

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ УСИЛЕННОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПЛАЗМОЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОСОБОЙ ТОЧКИ

*В.Н.Будников, В.И.Варфоломеев, К.М.Новик,
А.Д.Пилюя, В.В.Рождественский*

Экспериментально наблюдался связанный с линейной трансформацией эффект усиленного рассеяния электромагнитных волн на спонтанных флуктуациях плазмы.

Рассеяние электромагнитных волн на коллективных флуктуациях является потенциально ценным методом диагностики плазмы. Однако, его широкому применению препятствует малая интенсивность рассеянного сигнала и отсутствие источников излучения, позволяющих наблюдать флуктуации с длинами волн порядка дебаевского радиуса. Уже давно было показано теоретически [1] (см. также [2]), что упомянутые трудности можно в значительной степени преодолеть, выбирая усло-

вия эксперимента так, чтобы для зондирующей волны в исследуемом объеме плазмы выполнялось условие гибридного резонанса. В этом случае падающая волна испытывает линейную трансформацию в медленную плазменную волну, которая и рассеивается на флуктуациях. Рассеянная волна трансформируется обратно в электромагнитную моду, излучаемую из плазмы. Из-за увеличения амплитуды падающей и рассеянной волн вблизи точки трансформации интенсивность рассеянного сигнала возрастает на несколько порядков величины, а замедление волны делает рассеяние чувствительным к мелкомасштабным флуктуациям. Этот эффект впервые наблюдался в работе [3]. Однако высокий уровень турбулентности плазмы не позволил однозначно интерпретировать результаты эксперимента. В дальнейшем опыты проводились с искусственным введением в плазму ионно-звуковых колебаний [4]. Целью настоящей работы было экспериментальное наблюдение усиленного рассеяния в относительно спокойной плазме и детальное сравнение результатов с теорией. Опыты проводились на линейной установке [5] (рис. 1) в диапазоне частот $\sqrt{\omega_{He} \omega_{Hi}} < \omega_0 < \omega_{He}$. Плазма создавалась в баллоне, помещенном в однородное магнитное поле $\sim 3 \text{ кэ}$, и поддерживалась за счет поглощения СВЧ мощности трехсантиметрового диапазона длин волн. Рабочим газом служил аргон при давлении $5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$ Зондирующая волна ($\lambda_0 = 12,5 \text{ см}$, $f_0 = 2,4 \text{ Гц}$) подводилась к плазме с помощью волновода. Рассеянный сигнал регистрировался анализатором спектра С4-27.

В условиях опыта плазма была неоднородной как в радиальном, так и в продольном направлении. Когда в месте подведения волновода концентрация на оси трубки превосходила критическую концентрацию n_c для частоты f_0 , в плазме возбуждалась так называемая косая ленгмювская волна (мода Трайвелписа – Гулда). Форма поверхности $n = n_c$, ограничивающей область прозрачности для этой волны, и схема ее распространения в двумерно неоднородном плазменном волноводе изображены на рис. 1. Линейная трансформация имеет место в окрестности особой точки (фокуса) [5, 6].

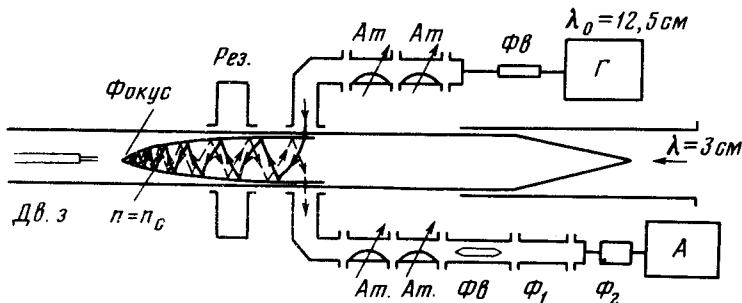


Рис. 1. Схема эксперимента: Γ – генератор, $\Phi В$ – ферритовый вентиль, $Ат$ – аттенюатор, Φ_1 – фильтр для подавления сигнала на частоте f_0 , Φ_2 – фильтр для подавления сигнала трехсантиметровой мощности, $А$ – анализатор спектра, $Рез$ – резонатор, $Дв.з.$ – двойной зонд

Так как в условиях опыта $T_e \gg T_i$, волна с продольным (относительно магнитного поля) замедлением могла рассеиваться на ионно-звуковых флуктуациях, распространяющихся вдоль магнитного поля. Теоретический расчет, проведенный для конкретных условий опыта, приводит к следующему выражению для отношения спектральной плотности мощности p_s рассеянного сигнала к падающей мощности P_0 :

$$\frac{p_s}{P_0} \left(\frac{1}{\nu \omega} \right) = \frac{16}{3} \pi \left(\frac{2\pi}{\omega_{pi}} \right) n_c a r_e^2 \left(\frac{\chi_0}{b} \right) \left(\frac{\chi_0}{r_D} \right)^3 \rho(\Omega) \frac{S(\Omega)}{S_T(\Omega)} \kappa^2, \quad (1)$$

$$\rho(\Omega) = \frac{\alpha y^3}{1 + \alpha y^3} e^{-\gamma y} \frac{y}{x}; \quad y = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}; \quad x = \frac{\Omega}{\omega_{pi}},$$

где ω_{pi} — ионная плазменная частота, a и b — продольный и радиальный масштабы неоднородности плазмы, соответственно, $\chi_0 = c/\omega_0$, r_D —

дебаевский радиус, $\Omega = \omega - \omega_0$, $\alpha = \frac{3}{8} \frac{b}{r_D}$, $\gamma = \frac{\nu}{\omega_0} \frac{a}{r_D}$, ν — частота столкновений электронов с нейтральными атомами, κ — отношение зондирующей мощности, достигающей фокуса, к падающей мощности P_0 (коэффициент связи), $S(\Omega)$ — спектральная плотность ионно-звуковых колебаний в плазме $S_T(\Omega)$ — аналогичная величина для равновесной плазмы.

Согласно (1), усиление рассеяния может составлять $\sim (\chi_0/r_D)^3 \approx 10^8$ раз.

p_s , отн. ед.

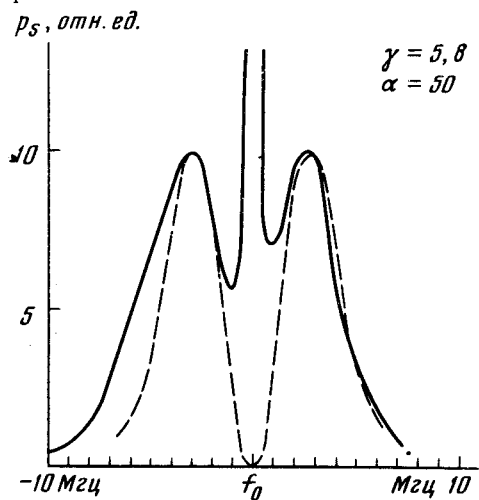


Рис.2. Вид спектра рассеяния: сплошная кривая — эксперимент, $H \sim 3000$ э, $P_0 = 1,6 \cdot 10^{-2}$ вт, $p = 1,8 \cdot 10^{-2}$ ммрт.ст. Пунктирная линия — теоретическая кривая при использовании выражения (1) с $\alpha = 50$, $\gamma = 5,8$

На опыте были зарегистрированы спектры рассеянного сигнала, форма которых достаточно хорошо соответствует выражению (1) при $S(\Omega)/S_T = \text{const}$ (рис.2). Сопоставление формы спектров с (1) дает значения параметров α и γ : $\alpha = 45 \pm 7$; $\gamma = 7 \pm 2$. Согласно зондовым измерениям, $a = 2,5 \div 3,5$ см, $b = 0,4 \div 0,7$ см, $T_e = 1,9 \div 2,3$ эв и соответственно $\alpha = 47 \pm 9$; $\gamma = 11 \pm 6$. Измеренное значение величины p_s/P_0 в максимуме спектра составляло $(7 \pm 2) \cdot 10^{-12}$ вт $^{-1}$. Из формулы (1) при $S(\Omega)/S_T \kappa^2 = 1$ это отношение получается равным $3 \cdot 10^{-12}$ вт $^{-1}$.

При изменении падающей мощности от 10^{-3} до 10^{-1} *вт* форма спектра и отношение p_s / P_o сохранялись неизменными. Дальнейшее увеличение P_o ($P_o > 2 \cdot 10^{-1}$ *вт*) приводило к скачкообразному увеличению рассеянного сигнала \sim в 100 раз, что сопровождалось резким изменением формы спектра (рис.3). Эти явления, по-видимому, обусловлены развитием параметрической неустойчивости.

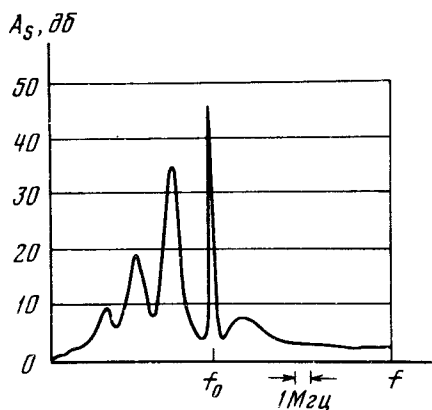


Рис.3. Вид спектра рассеяния при развитии параметрической неустойчивости: $H \sim 3000$ э, $p = 1,6 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст., $P_o \sim 2 \cdot 10^{-1}$ *вт*

Чтобы установить связь наблюдаемого усиленного рассеяния с наличием фокуса, проводились измерения при концентрации под волноводом n , меньшей критической n_c , а также при $n > n_c$, но при однородном распределении концентрации вдоль оси системы. В обоих случаях рассеянный сигнал не был зарегистрирован.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в данном эксперименте при наличии особой точки действительно наблюдалось усиленное рассеяние электромагнитных волн на ионно-звуковых колебаниях с уровнем, близким к тепловому. Использование этого эффекта представляется особенно перспективным при исследовании параметрической турбулентности.

Авторы благодарны А.И.Анисимову, В.Е.Голанту и В.И.Федорову за интерес к работе и стимулирующие обсуждения.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 мая 1978 г.

Литература

- [1] А.Д.Пилия. ЖТФ, 36, 2195, 1966.
- [2] I.Fidone. Phys. Fluids, 16, 1680, 1973; I.Fidone, G.Granata. Phys. Fluids, 16, 1675, 1973.
- [3] I.T.Mendonca, A.B.Zanfagna. J. Phys. Lett., (Paris), 36, L-165, 1975.
- [4] R.Cano, I.Fidone, I.T.Mendonca, B.Zanfagna. Phys. Fluids, 19, 1561, 1976.
- [5] В.И. Архипенко, В.Н.Будников, А.А.Обухов, ЖТФ, 41, 2341, 1971; 43, 113, 1973; 43, 313, 1973.
- [6] А.Д.Пилия, В.И.Федоров, ЖТФ, 46, 1532, 1976.