

КОСЫЕ ЛЕНГМЮРОВСКИЕ СОЛИТОНЫ И ИХ САМОСЖАТИЕ В РЕЖИМЕ "СВОБОДНОГО ПРОБЕГА"

С.В. Антипов, М.В. Незлин, А.С. Трубников

Впервые в замагниченной бесстолкновительной плазме, на ветви волн с линейной дисперсией (1) Трайвелписа – Гоулда, экспериментально обнаружены медленные (\sim неподвижные относительно плазмы) косые ленгмюровские солитоны с ВЧ заполнением, возникающие вследствие модуляционной неустойчивости (самосжатия) нелинейных волн, и их эволюция в режиме "свободного пробега", т. е. после выключения электронного "пучка накачки".

В настоящей работе в отличие от [1а], во-первых измерения проводятся после выключения электронного пучка накачки создающего плазму и возбуж-

дающего в ней электронные волны, во-вторых, диаметр плазменного шнура ($2a = 3$ см) меньше исходной длины волны $\lambda = U_0/f \approx 10$ см ($U_0 \approx 2,5 \cdot 10^9$ см·сек⁻¹ — скорость электронов пучка, $f \approx 2,5 \cdot 10^8$ сек⁻¹ — частота колебаний), и волны являются косыми ленгмюровскими. Методика опытов — прежняя [1], плотность плазмы $n = (3 \div 4) \cdot 10^9$ см⁻³ (ленгмюровская частота $f_p \approx 500$ МГц), продольное магнитное поле $H \approx 2 \cdot 10^3$ Э, электронная температура $T_e = 10 \div 20$ эВ, давление остаточного газа (водород) $p_0 \leq < 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., скорость движения плазмы $(3 \div 6) \cdot 10^6$ см·сек⁻¹, длина плазменного шнура ~ 200 см, плазма — бесстолкновительная [1], энергия электронов пучка $W_1 = 1 \div 2$ кэВ, сила тока $I = 0,5 \div 2,5$ А, плотность пучка $n_1 = (0,1 \div 0,2)n$, длительность импульса пучка ~ 20 мксек. Основные результаты опытов состоят в следующем.

1. В плазме "послесвечения", т. е. после выключения электронного "пучка накачки", в течение очень длительного времени (до 100 — 200 мкс) наблюдаются сгустки косых ленгмюровских волн с частотами $f = 150 \div 350$ МГц $< f_p$, соответствующими моде Трайвелписа — Гоулда:

$$f = f_p \cos \theta = f_p \frac{k_{\parallel}}{(k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2)^{1/2}}, \quad k_{\parallel} = 2\pi/\lambda, \quad k_{\perp} \approx 1/a, \quad (1)$$

где λ — продольная длина волны колебаний. Волновые сгустки имеют продольный размер порядка диаметра плазменного шнура и резко промодулированы по амплитуде с периодами $\lambda_M = 5 - 6$ см $\approx \lambda_0/2$ и $\lambda_M = 10 - 12$ см $\approx \lambda_0$. Это видно из рис. 1 и рис. 2, на которых, наряду с временным ходом плотности плазмы, показаны осциллограммы протектированной огибающей амплитуд ВЧ волн. Указанные пространственные масштабы определяются умножением временных масштабов на скорость движения волновых сгустков; последняя определяется по времени пролета сгустков после окончания импульса пучка (см. рисунки).

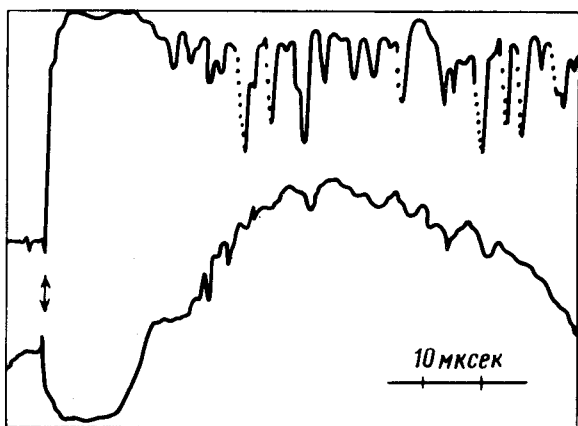


Рис. 1. Осциллограммы индикаторов плотности плазмы (нижняя, отклонение луча вверх) и огибающей амплитуд ВЧ электрического поля волн (верхняя, отклонение луча вниз) [1] на расстоянии 110 см от разрядной камеры источника плазмы. Скорость движения плазмы $v \approx 2 \cdot 10^6$ см·сек⁻¹. Ямки плотности — отклонение луча нижней осциллограммы вниз

2. Модуляция плотности плазмы послесвечения имеет вид ямок и сгущений, приблизительно коррелирующих со сгустками электрического поля волн — рис. 1. Поэтому, основываясь на опыте предыдущих работ [1, 3], наблюдаемые волновые образования можно считать косыми

ленгмюровскими солитонами с ВЧ заполнением (период изменения огибающей \sim на три порядка больше периода ВЧ поля колебаний).

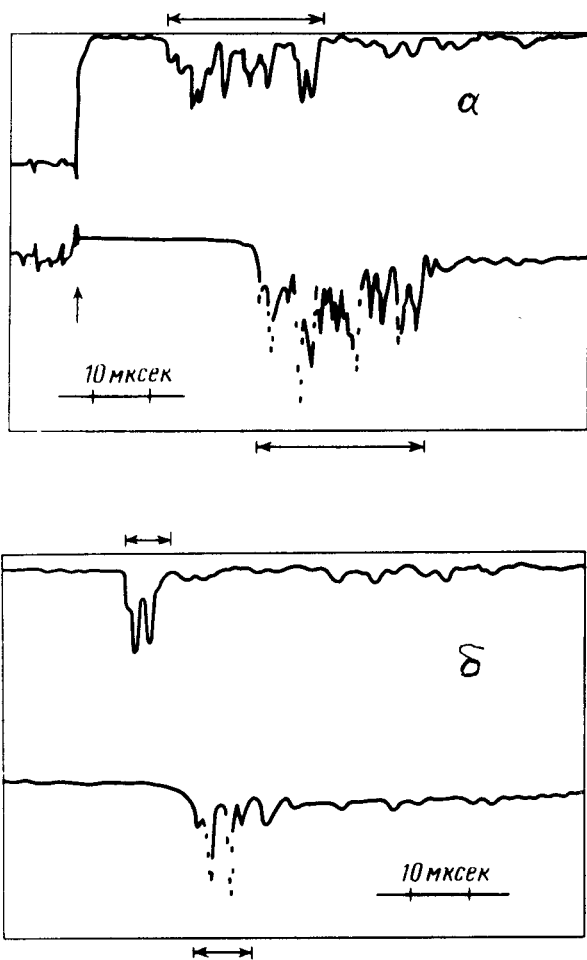


Рис. 2. Развертка 10 мксек/деление

3. Волновые сгустки распространяются без расплывания вдоль магнитного поля, двигаясь вместе с плазмой со скоростью, близкой к скорости ионного звука в атомарном водороде, $C_s = (3 \div 6) \cdot 10^6 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$. Эти выводы получены из сопоставления скорости движения волновых сгустков со скоростью движения плазмы. На рис. 2, *a* – *b* показан временной сдвиг осциллограмм двух одинаковых сетчатых ВЧ зондов, реагирующих на продольные плазменные волны [1], расположенных один от другого на расстоянии 94 см (*a*) и 80 см (*b*) и настроенных на частоту $f = 250 \text{ МГц}$. (Осциллограммы рис. 2 получены в одном "выстреле" пучка, с помощью двух одинаковых приемников колебаний). Видно, что расстояние $80 \div 94 \text{ см}$ волновые сгустки проходят без расплывания за время пролета $\sim 15 \text{ мксек}$, двигаясь вместе с плазмой со скоростью (в среднем) $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$.

4. Наблюдаемые нерасплывающиеся волновые сгустки испытывают временную эволюцию, отчетливо видимую из рис. 2. Так если на верхней осциллограмме рис. 2, а в ряде мест видны лишь "зародыши" пиков поля, то на нижней осциллограмме этого рисунка спустя 18 – 20 мксек в тех же местах плазменного шнура (сместившегося вдоль магнитного поля на 94 см) уже четко наблюдаются сформировавшиеся сгустки электрического поля. Рис. 2, а – пример модуляционной неустойчивости (самосжатия) изучаемых волн, в указанных условиях ее инкремент $\gamma \approx 10^5 \text{сек}^{-1} \approx \frac{m}{M} f_p$, где m и M – массы электрона и протона. Самосжатие волн по мере их движения (вместе с плазмой) вдоль установки отчетливо демонстрируется также рис. 2, б: видно, что с течением времени сгустки поля становятся значительно более узкими и вырисовываются значительно более отчетливо.

6. "Время жизни" τ наблюдаемых косых ленгмюровских солитонов в режиме "свободного пробега" явно больше 20 – 30 мксек ($\sim 10^4$ периодов колебаний).

Таким образом, в отличие от линейных волновых пакетов, которые, во-первых, при дисперсии (1) быстро распространяются в плазме (со скоростью $\sim 10^3 C_s$ и, во-вторых, быстро расплываются – [16], наблюдаемые нелинейные волновые сгустки – косые ленгмюровские солитоны – локализованы в плазме (т. е. если вообще и движутся относительно плазмы, то медленнее C_s , т. е. на три порядка медленнее линейных волн) и не расплываются, т. е. испытывают нелинейное самосжатие [2, 16]. Механизм этого самосжатия, по-видимому, обусловлен так называемой OTSI – разновидностью модуляционной неустойчивости, наблюдавшейся в [1а, 3], и, по-видимому, не связан с критерием Лайтхилла [2, 16].

7. Частотный спектр наблюдаемых солитонов имеет полосу (40 – 50) МГц. Между появлением сгустков колебаний на различных участках частотного спектра наблюдается отчетливый временной сдвиг: колебания более низких частот появляются на удаленном ВЧ зонде существенно позже. Так, на зонд, находящийся на расстоянии ~ 100 см от источника плазмы, волны с частотой 150 МГц приходят \sim на 10 – 12 мксек позже, чем волны с частотой 200 МГц, и приблизительно на 20 мксек позже волн с частотой 250 МГц, и т. д. Этот факт наводит на мысль о каскадной раскатке волн в плазме – в результате коллективных процессов их рассеяния и распадов [2].

Таким образом, в данной работе впервые обнаружены медленные косые ленгмюровские солитоны, возникающие вследствие модуляционной неустойчивости волн на ветви (1) Трайвелписа – Гоулда. Во избежание недоразумений необходимо отметить, что на этой же ветви волн существуют и другие – быстрые – солитоны, наблюдавшиеся в ряде экспериментов [4] и имеющие следующие особенности. Во-первых, они в отличие от медленных солитонов, наблюдавшихся в данной работе, не имеют ВЧ заполнения и возникают не в результате развития модуляционной неустойчивости, а вследствие механизма Кортвега – де Вриза – как солитоны на мелкой воде [2] или ионно-звуковые солитоны [2, 4]. Во-вторых, они движутся со скоростью порядка скорости линейных волн

(1) Трайвелписа – Гоулда, т.е. по меньшей мере на три порядка быстрее, чем медленные солитоны, наблюдавшиеся в настоящей работе.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
3 ноября 1979 г.

Литература

- [1] С.В.Антипов, М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин, А.С.Трубников. а) ЖЭТФ, 76, 1571, 1979; б) ЖЭТФ, 74, 965, 1978.
- [2] Б.Б.Кадомцев. Коллективные явления в плазме. М., изд. Наука, 1976, гл. 3, § 3; гл. 5, § 5.
- [3] A.Y.Wong, V.H.Quon. Phys. Rev. Lett., 34, 1499, 1975.
- [4] а) H.Ikezi, P.J.Barrett, R.V.White, A.Y.Wong. Phys. Fluids, 14, 1997, 1971; б) С.М.Криворучко, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. ЖЭТФ, 67, 2092, 1974; в) В.Д.Федорченко, Ю.П.Мазалов, А.С.Бакай, А.В.Пашенко, Б.Н.Руткевич. Письма в ЖЭТФ, 18, 477, 1973.
-