Краткие сообщения по физике № 4 апрель 1970

О резонансном поглощении электромагнитных волн в неоднородном плазменном потоке

Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе

Известно, что в высокотемпературной плазме существует бесстолкновительный механизм диссипации, обусловленный черенковским и магнитотормозным излучением и поглощением электромагнитных волн заряженными частицами[1]. Этот механизм определяется резонансным взаимодействием электромагнитной волны с частицами плазмы и существенным образом зависит от теплового движения частиц, т.е. от вида функции распределения. В зависимости от вида функции распределения черенковский механизм диссипации может приводить как к поглощению, так и к усилению электромагнитных волн в плазме.

Как было недавно отмечено в работах[2], механизм резонансного взаимодействия электромагнитных волн с плазмой может существовать и в холодной плазме при наличии в ней неоднородных течений. Ниже показывается, что этот механизм приводит к бесстолкновительному поглощению электромагнитных волн в плазме. При наличии достаточно сильной неоднородности плотности в плазменном потоке, имеющем линейный профиль направленной скорости, возможно существование слабозатухающих объёмных колебаний, описываемых в приближении геометрической оптики.

Для простоты ограничимся рассмотрением потенциальных колебаний в электронном потоке с плотностью

$N(x)$, движущемся со скоростью $u(x) \ll c$ вдоль сильного внешнего магнитного поля. Уравнение для таких колебаний при полном пренебрежении тепловым движением частиц записывается в виде[3]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - k_y^2 - k_z^2\right)\Phi + \frac{\omega_{Le}^2(x)k_z^2}{[\omega - k_z u(x)]^2}\Phi - k_y\Phi\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\omega_{Le}^2(x)}{\Omega_e(\omega - k_z u(x))}\right] = 0 \tag{1}$$

где Φ - потенциал поля колебаний, ω_{Le} и Ω_e - соответственно, ленгмюровская и ларморовская частоты электронов, k_y и k_z - волновые числа, а ω - частота колебаний. В условиях, когда магнитное поле является достаточно сильным, так что выполняется неравенство

$$\frac{k_y u}{k_z \Omega_e a} \ll 1, \tag{2}$$

где a - характерный размер неоднородности скорости плазмы, колебания, описываемые уравнением (1), как показано в работах[4,5], оказываются устойчивыми[*)]. В этом пределе спектр коротковолновых колебаний плазмы в приближении геометрической оптики определяется соотношением[7]:

$$\int \frac{\omega_{Le}(x)}{\omega - k_z u(x)}\, dx = \frac{\pi n}{|k_z|} \tag{3}$$

---

*) В работах[3,5] исследовалась гидродинамическая "slipping" - неустойчивость, обусловленная неоднородностью скорости потока $u(x)$, и не учитывалось резонансное взаимодействие волны с потоком или, иными словами, особые точки $\omega = k_z u(x)$ в уравнении (1). Учёт резонансного взаимодействия, проведённый в работе[4], показал, что при выполнении условия (2) в потоке с однородной плотностью все возмущения затухают со временем по степенному закону. Заметим также, что при выполнении неравенства (2), если под a понимать неоднородность плотности, в системе невозможно развитие и токово-конвективной неустойчивости[6].

где n - целые числа, значительно превосходящие единицу. При написании соотношения (3) считалось, что $\omega_{Le}(x) \gg |\omega - k_z u(x)|$. Это же условие определяет и область интегрирования в (3) (область прозрачности). Отметим, что при интегрировании следует учитывать полюс $\omega = k_z u(x)$, соответствующий резонансному взаимодействию волны с электронным потоком. Следствием этого взаимодействия и является поглощение волны плазмой в резонансных точках.

В качестве примера рассмотрим плоскопараллельный поток $(-a \leq x \leq a)$ с линейным профилем скорости $u(x) = u_0 \frac{x}{a}$ и однородной плотностью $N = \text{const}$. Уравнение (3) при этом принимает вид

$$\frac{\omega_{Le} a}{u_0} \left\{ \ln \left| \frac{\omega + k_z u_0}{\omega - k_z u_0} \right| - \frac{i\pi}{2} \left(1 + \frac{k_z u_0 - \omega}{|k_z u_0 - \omega|}\right) \right\} = \pi n \qquad (4)$$

Отсюда, кстати, находим условие применимости приближения геометрической оптики $\omega_{Le} a \gg u_0$. Из уравнения (4) следует, что в рассматриваемых условиях колебания возможны лишь при $\omega > k_z u_0$, когда мнимое слагаемое тождественно равно нулю и поглощение отсутствует. Спектр колебаний при этом определяется выражением

$$\omega = k_z u_0 \operatorname{cth} \frac{\pi n u_0}{2\omega_{Le} a} \qquad (5)$$

В области же $\omega < k_z u_0$ благодаря сильной диссипации колебания невозможны.

Иное положение имеет место, если плотность плазмы неоднородна $N = N(x)$. Так при $N = N_0 e^{-\frac{x^2}{2L^2}}$ и $L \ll a$ из (3) получаем

$$1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_{Le}(0)\,|k_z| \cdot L}{\omega n} J_+\left(\frac{\omega a}{k_z u_0 L}\right) = 0 \qquad (6)$$

(Относительно $J_+(x)$ см.[8]). Легко видеть, что при

$\omega \ll k_z u_0 L/a$ колебания невозможны. В области же $\omega \gg k_z u_0 L/a$ уравнение (6) приводит к следующему спектру слабозатухающих колебаний ($\omega \to \omega + i\gamma$):

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\ \frac{\omega_{Le}(0)\,|k_z|\cdot L}{n}$$

$$\frac{\gamma}{\omega} = -\frac{\omega_{Le}(0)a}{nu_0}\, e^{-\frac{1}{\pi}\frac{\omega_{Le}^2(0)a^2}{n^2u_0^2}} \qquad (7)$$

Затухание колебаний обусловлено резонансным взаимодействием волны с неоднородным потоком электронов и существенным образом зависит от вида функции $N(x)$. В этом смысле рассматриваемый механизм диссипации аналогичен черенковской диссипации, для которой определяющую роль играет вид функции распределения частиц по скоростям[1]. Следует отметить, что этот механизм может приводить к локальному разогреву плазмы в областях, в которых выполнены условия резонанса.

Поступила в редакцию
4 марта 1970 г.

Литература

1. Ландау Л. Д., ЖЭТФ 16, 574 (1946).
2. Тимофеев А. В., ЖТФ 38, 14 (1968); УФН (в печати).
3. Михайловский А. Б., Рухадзе А. А., ЖТФ 35, 2143 (1965).
4. Костин В. М., Тимофеев А. В., ЖЭТФ 53, 1378 (1967).
5. Желязков И. И., Рухадзе А. А. ЖТФ 40, 217 (1970).
6. Богданкевич Л. С., Ловецкий Е. Е., Рухадзе А. А. Ядерный синтез 6, 9,176 (1966).
7. Рухадзе А. А., Силин В. П., УФН, 82, 499 (1964).
8. Силин В. П., Рухадзе А. А., " Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред", Москва, Атомиздат, 1961 г.