

ОБМЕН ЭНЕРГИЕЙ МЕЖДУ ПУЧКАМИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ ИХ КОЛЛЕКТИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

М.Д.Габович, А.Н.Найда

В настоящей работе впервые экспериментально наблюдался эффект обмена энергией между пучками заряженных частиц в системе взаимопроникающих пучков положительных и отрицательных ионов, образующих квазинейтральную синтезированную плазму. Разные знаки взаимодействующих частиц позволяют производить раздельный анализ их функций распределения по скорости в одном и том же интервале скоростей (такой анализ в случае заряженных частиц одного знака осуществить невозможно).

Взаимопроникающие пучки положительных и отрицательных ионов водорода с током ~ 2 мА каждый и энергией ~ 13 кэВ проходили через камеру взаимодействия длиной 120 или 220 см, в торце которой располагался анализатор Юза – Рожанского. При неизменной средней скорости пучков $v_0 \approx 1,6 \cdot 10^8$ см/сек можно было изменять их относительную скорость на величину $2\Delta v$ ($\Delta v \ll v_0$), что приводило к усилению колебаний в результате развития сносовой пучковой неустойчивости, линейная стадия которой была исследована в работе [1]; там же описана и экспериментальная установка. На входе в камеру взаимодействия пучки модулировались по скорости с помощью трех сеток так, что $\tilde{v}_1(0) = -\tilde{v}_2(0) = \tilde{v}(0)$ причем амплитуда переменной составляющей скорости $\tilde{v}_0 \ll \Delta v$; модуляция проводилась на частоте $f = 112$ мГц.

На рис.1 приведены осциллограммы, представляющие собой усредненную по времени функцию распределения частиц по энергиям в одном из пучков для трех различных значений Δv : $\Delta v = 0$, $\Delta v > \Delta v_{кр}$ (усиление отсутствует) и $\Delta v = \Delta v_{опт}$ (усиление максимально). Видно, что при оптимальной относительной скорости коллективное взаимодействие приводит к существенному изменению функции распределения. На рис.2 приведены аналогичные распределения для обоих

пучков при $\Delta v = \Delta v_{\text{опт}}$ для различных значений амплитуды начальной модуляции и длины взаимодействия.

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы о характере изменения наблюдаемой функции распределения частиц пучков: 1) при увеличении амплитуды начальной модуляции выше некоторой величины (зависящей от длины взаимодействия L) происходит несимметричное искажение функции распределения каждого из пучков, что свидетельствует о нелинейном характере наблюдаемого колективного взаимодействия; 2) функция распределения каждого из пучков расширяются в сторону энергий второго пучка независимо от знака относительной скорости (так на рис.2,*a* быстрым является пучок отрицательных ионов, а на рис.2,*b* – пучок положительных ионов).

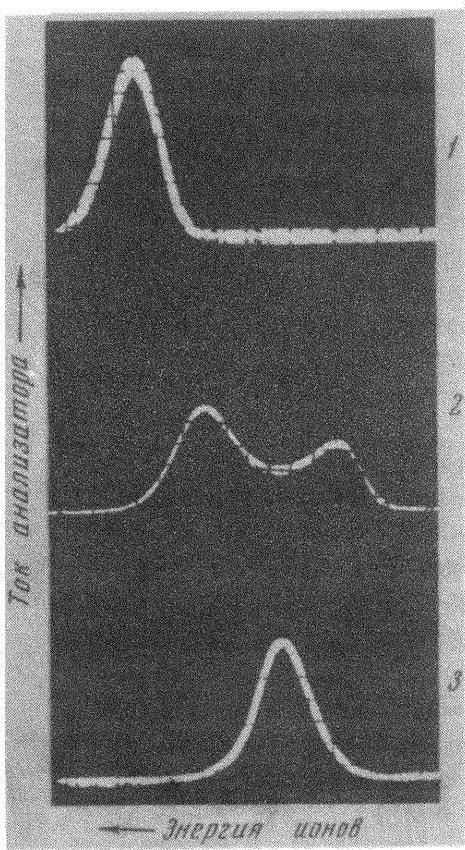


Рис.1. Осциллограммы тока анализа, тока для частиц одного пучка: 1 – $\Delta v > \Delta v_{\text{кр}}$; 2 – $\Delta v = \Delta v_{\text{опт}}$; 3 – $\Delta v = 0$. $L = 220 \text{ см}$, $\tilde{v}_0 / \Delta v_{\text{опт}} = 0,3$

Таким образом, в среднем энергия быстрого пучка уменьшается, а энергия медленного – увеличивается, т.е. происходит обмен энергией между взаимодействующими пучками; 3) при достаточно большой амплитуде начальной модуляции \tilde{v}_0 и большой длине взаимодействия L на функции распределения каждого из пучков образуется второй максимум, положение которого соответствует начальной энергии вто-

рого пучка; с образованием второго максимума спектр энергий частиц пучков несколько сужается.

Сопоставим длину взаимодействия, начиная с которой появляется асимметрия функции распределения, с тем расстоянием z_Φ , на котором должно происходить фазовое группирование частиц пучков с учетом их коллективного взаимодействия. Определим положение фазового фокуса z_Φ из условия $\tilde{v}(z_\Phi) \approx \Delta v$ (см. [2]). (при этом $\tilde{v}_0 \ll \Delta v$), предполагая, что пространственное усиление колебаний вплоть до фазового фокуса происходит по экспоненциальному закону.

$$\tilde{v}(z) \approx \frac{1}{4} \tilde{v}_0 \exp yz$$

с линейным инкрементом $y = 0,5 \omega_p / v_0$ (при $\Delta v = \Delta v_{\text{опт}}$):

$$z_\Psi \approx \frac{2v_0}{\omega_p} \ln \frac{4\Delta v}{\tilde{v}_0}$$

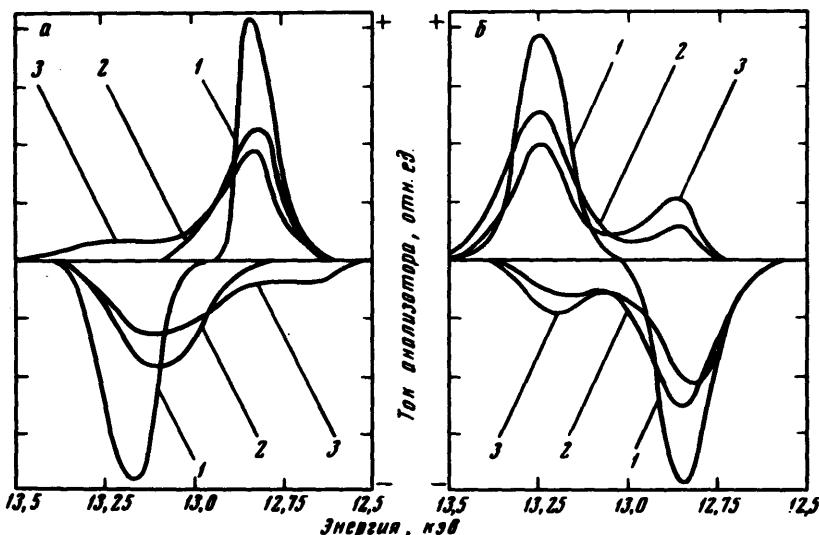


Рис.2. Функции распределения по энергиям частиц обоих пучков при $\Delta v = \Delta v_{\text{опт}}$: 1 – $\tilde{v}_0 / \Delta v = 0$; 2 – $\tilde{v}_0 / \Delta v = 0,15$; 3 – $\tilde{v}_0 / \Delta v = 0,3$; а – $L = 120$ см, б – $L = 220$ см

В условиях нашего эксперимента ($\omega_p = 6,3 \cdot 10^6$ рад/сек, $\tilde{v}_0 / \Delta v = 0,07$) эта оценка приводит к значению $z_\Phi = 200$ см, что удовлетворительно согласуется с экспериментально наблюдаемой длиной $L = 220$ см. Заметим, что изменение энергетического спектра пучков, а также образование второго максимума на функции распределения находится в качественном соответствии с результатами численного расчета задачи о нелинейном взаимодействии двух электронных пучков [3].

Таким образом, наблюдаемый эффект обмена энергией между пучками положительных и отрицательных ионов является следствием не

линейного взаимодействия, возникающего в результате фазовой группировки частиц в процессе развития пучковой неустойчивости.

Институт физики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
29 апреля 1971 г.

Литература

- [1] М.Д.Габович, А.П.Найда. ЖЭТФ, 60, 965, 1971.
 - [2] J.P.Freidberg. Phys. Fluids, 8, 1031, 1965.
 - [3] И.М.Гельфанд, Н. М.Зуева, В.С.Имшенник, О.В.Локуциевский,
В.С.Рябенький, Л.Г.Хазин. ЖВМ и МФ, 7, 322, 1967.
-