



*Объединенный Институт Высоких Температур РАН
Московский физико-технический институт (ГУ)*

**Определение параметров потенциала
межчастичного взаимодействия в плазменно-
пылевых структурах приэлектродного слоя
высокочастотного разряда**

Лисин Е.А., Ваулина О.С., Гавриков А.В., Петров О.Ф., Фортов В.Е.

Взаимодействие

Электростатическое отталкивание:

- $\varphi(l) = \frac{Z_p e}{l} \exp\left(-\frac{l}{\lambda_D}\right), \quad l_1 < l < l_2$
- $\varphi(l) \approx \frac{eZ_p a}{2l^2}, \quad l > l_2, \quad l_2 \approx \ln\left(\frac{\lambda_D}{a}\right) \lambda_D$
- $\varphi(l) \approx \frac{eZ_p}{l} \left(\frac{\lambda_D}{\lambda_{D_i}}\right)^2, \quad l_i/\lambda_D \ll 1$
- $\varphi(l) \propto l^{-3}, \quad l \gg \lambda_D$

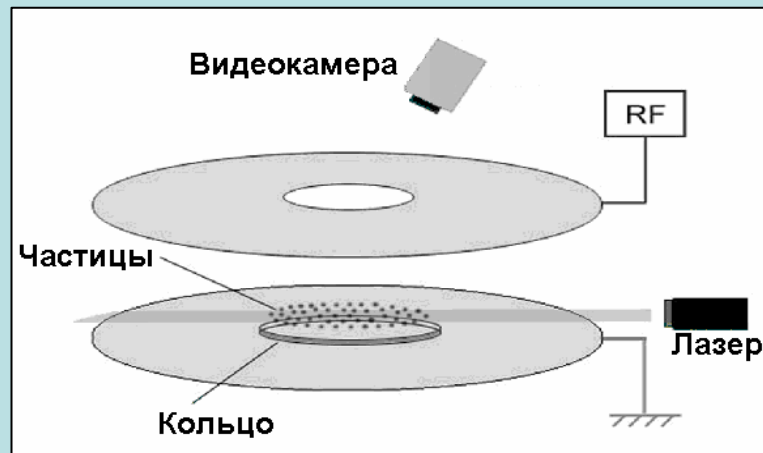
Притяжение:

- “wake-”
- $F_{shadow}(l) \propto l^{-2}$

Особенности

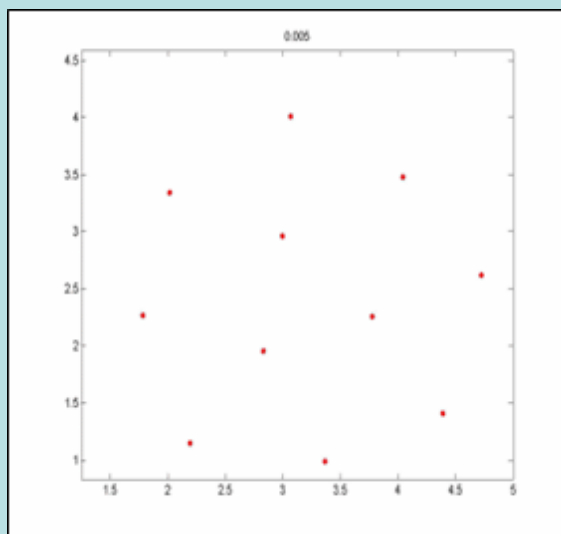
1. позволяет восстанавливать сразу несколько параметров плазменно-пылевых систем в лабораторной плазме:
 - потенциал парного межчастичного взаимодействия
 - коэффициенты трения частиц о нейтралы окружающего газа
 - параметры внешнего удерживающего потенциала ловушки
2. широкий пространственный диапазон восстановления потенциала и параметров поля ловушки:
 $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$, $g(l_{\min}) \neq 0$, $F(l_p)/F(l_{\max}) \leq 100-200$
(по результатам анализа численных экспериментов)
3. эффективен для систем, как жидкостного так и кристаллического типа, состоящих из любого количества пылевых частиц: $N_p \geq 2$
4. основан только на анализе смещений координат частиц, которые легко фиксируются как в численных, так и в реальных экспериментах
5. является пассивным методом диагностики параметров плазменно-пылевых систем, не вносящим возмущений в исследуемую систему
6. не требует априорных предположений о формах парного потенциала и ловушки или о связях потенциала с парной корреляционной функцией.

Экспериментальные данные

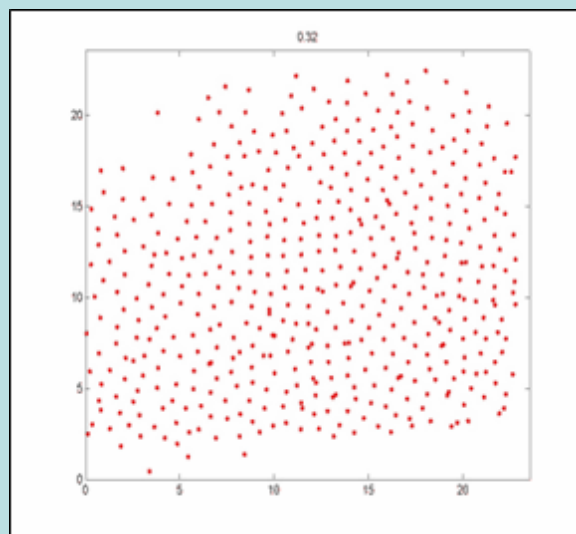


$P = 0.01-0.06$ Торр
 $a_p = 2.75$ и 6.37 мкм
 $L_p \sim 750 - 1200$ мкм

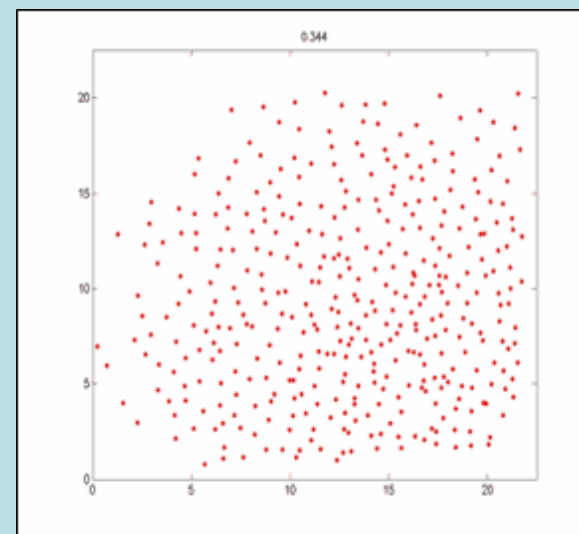
$t_{\text{exp}} = 8-14$ с
 $f_{\text{vc}} = 200-500$ с $^{-1}$



Кластер (11 частиц, $P=0.03$ Торр)



Фрагмент пылевого монослоя
(~550 частиц, $P=0.045$ Торр)



Фрагмент многослойной структуры
(~450 частиц $P=0.022$ Торр)

Алгоритм

1. Идентификация и определение координат частиц $\vec{l}_k(t)$ по анализу видеозаписи

2. Вычисление скоростей $\vec{V}_k(t_m)$ и ускорений $\vec{a}_k(t_m)$ частиц по координатам $\vec{l}_k(t_m)$

3. Расчет силы, действующей на k -ю частицу со стороны остальных частиц

$$\text{Аппроксимация силы: } F = \sum_{i=1}^{I_p} \{a_i l^{-(i+1)} + b_i l^{-i} \exp(\kappa l / l_p)\}$$

в частности: - обратный полином ($b_i = 0, I_p = 4$);

- нелинейная экспоненциальная функция ($a_i = 0, I_p = 4$);

- комбинированная функция ($a_i \neq 0, b_i \neq 0, I_p = 4$)

$$\text{Суммарная сила: } \vec{F}_{pp}^k = \sum_{j=1, j \neq k}^{N_d-1} \sum_{i=1}^{I_p} \{a_i + b_i l_{kj} \exp(-\kappa l_{kj} / l_p)\} \frac{\vec{l}_k - \vec{l}_j}{l_{kj}^{i+2}}$$

4. Аппроксимация внешней удерживающей силы (ловушки)

$$\vec{F}_{pt}^k = \sum_{i=1}^{I_t} b_i r^{i-1} \vec{r}_k$$

5. Поиск неизвестных коэффициентов k, a_i, b_i и v_{fr} переопределенной системы

$$M\vec{a}_{km} = -v_{fr} M\vec{V}_{km} + \vec{F}_{pp}^{km} + \vec{F}_{pt}^{km}$$

$$\text{используя процедуру минимизации } S \equiv \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{m=1}^{N_c} (M\vec{a}_{km} + v_{fr} M\vec{V}_{km} - \vec{F}_{pp}^{km} - \vec{F}_{pt}^{km})^2 = \min$$

Возможности систем видеонаблюдения

- Ограничение частоты кадров снизу (временное разрешение): $f_{\text{cam}}^{\text{min}} = \max\{3\nu_{\text{fr}}, 2\omega^*\}$
- Ограничение частоты кадров сверху (пространственное разрешение):

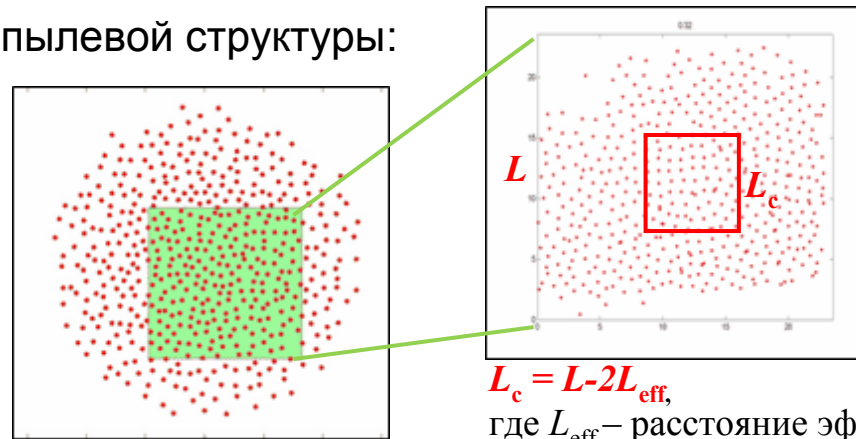
пиксель $\delta l < (T/M)^{1/2} f_{\text{cam}}^{-1} \approx \omega^* l_p f_{\text{cam}}^{-1} (3\pi/\{4\Gamma^*\})^{1/2}$, тогда $f_{\text{cam}}^{\text{max}} = \omega^* \delta_l^{-1} (3\pi/\{4\Gamma^*\})^{1/2}$ для фикс. $\delta_l = \delta/l_p$

Пример: для $\xi = \omega^*/\nu_{\text{fr}} \geq 1$ и $\delta_l = 0.005$

$$[f_{\text{cam}}^{\text{min}}; f_{\text{cam}}^{\text{max}}] = [2\omega^*; 112\omega^*] \text{ для } \Gamma^* = 7.5,$$

$$[f_{\text{cam}}^{\text{min}}; f_{\text{cam}}^{\text{max}}] = [2\omega^*; 23\omega^*] \text{ для } \Gamma^* = 180$$

- Регистрация фрагмента пылевой структуры:

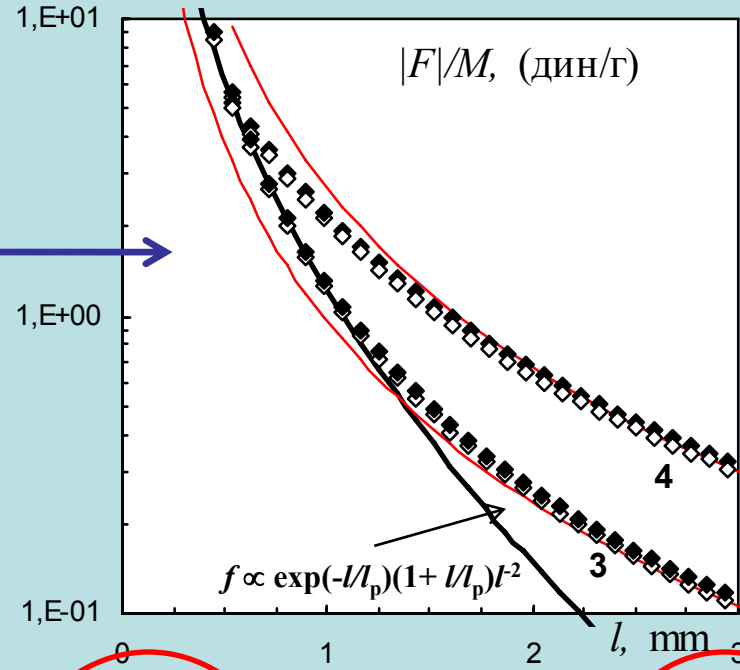
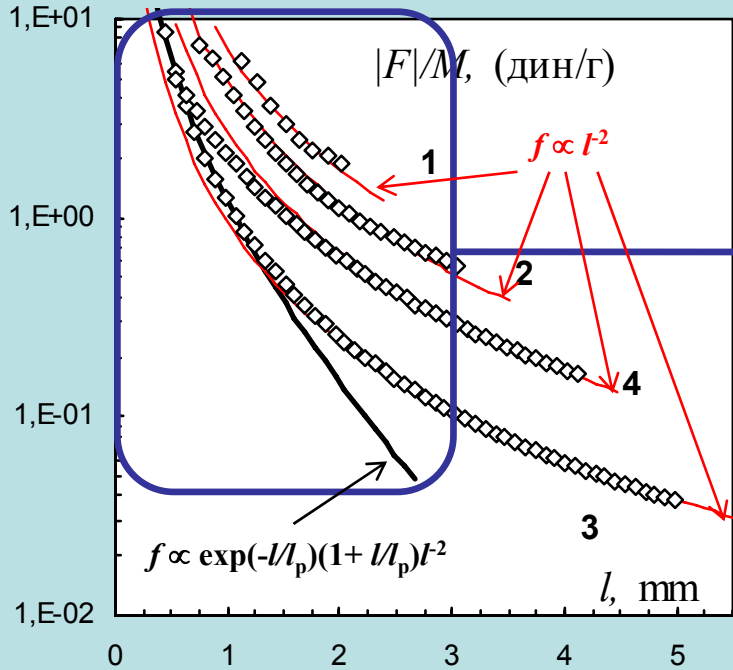


$L_c = L - 2L_{\text{eff}}$,
где L_{eff} – расстояние эффективного затухания $F(l)$

- «Мигание» частиц

ν_{fr} – коэффициент трения, $\omega^* = [|\varphi''(l_p)| / (\pi M)]^{1/2}$ – характерная частота столкновений,
 $\Gamma^* = 1.5 l_{\text{pm}}^2 |\varphi''(l_{\text{pm}})| / (2T)$ – эффективный параметр неидеальности

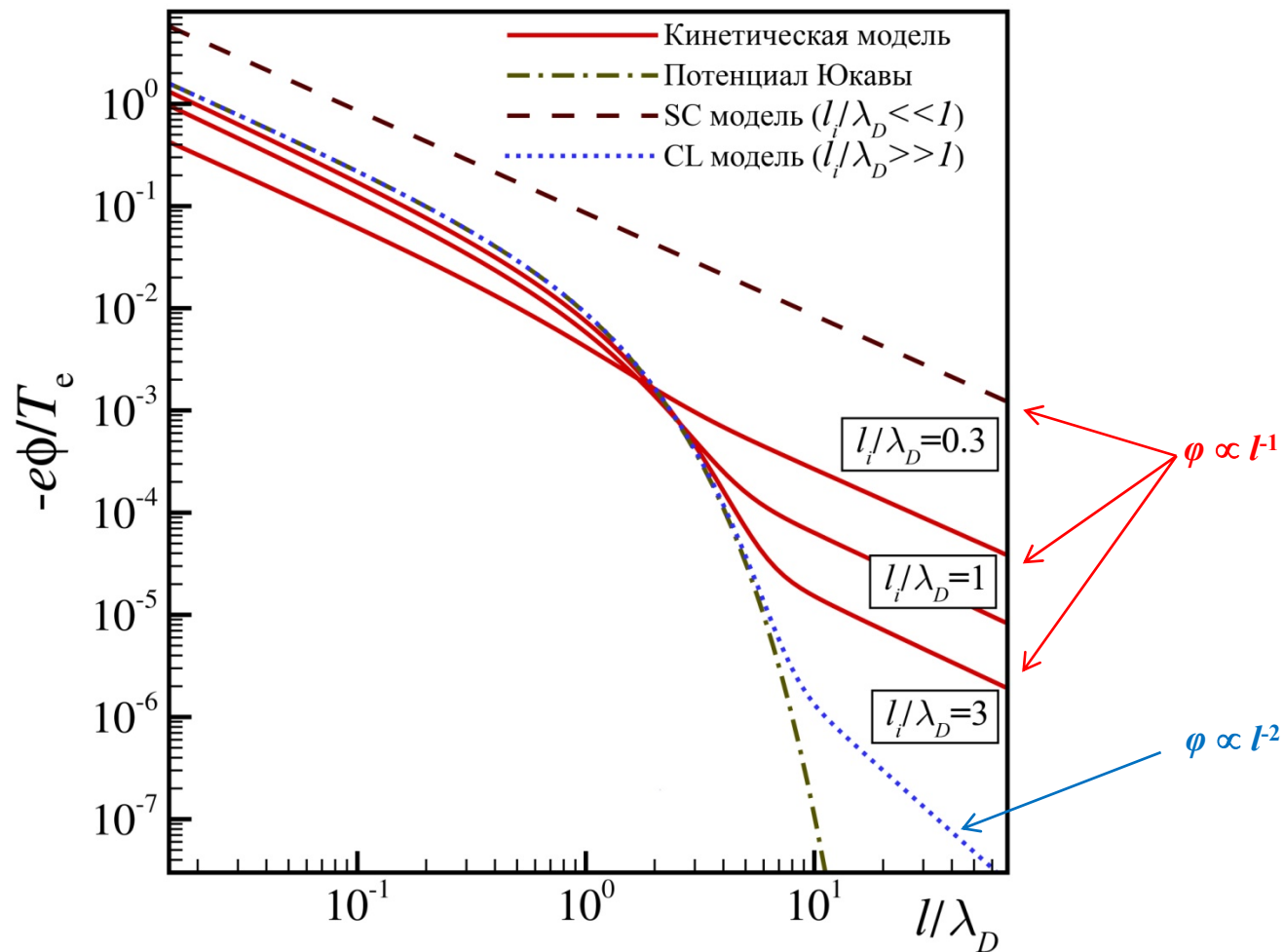
Восстановление параметров взаимодействия



№	N_p	Γ^*	v_{fr}, s^{-1}	ω_{c1}, s^{-1}	ω_{c2}, s^{-1}	$Z/1000$	$\alpha_1, sm^{-1}s^{-2}$	$\alpha_2, sm^{-1}s^{-2}$
1 – кластер	11	~366	3.5±0.2	4.9±0.2	5.1±0.3	23.5±0.5	100	93
2 – кластер	29	~420	8.1±0.6	5.9±0.2	6.1 ±0.3	18.6±0.2	94	99
3 – монослойная стр.	~500(~2000)	~45	13 ± 1	3.4±0.15	3.6 ±0.3	2.98±0.2	7.2	5.8-6.6
4 – многослойная стр.	~500(~2000)	~4.2	7.8±0.4	4.4±0.2	2.7 ±0.2	2.87±0.7	26.2	-

$\omega_{1c}, \alpha_2, v_{fr} - \left\{ \begin{array}{l} \text{O. S. Vaulina, X.G. Adamovich, O. F. Petrov, V. E. Fortov, Phys. Rev. E 77, 066404 (2008)} \\ \text{O S Vaulina, X G Koss (Adamovich) and S V Vladimirov, Phys. Scr. 79, 035501, 2009} \\ \text{O. S. Vaulina, O. F. Petrov, A. V. Gavrikov, V. E. Fortov, Plasma Physics Reports 33, 278 (2007).} \end{array} \right.$

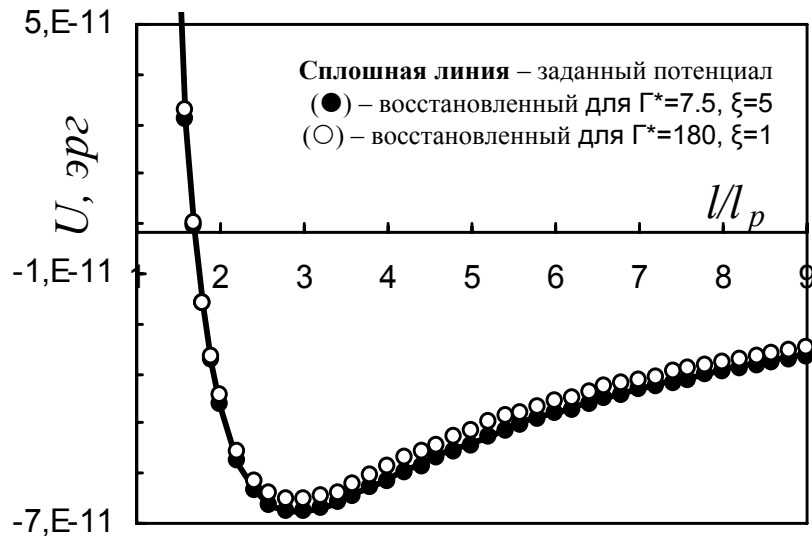
Теория



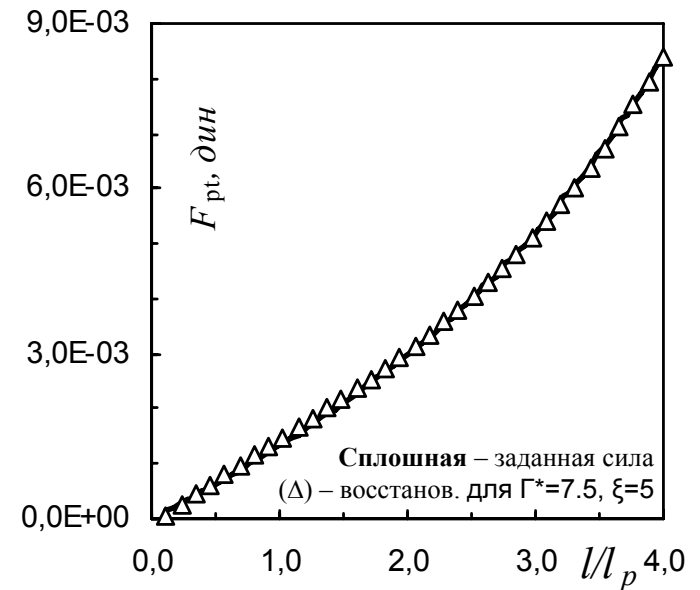
Система из 50 частиц с притяжением

Потенциал

$$U = A/l \exp(-l/l_p) + B/l^2 + C/l, \quad A > 0, B < 0, C < 0$$



Сила ловушки



$\Gamma^* = 1.5 l_{pm}^2 |\varphi''(l_{pm})| / (2T)$ – эффективный параметр неидеальности,
 $\xi = \omega^* = [|\varphi''(l_p)| / (\pi M)]^{1/2} / \nu_{fr}$ – параметр масштабирования, ν_{fr} – коэффициент трения

Итоги

1. Представлены результаты первой экспериментальной апробации метода для анализа взаимодействия пылевых частиц в лабораторной плазме емкостного высокочастотного (вч-) разряда.
2. Рассмотрены некоторые особенности применения заявленной методики для диагностики плазменно-пылевых систем в условиях реальных лабораторных экспериментов, обусловленные техническими параметрами используемых систем видеонаблюдения, такими как визуализация части пылевого облака, а также временное и пространственное разрешение движения частиц. Получены эмпирические соотношения для определения границ и условий работы метода.
3. Выполнено сравнение восстановленных параметров системы с величинами, вычисленными независимыми способами.

Ваулина, Лисин, Физика плазмы, 35, 7 (2009)

Vaulina, Lisin, Gavrikov, Petrov, Fortov, Phys. Rev. Letters, 103, 035003 (2009)

Vaulina, Lisin, Phys. Plas. 16, 113702 2009

Ваулина, Лисин, Гавриков, Петров, Фортов, ЖЭТФ (2010)