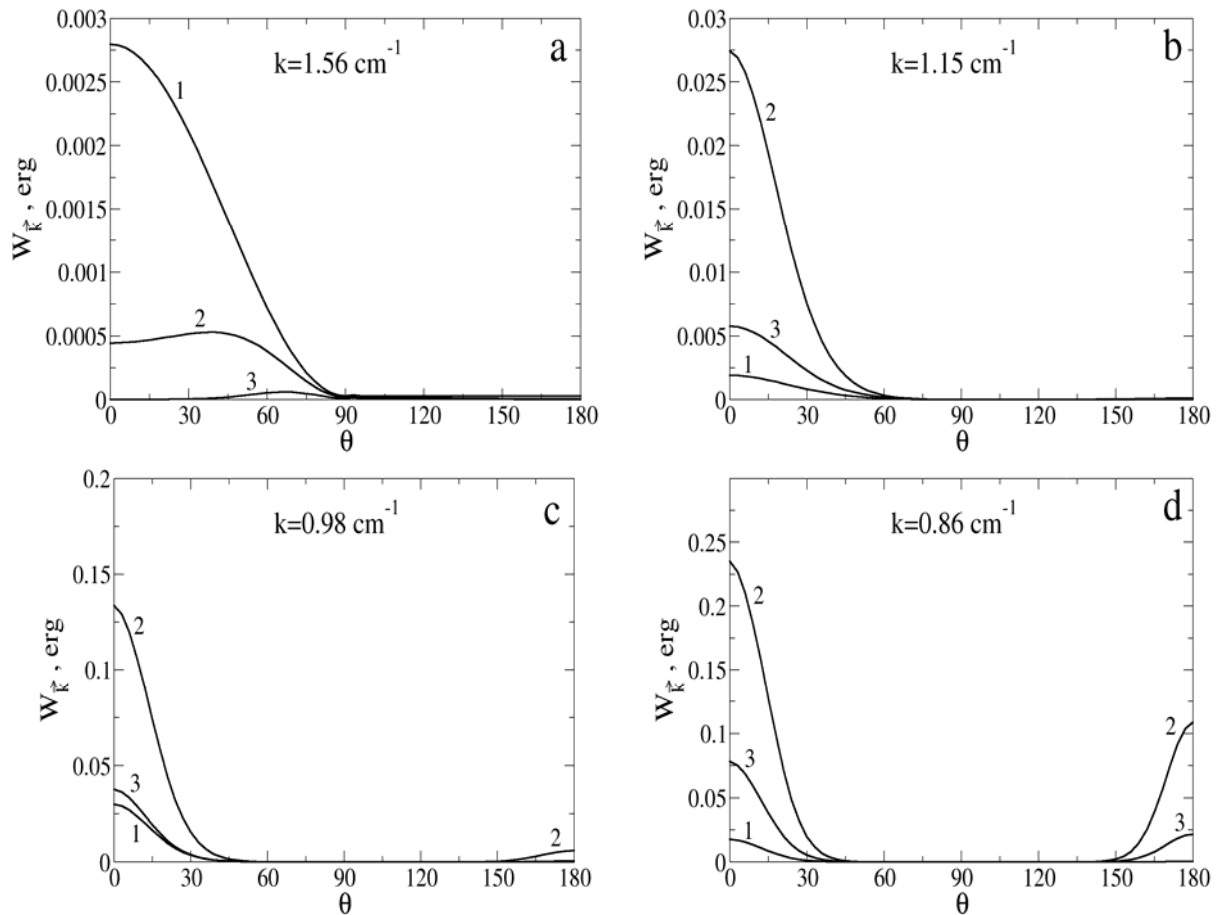


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности энергии ленгмюровских волн от угла θ : (a): 1 – $t = 0$ с, 2 – $t = 2 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $t = 5 \cdot 10^{-5}$ с; (b): 1 – $t = 2 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $t = 5 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $t = 8 \cdot 10^{-5}$ с; (c): 1 – $t = 8 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $t = 1 \cdot 10^{-4}$ с, 3 – $t = 1.2 \cdot 10^{-4}$ с; (d): 1 – $t = 1.2 \cdot 10^{-4}$ с, 2 – $t = 1.5 \cdot 10^{-4}$ с, 3 – $t = 1.6 \cdot 10^{-4}$ с;

На рис. 2 приведены угловые распределения волн для значений k , соответствующих некоторым максимумам W_k^- , приведенным на рисунке 1а. На рис. 2с-d виден рост интенсивности волны с $\theta > 90^\circ$. Принципиально важным является то, что индуцированное рассеяние ленгмюровских волн не приводит к их изотропизации. Таким образом, при изучении взаимодействия плазменных волн с быстрыми электронами и при расчетах радиоизлучения необходимо учитывать анизотропию ленгмюровских волн, поскольку они генерируются анизотропно.

Литература

1. Железняков В.В., Зайцев В.В. // Астроном. журнал. Т.47(1). С.60 1970.
2. Гинзбург В.Л., Железняков В.В. // Астроном. журнал. Т.35(5). С.694 1958.
3. Железняков В.В., Зайцев В.В. // Астроном. журнал. Т.47(2) С. 308 1970.
4. Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы. М.: Атомиздат. 424 с. 1971.
5. Zaitsev V.V., Stepanov A.S. // Solar Physics. V.88. P. 297-313. 1983.
6. Liperovskii V.A., Tsytovich V.N. // Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1969, V.57(4), p.1252.
7. Цытович В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. – М.: Наука, 1967. 268 с.