

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ

С.С.Моисеев

В последние годы интенсивно исследовались неустойчивости, возникающие на дрейфовых колебаниях неоднородной плазмы [1,2]. При этом, однако, движение ионов вдоль магнитного поля H_0 , как правило, исследовалось мало, а основное внимание уделялось ионным токам магнитного поля. Вместе с тем с ростом H_0 и k_x (k_x — проекция волнового вектора на направление магнитного поля) ситуация может измениться и продольное движение ионов окажется более существенным. Это особенно относится в случае изотермической плазмы к диапазону частот $\omega \approx k_x v_{Ti}$ (v_{Ti} — тепловая скорость ионов), либо же в случае холодных ионов к частотам $\omega \approx k_x v_s$ (v_s — скорость ионного звука).

Подчеркнем, что исследование устойчивости плазмы для таких частот имеет важное значение в связи с вопросом об эффективности использования установок с перекрещенными силовыми линиями (см., напр., работу Кадомцева и Погуце [3]). Имея в виду отмеченное здесь, рассмотрим следующий случай: пренебрежем поперечными токами ионов, но учтем их продольное движение. Мы будем исследовать в гидродинамическом приближении потенциальные возмущения ($\text{rot } \vec{E} \Rightarrow a$, \vec{E} — электрическое поле возмущения), которые выберем в виде $\sim \exp(i\omega t + ik_y y + ik_x z)$.

Уравнение сохранения заряда при сделанных предположениях принимает вид:

$$v_{xe} - v_{xi} = 0, \quad (I)$$

где v_{xe} , v_{xi} - соответственно продольные возмущенные скорости электронов и ионов.

Для выяснения основных особенностей интересующего нас явления рассмотрим прежде всего простой случай, когда ионы поддерживаются холодными, а начальная температура электронов T_0 постоянна. Нам тогда понадобятся еще следующие уравнения:

$$i\omega M v_{xi} = 3ik_x T_e + eE_x, \quad (2)$$

$$-(1+s)ik_x T_e n_0 - ik_x n T_0 - en_0 E_x = 0, \quad (3)$$

$$i\omega n + c \frac{E_y}{H_0} n_0' + ik_x v_{xe} n_0 = 0, \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} i\omega T_e + ik_x v_{xe} T_0 = -k_x^2 \chi T_e, \quad (5)$$

$$v_x = c \frac{E_y}{H_0} + ik_y \frac{c}{eH_0} (T_e + \frac{T_0 n}{n_0}) \quad (6)$$

$$(s = 0,71; \quad n_0' \equiv \frac{dn_0}{dx}).$$

Здесь (2)-(5) соответственно уравнения движения ионов и электронов вдоль \vec{H}_0 , уравнения непрерывности и теплового баланса для электронов. Формула (5) записана с учетом выражения (6) - скорости электронов вдоль неоднородности. M - масса ионов, c - скорость света, e - заряд электрона, n , T_e - соответственно возмущения плотности и электронной температуры, $n_0(x)$ - начальная плотность плазмы, а χ - коэффициент электронной теплопроводности. Члены, пропорциональные s , связаны с термосилой - силой трения, зависящей от градиента электронной температуры (см. работу Брагинского [4]) и играющей здесь особую роль. В результате имеем следующее дисперсионное уравнение:

$$\omega^3 - \omega^2(\omega_e + \frac{2}{3}i\chi k_x^2) - \omega(\frac{5}{3}k_x^2 v_3^2 - \frac{2}{3}i\chi k_x^2 \omega_e) - \frac{2}{3}\omega_e k_x^2 v_3^2 + \frac{2}{3}i k_x^4 \chi v_3^2 = 0 \quad (7)$$

$$(\omega_e = k_y \frac{cT_e}{eH_0} \frac{n_0'}{n_0}; \quad v_3 = \sqrt{\frac{T_e'}{M}}).$$

Из формулы (7) при $\omega_e \gg \omega$ вытекает существование следующей неустойчивости:

$$Im \omega \sim \sqrt{3} k_x v_3; \quad Re \omega \sim \frac{k_x^2 v_3^2}{\omega_e}; \quad (\chi k_x^2 \ll k_x v_3); \quad (8)$$

$$Im \omega \sim \frac{v_3^2}{\chi}; \quad (\chi k_x^2 \gg k_x v_3). \quad (9)$$

Обратимся теперь к изотермической плазме, ограничиваясь для простоты случаем $k_x v_{Ti} \gg \chi k_x^2$. Уравнение теплового баланса для ионов совпадает с формулой (5), так как в этом случае член, характеризующий теплообмен между электронами и ионами [4], оказывается порядка $\chi k_x^2 T_e$ и в рассматриваемом приближении может быть опущен. Тогда, дополняя (2) градиентом давления ионов, легко получим, что неустойчивый корень (8) сохраняется и в этом случае (с заменой v_3 на v_{Ti}).

Как известно [4], если $Im \omega \sim \omega_e$ и при этом размер турбулентных пульсаций порядка поперечных размеров системы, то коэффициент аномальной диффузии плазмы D за счет развивающейся неустойчивости может стать порядка коэффициента диффузии Бома: $D \sim cT_e/eH_0$ [5]. Обратим внимание на то, что если $k_x v_3 \sim (1/r^2)(cT_e/eH_0)$ (r — характерный поперечный размер) и $\chi k_x^2 \lesssim k_x v_3$, то, как следует из выражения (8), данная неустойчивость приводит к диффузии Бома.

Если $\omega_e < k_x v_3$, то, как следует из формулы (7), рассматриваемая здесь неустойчивость не возникает. Отсюда, используя также формулы (9), нетрудно видеть, что в системах с перекрещенными силовыми линиями коэффициент становится порядка коэффициента классической диффузии, если $\theta \lesssim 1$ (θ — угол поворота силовых линий H_0 на расстоянии порядка поперечных размеров системы; $D \sim Im \omega \Delta x^2$, где характерный размер турбулентных пульсаций Δx определяется из условия $\omega_e \sim k_{||} v_3$; $k_{||} \sim k_y (\theta/r) \Delta x$).

Благодарю А.А.Галеева, Б.Б.Кадошцева, А.Б.Михайловского,
Р.З.Сагдеева за ценное обсуждение результатов данной работы.

Новосибирский
государственный университет

Поступило в редакцию
21 мая 1966 г.

Литература

- [1] А.А.Галеев, С.С.Моисеев, Р.З.Сагдеев. Атомная энергия, 15, 451, 1963.
- [2] Б.Б.Кадошцев. Сб. "Вопросы теории плазмы", 4, 188, М., 1964.
- [3] Б.Б.Кадошцев, О.П.Погуце. Материалы конференции по физике плазмы и исследованиям в области термоядерного синтеза, 1965, Калэм.
- [4] С.И.Брагинский. Сб. "Вопросы теории плазмы", 1, 191, 1963.
- [5] A.Guthrie, R.K. Wakerling. The characteristics of Electrical Discharge in Magnetic Field. М.-У., 1949.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ГОЛОГРАММЕ В НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОМ СВЕТЕ

Г.И.Косоуров, И.Н.Калинкина, М.П.Головей

Требования, предъявляемые к монохроматичности света для удовлетворительного восстановления изображения по голограмме, могут быть значительно мягче, чем условия, необходимые для получения голограммы. При использовании для воспроизведения изображения источника света сравнительно широкого спектрального состава для каждой длины волны получается свое изображение, отличающееся положением в пространстве и масштабом, что ухудшает резкость изображения и, следовательно, приводит к потере части информации, содержащейся в голограмме.