

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ ДЕБАЕВСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В СЛАБОНЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

С.А. Майоров, А.Н. Ткачев, С.И. Яковленко

Методом динамики многих частиц исследована зависимость временных корреляционных функций микропотенциала от параметров плазмы. Показано, что дебаевский потенциал является результатом усреднения по промежутку времени, превышающему время пролета среднего межчастичного расстояния. При этом понятие дебаевского потенциала не теряет смысла даже если в дебаевской сфере в среднем находится менее одной частицы.

В /1/ путем численного анализа динамики многих частиц показано, в частности, что дебаевское экранирование имеет место даже в том случае, когда в дебаевской сфере в среднем содержится менее одной частицы. Говоря точнее, средний по времени потенциал электрического поля на расстоянии r от неподвижного заряда хорошо описывается формулой

$$\bar{\varphi}(r) = \varphi_D(r) \equiv (e/r) \exp(-r/r_D), \quad r_D \equiv (8\pi e^2 N/T)^{1/2}, \quad (1)$$

даже если плазма слабонеидеальна, т.е. $n_D = (4\pi/3) r_D^3 N = 0,033/\sqrt{\delta} < 1$, где $\delta = N(e^2/T)^3$ — параметр идеальности, характеризующий отношение средней потенциальной энергии к кинетической; N — плотность частиц одного заряда; T — температура. При этом считается выполненным более мягкий критерий идеальности $\delta < 1$.

В данной работе исследуются временные характеристики формирования дебаевского потенциала. Постановка и метод решения задачи описаны в /1/. Решались уравнения Ньютона для n отрицательно и n положительно заряженных частиц, заключенных в куб со стенками, идеально отражающими частицы, но полностью пропускающими электрические поля. При малых расстояниях между частицами $r < r_0$ сила их взаимодействия считалась постоянной (обычно полагалось $r_0 = 0,05N^{-1/3}$). Длина ребра куба a выбиралась такой, чтобы обеспечить нужную плотность $N = n/a^3$.

Рассматривалась ион-ионная плазма (при этом массы положительно и отрицательно заряженных частиц полагались равными массе протона $m_+ = m_- = m$) и электрон-ионная плазма водорода ($m_- = m_+/1843$). Использовалась разностная схема второго порядка точности. Начальные значения задавались с помощью генератора псевдослучайных чисел: координаты и направления скоростей — случайными; кинетическая энергия — в соответствии с максвелловским распределением при температуре T .

Для исследования временных характеристик микрополя вычислены временные корреляционные функции (КФ) потенциала $\varphi(t)$, создаваемого всеми рассматриваемыми частицами в данной точке $\Phi(r) =$

$$= \int_0^t dt' \varphi(t') \varphi(t' + \tau) / t, \quad \text{где } t \text{ — время наблюдения эволюции системы.}$$

Расчеты показывают (рис. 1), что на различных расстояниях от неподвижного кулоновского центра корреляции распадаются примерно за один и тот же промежуток времени. В слабонеидеальной плазме ($\delta < 1, n_D \lesssim 1$) после распада корреляций значения корреляционной функции близки к квадрату дебаевского потенциала $\Phi(r \rightarrow \infty) \approx \varphi_D^2(r_0)$. Это подтверждает сделанный ранее /1/ вывод о применимости понятия дебаевского потенциала даже при $n_D < 1$.

КФ потенциала для водородной плазмы в отличие от КФ для ион-ионной плазмы имеет два характерных времени спада. Быстрый спад связан с электронным движением; медленный спад, образующий как бы "пьедестал", определяется движением ионов (рис. 1г).

Для выявления связи характерного времени распада корреляций с конкретными физическими процессами проведена серия расчетов КФ потенциала в центре куба (в отсутствие неподвижного заряда) для ион-ионной и водородной плазм. В результате каждого расчета определялось время полураспада корреля-

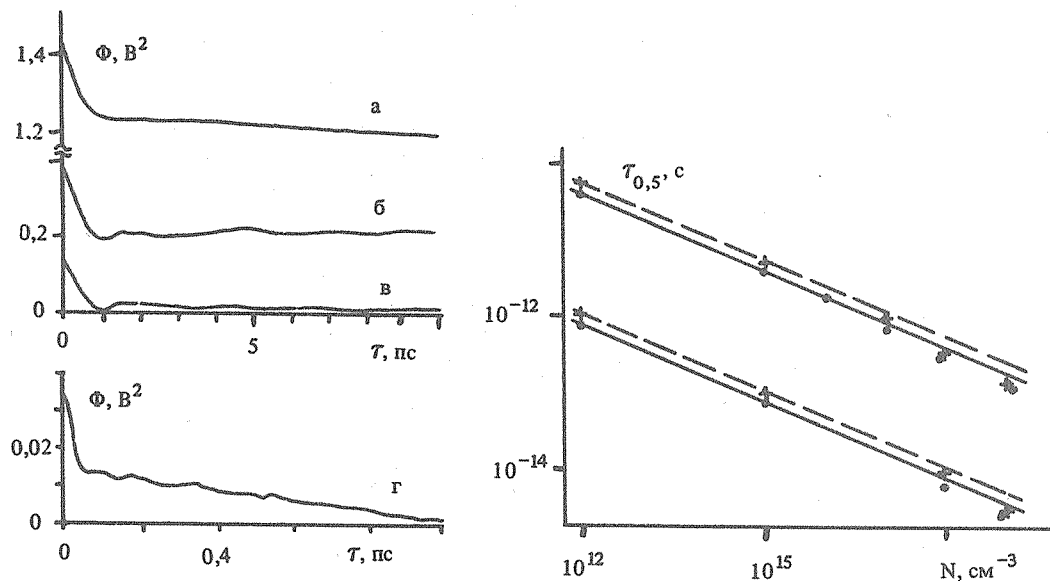


Рис. 1. Временная корреляционная функция микропотенциала на различных расстояниях $0,2r_D$ (а); $0,4r_D$ (б); r_D (в) от неподвижного кулоновского центра (ион-ионная плазма, $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T = 1 \text{ эВ}$, $t = 100 \text{ пс}$, $2n = 54$); г) – водородная плазма в отсутствие неподвижного заряда ($2n = 54$, $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T = 1 \text{ эВ}$).

Рис. 2. Зависимость времени полураспада корреляций микропотенциала от плотности плазмы для $T = 0,5 \text{ эВ}$ (+); 1 эВ (•) при $2n = 54$. Сплошные и пунктирные линии соответствуют закону $\tau_{0,5} \propto N^{-1/3}$.

ций $\tau_{0,5}$, т.е. время, соответствующее полувысоте корреляционной функции. Для водородной плазмы полувысота отсчитывалась от пьедестала (рис. 1г).

Расчеты показывают (рис. 2), что в слабонеидеальной плазме время распада корреляций соответствует времени пролета частицами среднего межчастичного расстояния. Поэтому $\tau_{0,5} \propto N^{-1/3}$, а отношение времен полураспада для ион-ионной и водородной плазм составляет $(2N)^{1/3} \sqrt{m/N^{1/3}} \sqrt{m_e} \approx 53$. В области параметров плазмы, где $n_D < 0,2$, наблюдается заметное отклонение от закона $\tau_{0,5} \propto N^{-1/3}$, что связано с существенной корреляцией движения частиц. Это сказывается и на распределениях мгновенных значений микрополей $1/$.

Таким образом, используемый обычно критерий применимости дебаевского рассмотрения, $n_D \gg 1$, не является ни необходимым, ни достаточным. С одной стороны, дебаевский потенциал имеет смысл при $n_D \lesssim 1$; с другой стороны, даже при $n_D \gg 1$ он возникает лишь в результате усреднения по некоторому промежутку времени, который должен превышать время распада корреляций. Последнее определяется (в слабонеидеальной плазме) не ленгмювским временем $1/\omega_L = \sqrt{m_e/4\pi e^2 N}$, а временем пролета межчастичного расстояния $\sqrt{m_e/2T} N^{-1/3}$. Известно, что время пролета межчастичного расстояния определяет характерное время изменения ионного микрополя $1/2, 3/$, однако при рассмотрении плазменных микрополей часто предполагают, что дебаевская экранировка устанавливается за время ленгмювского колебания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров С. А., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Препринт ИОФАН № 90, М., 1987.
2. Chandrasekhar S., von Neumann J. *Astrophys. J.*, 95, 489 (1942); 97, 1 (1943).
3. Cogan V. I., Seidovkin A. D. *Beitr. Plasma Phys.*, 9, 199 (1969).

Поступила в редакцию 31 августа 1987 г.