

С.С.Моисеев

**Влияние движения ионов вдоль магнитного  
поля на устойчивость плазмы**

В последние годы интенсивно исследовались неустойчивости, возникающие на дрейфовых колебаниях неоднородной плазмы (см., например, [1], [2]). В частности в [3] было показано, что с учетом электрон-ионного трения в неоднородной плазме возникает неустойчивость, которая может вызывать аномальную диффузию Бома [4] с коэффициентом диффузии

$$D \sim \frac{c T_0}{e H_0} \quad (1)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме,  $H_0$  - напряженность магнитного поля,  $T_0$  - температура плазмы,  $e$  - заряд электрона.

Существенную роль в развитии этой неустойчивости играют поперечные по отношению к  $\vec{H}_0$  ионные токи (в частности дрейф ионов за счет их инерции). Продольное движение ионов при исследовании этой неустойчивости не учитывается. Вместе с тем, с ростом  $H_0$  и  $k_z$  ( $k_z$  - проекция волнового вектора на направление магнитного поля) ситуация может измениться и продольное движение ионов окажется более существенным. Это особенно относится к диапазону частот  $\omega \lesssim k_z v_{Ti}$  ( $v_{Ti}$  - тепловая скорость ионов, либо же скорость ионного звука в случае холодных ионов).

Подчеркнем, что исследование устойчивости плазмы для таких частот имеет важное значение в связи с вопросом об эффективности использования установок с перекрещенными силовыми линиями (см., например, [5]).

Учитывая отмеченное здесь, рассмотрим случай, обратный [3], - пренебрежем поперечными токами ионов, но учтем их продольное движение. Мы будем исследовать потенциальные возмущения ( $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ,  $\vec{E}$  - электрическое поле возмущения), которые выберем в виде  $\sim \exp(i\omega t + ik_y y + ik_z z)$ . Уравнение сохранения заряда при сделанных предположениях принимает вид:

$$V_{ze} - V_{zi} = 0 \quad (2)$$

где  $V_{ze}$ ,  $V_{zi}$  - соответственно продольные возмущенные скорости электронов и ионов. Нам понадобятся еще следующие уравнения:

$$-(1+s)ik_z n_0 T_e - ik_z n T_0 - en_0 E_z = 0 \quad (3)$$

$$i\omega M V_{zi} n_0 = s ik_z n_0 T_e + en_0 E_z - ik_z n_0 T_i - ik_z n T_0 \quad (4)$$

$$i\omega n + c \frac{E_z}{H_0} n'_0 + ik_z V_{ze} n_0 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{3}{2} i\omega T_e + iT_0 k_z V_{ze} = -\lambda k_z^2 T_e - 3V_{ie} (T_e - T_i) \quad (6)$$

$$\frac{3}{2} i\omega T_i + iT_0 k_z V_{zi} = 3V_{ie} (T_e - T_i) \quad (7)$$

$$V_{xe} = c \frac{E_y}{H_0} + ik_y \frac{c}{eH_0} (T_e + \frac{T_0 n}{n_0}) \quad (8)$$

$$V_{xi} = c \frac{E_y}{H_0} - ik_y \frac{c}{eH_0} (T_i + \frac{T_0 n}{n_0}) \quad (9)$$

$$(s = 0,71; n'_0 = \frac{dn_0}{dx})$$

Здесь (3-7) соответственно уравнения движения ионов и электронов вдоль  $\vec{H}_0$ , уравнения непрерывности и теплового баланса для электронов и ионов.  $M$  - масса ионов,  $n, T_e, T_i$  - соответственно возмущения плотности электронной и ионной температуры,  $n_0(x)$  - начальная плотность плазмы,  $V_{ze}, V_{zi}$  - соответственно начальные скорости электронов и ионов,  $\lambda$  - коэффициент электронной теплопроводности вдоль  $\vec{H}_0$ ,  $V_{ie}$  - время обмена энергией между электронами и ионами \*). уравнения (8) и (9) представляют соответственно выражения для скорости электронов и ионов вдоль неоднородности. В данные уравнения включена сила трения, зависящая от градиента электронной температуры - так называемая термосила, играющая здесь особую роль (по поводу термосилы см. [6]); в (3) и (4) это члены, пропорциональные  $s$ ). Начальная температура плазмы считается однородной. В результате имеем следующее дисперсионное уравнение:

$$-s\omega^2 + \omega \left( \frac{2}{3} i\lambda k_z^2 + 20V_{ie} - 2s\omega_i \right) - \frac{2}{3} i\omega_i \lambda k_z^2 + 8is\omega V_{ie} + 4V_{ie} \lambda k_z^2$$

$$= \frac{\omega}{k_z^2 V_{Ti}^2} (\omega - \omega_i) \left\{ \frac{3}{2} \omega \left( \omega - \frac{2}{3} i\lambda k_z^2 \right) + 3iV_{ie} \left( \omega - \frac{2}{3} i\lambda k_z^2 \right) + 3iV_{ie} \omega \right\}$$

(10)

\*) На необходимость учета обмена энергией между электронами и ионами обратил мое внимание Б.Б.Кадомцев.

Здесь  $\omega_i = k_y \frac{cT_0}{eH_0} \frac{n'_0}{n_0}$

Из (10) при  $\omega_i > k_z V_{Ti}$  вытекает существование следующей неустойчивости:

$$\Im m \omega \sim \sqrt{s} k_z V_{Ti} \quad (\lambda k_z^2 \ll k_z V_{Ti})$$

$$\Im m \omega \sim \frac{V_{Ti}^2}{\lambda} \quad (\lambda k_z^2 \gg k_z V_{Ti})$$

Как известно, (см., например, [1]), если  $\Im m \omega \sim \omega$  и при этом мер турбулентных пульсаций порядка поперечных размеров системы коэффициент аномальной диффузии плазмы за счет развивающейся неустойчивости может стать порядка боровского. Обратим внимание на то, что если  $k_z V_{Ti} \sim \frac{1}{2} \frac{cT_0}{eH_0}$  ( $\tau$  - характерный поперечный размер) и  $\lambda k_z^2 \ll k_z V_{Ti}$ , то как следует из (11) данная неустойчивость приводит к диффузии Бома. Отметим, еще, что результаты этой работы и [3] позволяют, например, объяснить наблюдающуюся в [7] аномальную диффузию Бома.

Если  $\omega_i < k_z V_{Ti}$ , то как следует из (10) исследуемая здесь неустойчивость не возникает. В системах с перекрещенными силовыми линиями  $H_0$  условие  $\omega_i > k_z V_{Ti}$  сводится к условию  $\Delta x > \tau_i$  где  $\Delta x$  - размер области локализации возмущения,  $\tau_i$  - Ларендорфский радиус ионов,  $\Theta$  - угол поворота силовых линий  $H_0$  на расстоянии порядка размеров системы [5]. Тогда из (12) следует, что коэффициент аномальной диффузии ( $D \sim \Im m \omega \Delta x^2$ ) становится порядка классического, если  $\Theta \leq 1$ . Заметим, что поскольку в данной работе не учитывалась теплопроводность ионов, то (12) применимо для  $\Theta < \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{m}{M}}$ , где  $\lambda$  - длина свободного пробега ч  $m$  - масса электронов.

Благодарю А.А.Галеева, Б.Б.Кадомцева, А.Б.Михайлова, Р.З.Сагдеева за ценное обсуждение результатов данной работы.

## Л и т е р а т у р а

- /1/ А.А.Галеев, С.С.Моисеев, Р.З.Сагдеев. Атомная энергия, 15, 451, 1963 г.
- /2/ Б.Б.Кадоццев. Вопросы теории плазмы, IV, 188, 1964, Москва.
- /3/ С.С.Моисеев, Р.З.Сагдеев, ЖЭТФ, 44, 763, 1963 г.
- /4/ Guthrie A., Wakerling R.K. The Characteristics of Electrical Discharge in Magnetic Field, 1949, N. Y.
- /5/ Б.Б.Кадоццев, О.П.Погуце. Материалы конференции по физике плазмы и исследованиям в области термоядерного синтеза, 1965, Калэм.
- /6/ С.И.Брагинский. Вопросы теории плазмы, I, 191, 1963, Москва.
- /7/ W. Stodiek, D. J. Trone, J. O. Kesler . Материалы конференции по физике плазмы и исследованиям в области термоядерного синтеза, 1965, Калэм.

Ответственный за выпуск Г.М.Заславский

---

Тираж - 200 экз. Б е с п л а т н о  
Отпечатано на роталитне в ИЯФ СО АН СССР  
9.04.66г.