

04;10

РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕ ПРИ РАЗВИТИИ МОДУЛЯЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

© Д.М.Карфидов, Н.А.Лукина

Проблема сильной ленгмюровской турбулентности является одной из основных в современной физике плазмы. При достаточной интенсивности ленгмюровских волн в плазме эти волны захватываются в спонтанно возникающие ямы плотности — каверны, в результате сжатия которых энергия волн передается небольшой группе ускоренных электронов плазмы [1,2]. Известно, что переход к сильной турбулентности должен сопровождаться изменением макроскопических характеристик плазмы, в частности, в сильнотурбулентной плазме диссипация ленгмюровских волн должна приводить к существенному замедлению темпов релаксации электронных пучков [3]. С другой стороны, изучение макроскопических следствий дает информацию о характеристиках самой турбулентности.

В работе экспериментально исследуется релаксация нерелятивистского электронного пучка в бесстолкновительной плазме при переходе к сильной турбулентности плазмы.

Эксперименты проводились в цилиндрической вакуумной камере диаметром 7 см и длиной 110 см, помещенной в слабое продольное магнитное поле с индукцией $B \leq 100$ Гс (отношение гирочастоты к плазменной частоте $(\omega_b/\omega_p)^2 \approx 10^{-3}$), которое не влияло на дисперсионные свойства плазмы. Плазма создавалась импульсным плазменно-пучковым разрядом в аргоне или водороде при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Тор при подаче на термоэмиссионный катод отрицательных импульсов напряжения. Пробный пучок диаметром 3 см длительностью 50 мкс с энергией $W_b = 50-2000$ эВ и начальной шириной $\Delta W_b/W_b \approx 5 \cdot 10^{-2}$ инжектировался в распадающуюся плазму с начальной концентрацией $n_{e0} \approx 10^9-10^{12}$ см $^{-3}$ и температурой электронов $T_{e0} \approx 1$ эВ; после инжекции пучка температура электронов и концентрация плазмы возрастали, достигая к концу импульса стационарных значений $n_e \leq 2n_{e0}$, $T_e \approx 3-6$ эВ. Эксперименты проводились в установившемся режиме при следующих относительных параметрах пучка и плазмы: $n_b/n_e = 5 \times 10^{-4}-5 \cdot 10^{-2}$, $W_b/T_e = 2-200$, отношение частоты столкно-

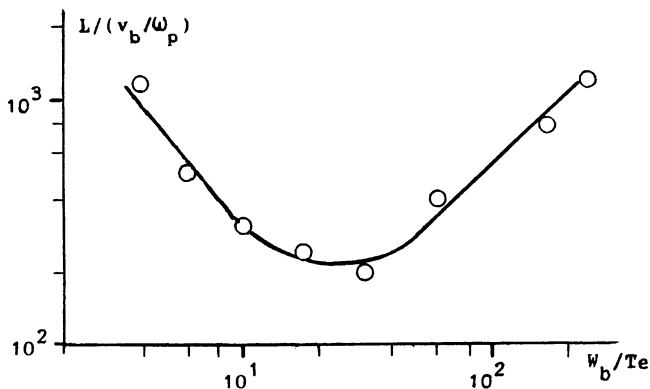


Рис. 1. Длина релаксации пучка в зависимости от энергии, $n_b/n_0 = 10^{-2}$.

вений электронов с атомами и ионами к плазменной частоте $\nu_0/\omega_p \ll 1$, $\nu_0 \ll n_b/n_e$.

Результаты измерений длины релаксации электронного пучка в плазме в зависимости от энергии пучка приведены на рис. 1. При относительно невысоких энергиях пучка длина релаксации падает с ростом энергии пучковых электронов с характерной для квазилинейной релаксации зависимостью $L \sim (1/W_b)$. При увеличении энергии пучка $W_b/T_e \geq 20$ характер зависимости $L(W_b/T_e)$ изменяется — длина релаксации возрастает с ростом энергии пучка и существенно превышает длину, определенную по квазилинейной теории. Изменение характера зависимости $L(W_b/T_e)$ сопровождается возникновением потоков ускоренных электронов с характерной энергией $W_h \approx 5 - 7T_e$ вспышками радиоизлучения на плазменной частоте и генерацией ионно-звуковых колебаний, свидетельствующими о развитии сильной ленгмюровской турбулентности плазмы [4], причем пороговая зависимость $n_b/n_e f(W_b/T_e)$ оказалась такой же, как определенная в [5]: $n_b/n_e \sim (W_b/T_e)^{-2}$.

Зависимость длины релаксации электронного пучка в плазме от плотности пучка в нелинейном режиме приведена на рис. 2. Характерно появление зависимости длины релаксации от массы ионов, а также более слабая по сравнению с квазилинейной зависимость от плотности пучка, близкая к $L \sim (n_b/n_e)^{-2/3}$.

Так как длина релаксации электронного пучка в плазме определяется энергией с пучком плазменных волн $L \approx (v_b/\omega_p)(v_T^2/v_b^2)(8\pi n_e T_e/E^2)$, результаты измерений длины релаксации позволяют определить энергию резонансных волн $E^2/8\pi n_e T_e = 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$ при $n_b/n_e = 5 \cdot 10^{-4} - 5 \times 10^{-2}$ и $W_b/T_e = 100$ (такие же по порядку величины

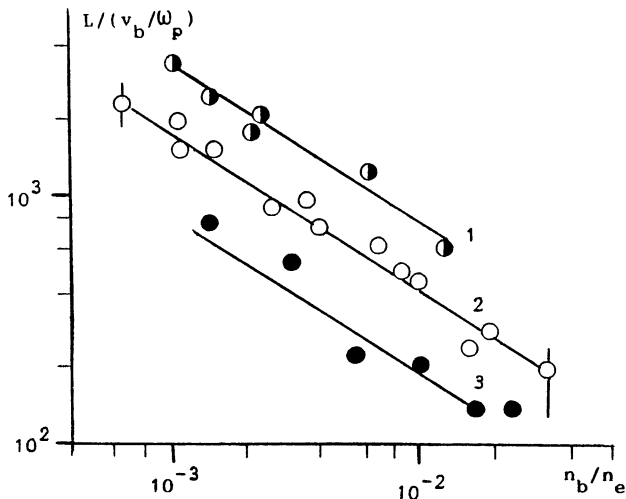


Рис. 2. Зависимость длины релаксации от плотности пучка: 1 — аргон, $W_b/T_e = 180$; 2 — аргон, $W_b/T_e = 60$; 3 — водород, $W_b/T_e = 180$.

значения получаются из уравнения энергетического баланса для нагрева плазмы при инжекции пучка $d(n_e T_e)/dt = \nu_0 E^2/8\pi n_e T_e$, в то время как квазилинейная теория дает при тех же параметрах пучка на 1–2 порядка большие величины $(E^2/8\pi n_e T_e)_{QL} \approx 0.1$, $(n_b/n_e)(W_b/T_e)^2 \approx 5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^1$.

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что в условиях описываемых экспериментов уровень энергии резонансных с пучком плазменных волн определяется развитием модуляционной неустойчивости возбуждаемых пучком в плазме ленгмюровских волн и переходом к сильной турбулентности плазмы [2]. Действительно, при образовании в результате квазилинейной релаксации пучковой неустойчивости плато на функции распределения пучка по энергиям плазменным волнам, являющимся накачкой для модуляционной неустойчивости, должно передаться 2/3 первоначальной энергии пучка. Однако из-за малости групповой скорости плазменных волн $v_g \approx 3v_T k r_D \approx 3v_T (v_T/v_b)$ плотность энергии волн еще на начальной гидродинамической стадии релаксации достигает величины $E^2/8\pi n_e T_e \approx (1/3)(n_b/2n_b/2n_e)^{4/3}(W_b/T_e)^2$, превышающей порог модуляционной неустойчивости $(E^2/8\pi n_e T_e)_{th} \approx 3(kr_D)^2$, что дает пороговую зависимость для возникновения модуляционной неустойчивости $n_b/n_e \sim (W_b/T_e)^{-9/4}$, практически совпадающую с экспериментальной.

Модуляционная неустойчивость и коллапс ленгмюровских волн, обеспечивая перекачку волновой энергии в

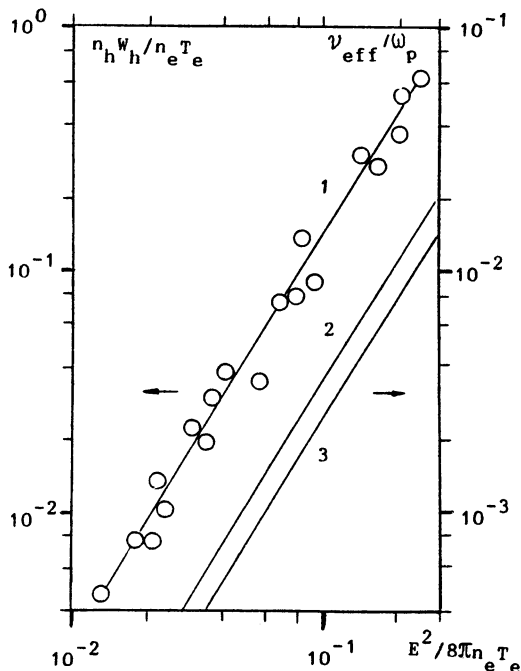


Рис. 3. Зависимость от напряженности поля накачки энергии ускоренных электронов 1 и эффективной частоты столкновений, определенной из равенства $\gamma_b = \nu_{\text{eff}}$ (2) и из измерений энергии ускоренных электронов (3).

область коротких масштабов и поглощение ее электронами в результате затухания Ландау, понижают уровень энергии резонансных с пучком волн до значения, определяемого равенством инкремента пучковой неустойчивости $\gamma_b \approx (n_b/n_e) (v_b/\Delta v_b)$ и эффективной частоты столкновений модуляционной неустойчивости ν_{eff} , существенно затягивая процесс релаксации пучка. Подтверждением коллапса может служить генерация потоков ускоренных электронов, так как модуляционная неустойчивость и коллапс являются эффективным механизмом перекачки энергии из области длинных волн, возбуждаемых пучком, в коротковолновую область поглощения. Другое подтверждение существования коллапса дают результаты измерений напряженности электрического поля в плазме по штарковскому уширению спектральной линии водорода H_β . Оптическое излучение в крыльях линии имеет характер стохастических вспышек, подобных вспышкам радиоизлучения [4]. При $n_b/n_e = 10^{-2}$ и изменении энергии пучка в пределах $W_b/T_e = 60-300$ измеренная напряженность плазменного поля составляет $E^2/8\pi n_e T_e = 1.5 \pm 0.5$.

В предположении, что вся энергия, переданная из накачки в энергию турбулентности, в конечном итоге передается ускоренным электронам из "хвоста" функции распределения, из результатов измерений зависимости энергии ускоренных электронов от накачки в соответствии с уравнением энергетического баланса

$$\nu_{\text{eff}} E^2 / 8\pi n_e T_e = d(n_h W_h) / dt$$

определена средняя за время релаксации эффективная частота столкновений ν_{eff} , значение которой близко к определенному из равенства $\nu_{\text{eff}} = \gamma_b$. Соответствующие зависимости приведены на рис. 3.

Авторы благодарны К.Ф. Сергейчеву за обсуждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-02-04266 а) и Международного научного фонда (грант N4U-300).

Список литературы

- [1] Захаров В.Е. ЖЭТФ. 1972. Т. 62. В. 5. С. 1745-1759.
- [2] Галеев А.А., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д., Шевченко В.И. // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. В. 4 (10). С. 1353-1369.
- [3] Галеев А.А., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д., Шевченко В.И. // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. В. 2. С. 507-517.
- [4] Карфидов Д.М., Рубенчик А.М., Сергейчев К.Ф., Сычев И.А. // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. В. 5 (11). С. 1592-1604.

Институт общей физики РАН
Москва

Поступило в Редакцию
23 октября 1996 г.