

НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ ПРИ РАЗВИТИИ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И. С. Байков

УДК 533.951

Получены скорости аномального нагрева электронов и ионов в результате возбуждения электростатической плазменной турбулентности мощной волной накачки на гидродинамической стадии развития аperiodической параметрической неустойчивости. При резонансе частоты внешнего излучения с плазменной электроны на этой стадии увеличивают свою энергию быстрее, чем ионы, примерно в корень кубический из отношения масс.

Проблема нагрева плазмы интенсивным высокочастотным излучением, таким как излучение лазера или мощные микроволны, очень важна для понимания физики взаимодействия ВЧ поля большой амплитуды с плазмой и тесно связана с проблемой УЛТС, которая впервые выдвинута в /1/, и с различными ионосферными экспериментами и проектами (передача энергии спутникам, нагрев и модуляция F-слоя ионосферы мощными радиоволнами и т.п.) /2/.

В этой работе рассмотрен аномальный нагрев плазмы, обусловленный развитием сильных флуктуаций ионной плотности в плазме, когда повышенная диссипация энергии внешнего ВЧ поля сопровождается возбуждением электронных плазменных колебаний, возникающих в результате взаимодействия осциллирующих электронных токов с низкочастотными флуктуациями ионной плотности, нарастающими аperiodически. Полученные результаты относятся к гидродинамической стадии развития параметрической аperiodической неустойчивости плазмы в очень сильном электрическом поле. Нагрев плазмы, обусловленный развитием осцилляторной ионно-акустической неустойчивости в сильном ВЧ поле, исследован в работе /3/. Случай слабого поля, близкого к порогу возникновения параметрической неустойчивости, рассматривался в работах /4/.

Эволюцию функций распределения ионов и электронов плазмы, находящейся в переменном электрическом поле $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin \omega_0 t$, можно описать системой уравнений типа Фоккера-Планка, диффузионные коэффициенты которой зависят от внешнего поля /5/. Если частота внешнего поля близка к плазменной, то эта система позволяет связать средние энергии частиц и плотность энергии электростатического шума /3-6/. Для случая аperiodической неустойчивости, когда $\omega_0/\omega_{Le} - 1 \approx - (m_e/2m_i)^{1/3}$ и энергия поля накачки существенно превышает тепловую энергию плазмы, имеем

$$T_e(t) = T_{e0} + \frac{\omega_{Le}^2 J_1^2(a_0)}{12n\gamma_m^2} w(t)(1 - \sin 2\omega_0 t), \quad (1)$$

$$T_i(t) = T_{i0} + \frac{2}{3} \frac{\omega_{Li}^2}{n\gamma_m^2} w(t), \quad (2)$$

где

$$w(t) = \int \frac{d\vec{k}}{(2\pi)^3} \frac{k^2}{4\pi} |\varphi_0(\vec{k})|^2 \exp \left[2 \int_0^t \gamma(\vec{k}, t') dt' \right], \quad (3)$$

$\omega_{L\alpha}$ - ленгмювская частота частиц сорта α ; J_1 - функция Бесселя; $a_0 = 1,84$; n - плотность плазмы, \vec{k} - волновой вектор,

$\gamma_m = 0,55\omega_{Le} \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{1/3}$ - максимальный инкремент аperiodической неустойчивости, $\varphi_0(\vec{k})$ характеризует начальный потенциал электростатического шума в плазме. При получении уравнений (1) и (2) тепловые скорости считались малыми по сравнению с γ_m/k .

Плотность полной энергии шумов нетрудно вычислить на гидродинамической стадии развития плазменной турбулентности, когда инкремент нарастающих флуктуаций мало отличается от γ_m . Такие расчеты были проделаны в работе /3/ для ионно-акустической параметрической неустойчивости и в работе /6/ для аperiodической неустойчивости, причем аналитические зависимости величины полного шума от макроскопических параметров плазмы в обоих случаях оказались одинаковыми за исключением численных коэффициентов. Для рассматриваемого случая инкремент нарастания шумов в окрестности максимального значения записывается в виде

$$\chi_{\text{апер}}(\bar{E}, t) =$$

$$= \chi_m \left\{ 1 - \frac{3}{8} \frac{\omega_{Le}^2}{\chi_m^2} (x - x_1)^2 \left(1 - \frac{4}{9} \beta \right) - \frac{(k_{\parallel} r_E - a_0)^2}{3} \left(1 - \frac{1}{a_0^2} \right) \right\}, \quad (4)$$

где $x = k^2 r_t^2$, $r_t = \omega_{Le}^{-1} [\bar{T}_e(t)/m_e]^{1/2}$ - дебаевский радиус электронов в момент t , а черта означает усреднение по быстрым осцилляциям с частотой ω_0 , r_E - амплитуда осцилляций электрона в поле накачки,

$$\beta = \frac{9}{16} \left(1 - \frac{\chi_0^2}{r_t^2} \right)^2, \quad x_1 = \frac{2}{3} \left(\Delta_0 + \frac{\chi_m}{\omega_{Le}} \right) \left(1 - \frac{4}{9} \beta \right)^{-1}, \quad \Delta_0 = \frac{\omega_0}{\omega_{Le}} - 1.$$

Если начальное распределение шумов является тепловым, то для больших времен, когда плотность энергии шума превышает начальную тепловую энергию электронов, из формул (I)-(4) имеем:

$$\frac{W(t)}{nT_{e0}} = \frac{J_1(a_0)}{2} \left[\frac{2\sqrt{3} a_0 \chi_m (1 + T_{i0}/T_{e0})}{\pi \omega_{Le} \sqrt{a_0^2 - 1 n r_E^2}} \right]^{1/2} \frac{\exp(\chi_m t)}{(\chi_m t)^{1/4}} \approx$$

$$\approx \frac{1}{4} \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{1/6} \left[\frac{1 + T_{i0}/T_{e0}}{n r_E^2} \right]^{1/2} \frac{\exp(\chi_m t)}{(\chi_m t)^{1/4}}. \quad (5)$$

Из приведенных выше выражений видно, что при больших временах, когда энергия шума превышает начальную тепловую энергию плазмы $W(t) > n(T_{e0} + T_{i0})$, средние энергии электронов и ионов, обусловленные развитием турбулентности из-за аперриодической неустойчивости, связаны соотношением

$$\left. \frac{\bar{T}_e(t)}{T_{i1}(t)} \right|_{\text{апер}} = \left[\frac{m_i}{4 m_e J_1^2(a_0)} \right]^{1/3} \approx 1,3 \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Подобное соотношение имеет место и при развитии параметрической конно-акустической неустойчивости [3]. Таким образом, скорость нагрева ионов на гидродинамической стадии развития параметрической неустойчивости плазмы в сильном поле накачки, частота которого близка к плазменной, заметно меньше скорости нагрева электронов.

Поступила в редакцию
II ноября 1974 года.

Л и т е р а т у р а

1. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин. ЖЭТФ, 46, 171 (1964).
2. W. F. Utlaut, I. R. Coher. Science, 174, 245 (1971).
W. C. Brown. IEEE spectrum, 10, 38 (1973). R. Cohen, J. Whitehead. J. Geophys. Res., 75, 6439 (1970).
3. И. С. Байков, В. П. Силин. ЖТФ, 45 (в печати).
4. В. П. Силин, УФН, 108, 625 (1972). И. С. Байков, В. П. Силин. ЖТФ, 44, 2467 (1974). И. С. Байков, В. П. Силин. Доклад на Всесоюзной школе по численным методам в физике плазмы, г. Звенигород, 9-18 февраля 1974 г. Сб. трудов (в печати).
5. В. П. Силин. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. Изд. "Наука", М., 1973 г.
6. Н. Е. Андреев, В. П. Силин. ЖЭТФ (в печати).