

Разогрев движения пылевых частиц в плазме газового разряда

Г.Э. Норман, А.В. Тимофеев

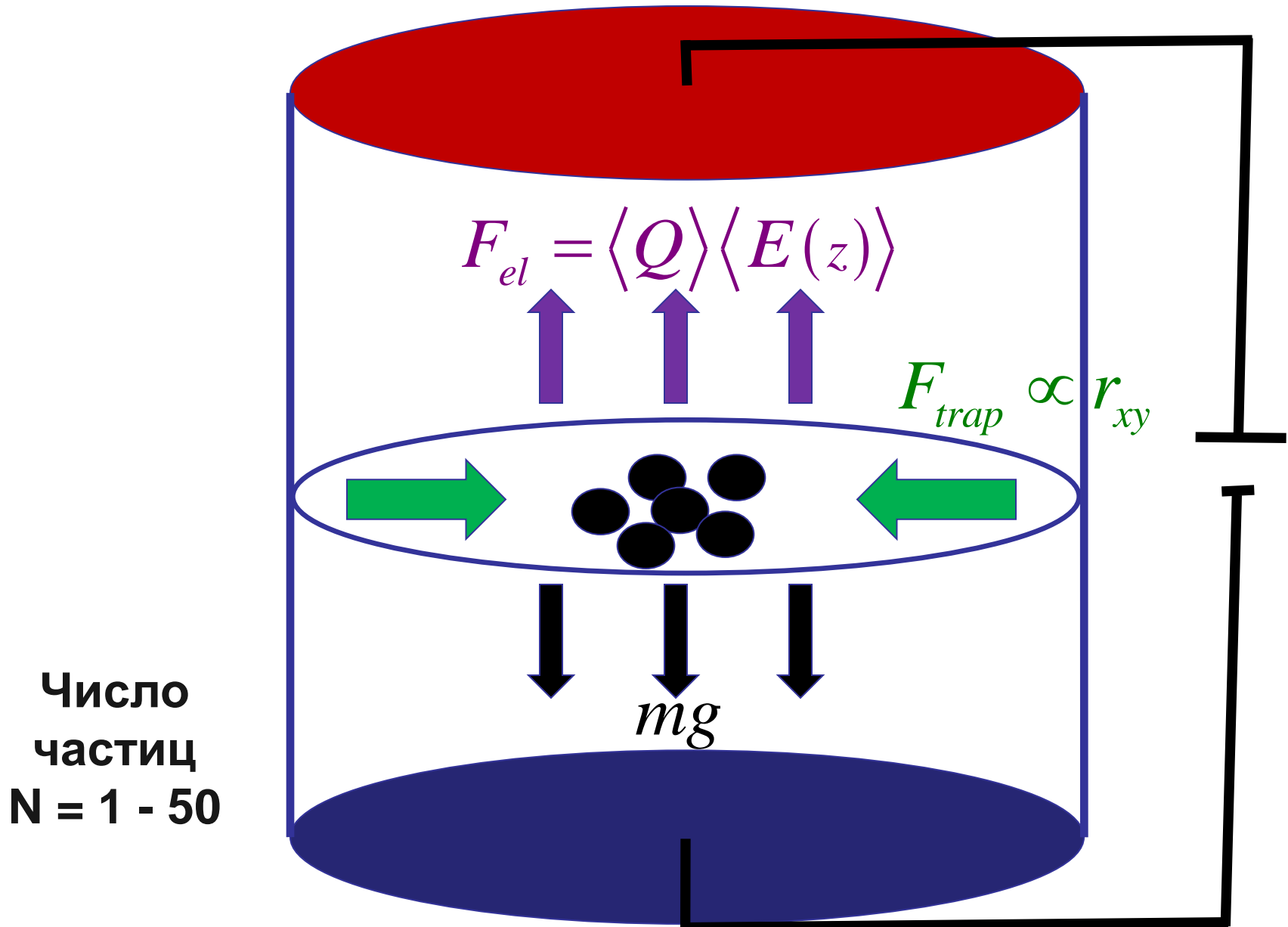
*Научно-координационная Сессия
"Исследования неидеальной плазмы"*



24 ноября 2011
Москва



Пылевые частицы в плазме приэлектродного слоя газового разряда



Содержание

- Уравнения движения пылевых частиц
- МД моделирование
- Передача энергии от вертикальных
к горизонтальным колебаниям
- Температура
- Сравнение с экспериментом
- Выводы

Система уравнений движения пылевых частиц

Система уравнений движения пылевых частиц в приэлектродном слое газоразрядной плазмы

$$m\ddot{\vec{r}}_i = \vec{F}_{inter} +$$

(Interaction force)

$$+ \vec{F}_{friction} + \vec{F}_{grav} +$$

(friction force and gravity)

$$+ Q \cdot \left(\vec{E}_{trap} + \vec{E}(z) \right) \dots,$$

(near-electrode layer influence on charge)

$$i = 1, \dots, N$$

Флуктуации заряда
пылевой частицы

$$Q = Q(t)$$

Возбуждение колебаний
по осям x, y и z

$$Q = Q(z)$$

$$Q = Q(\Delta r)$$

$$\vec{E} = \vec{E}(z) \quad \begin{array}{l} n_e = n_e(z) \\ n_i = n_i(z) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n_e = n_e(\Delta r) \\ n_i = n_i(\Delta r) \end{array}$$

Приэлектродный слой

Большой заряд

Вертикальное электрическое поле,
усреднённое по времени $\vec{E}(z) \approx \vec{E}_0(1 + e'_z z)$

Заряд пылевой частицы

$$Q_i(z, r_{xy}, t) \approx Q_0(1 + q'_z z + \sum q'_r f(\Delta \vec{r}_{ij}) + \delta q(t))$$

$$\langle \delta q(t) \delta q(t') \rangle = \langle \delta q^2 \rangle \exp(-\Omega t)$$

q'_z – normalized charge gradient due to vertical position

q'_r – normalized charge gradient due to interparticle distance

$$f(\Delta r_{ij}) = 1 - \frac{\Delta r_{ij}}{\langle \Delta r_{ij} \rangle}$$

Силы, зависящие от заряда пылевых частиц

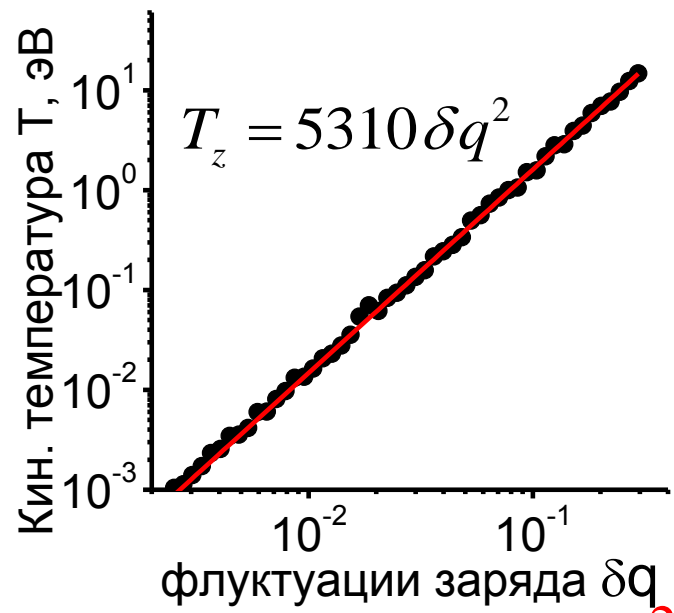
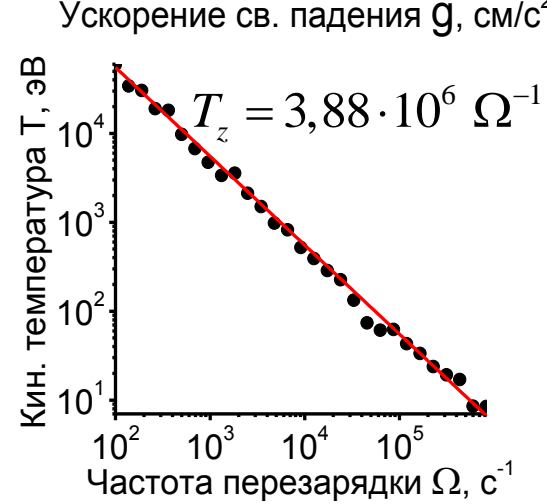
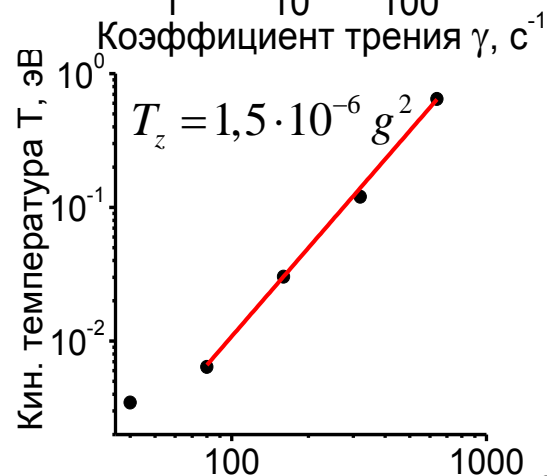
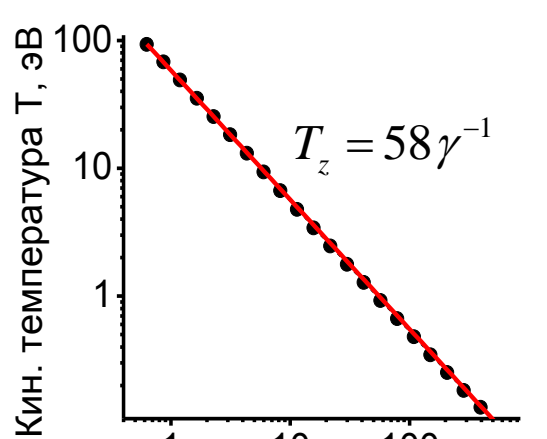
$$U_{inter}(\Delta r_{ij}) = \frac{Q_i(z_i, r_{xy,i}, t) \cdot Q_j(z_j, r_{xy,j}, t)}{\Delta r_{ij}} e^{-k\Delta r_{ij}}$$

$$\vec{F}_{el}(\vec{r}_i) = Q_i(z_i, r_{xy,i}, t) \cdot \vec{E}(z_i)$$

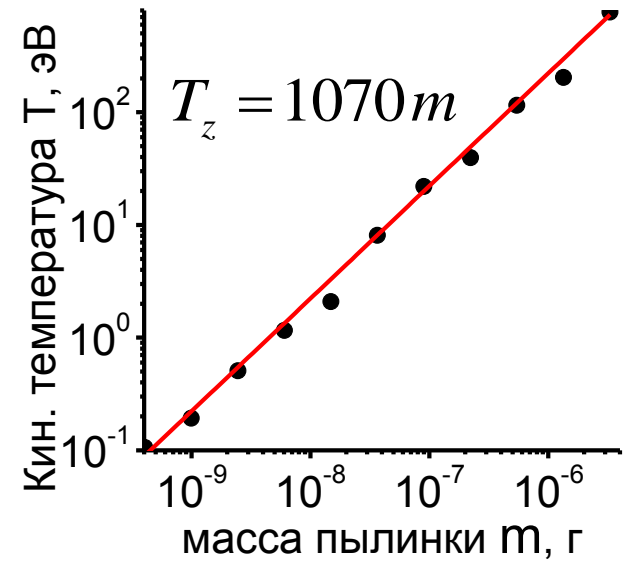
$$\vec{F}_{trap}(\vec{r}_i) = -2Q_i(z_i, r_{xy,i}, t)\varepsilon \cdot \vec{r}_{xy,i}$$

$$\vec{r}_i = \{\vec{r}_{xy,i}, z_i\}$$

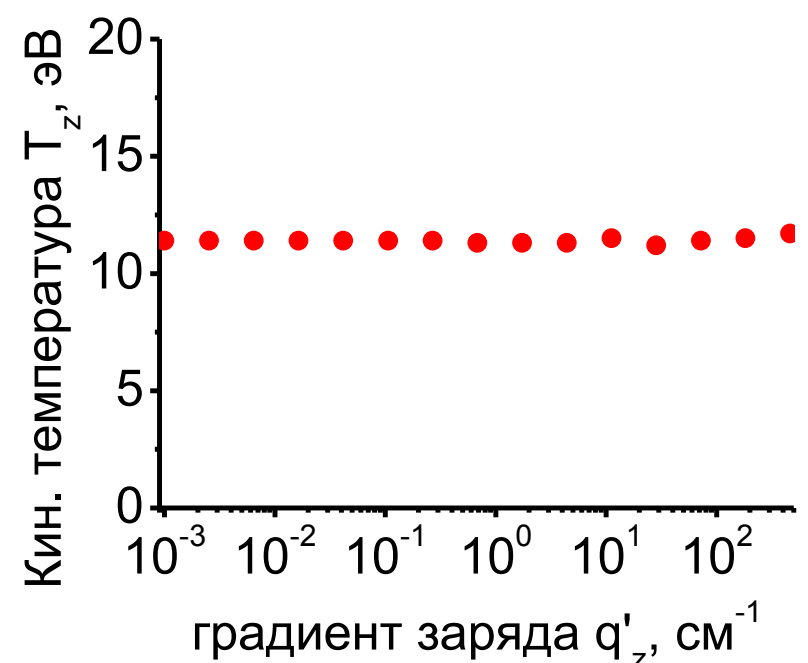
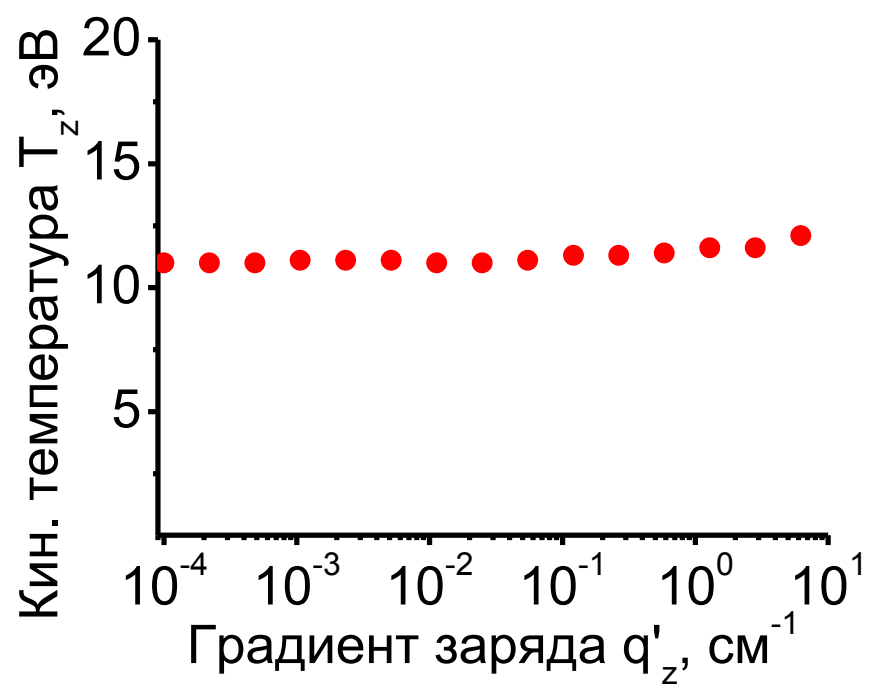
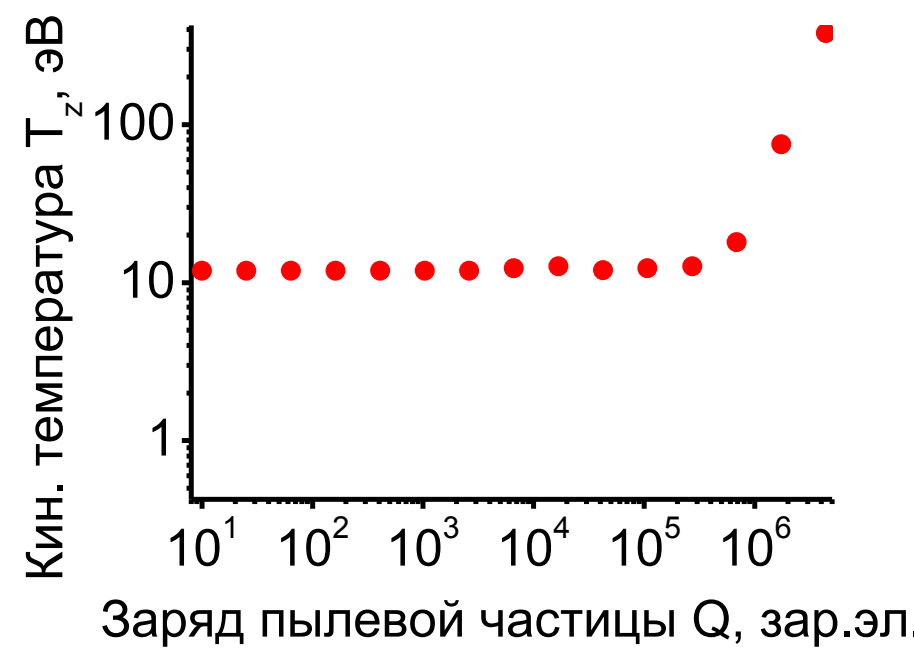
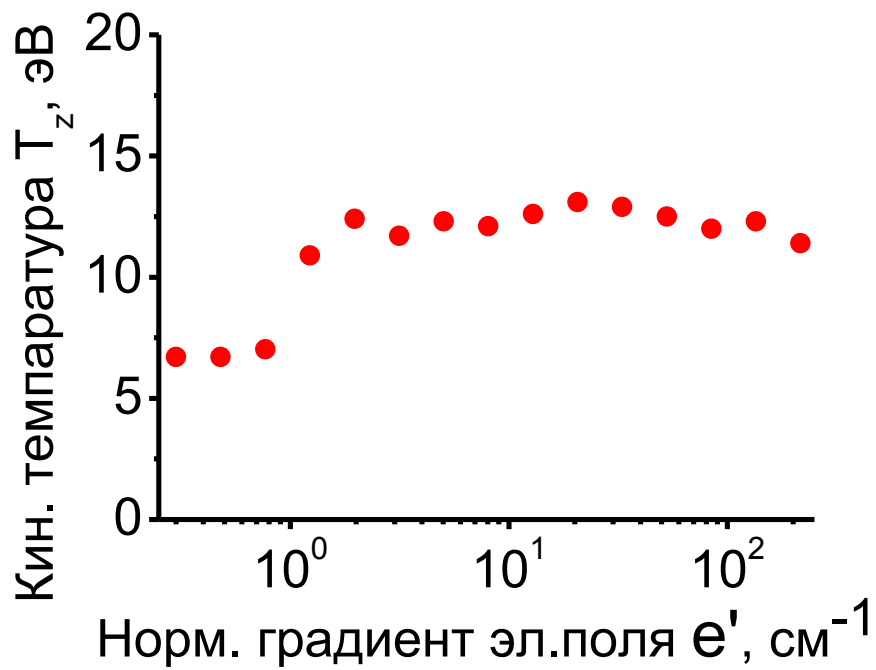
МД моделирование.



$$T_z \approx T_n + m \frac{(g \cdot \delta q)^2}{\gamma \cdot \Omega}$$



- $a = 4 \text{ мкм}$
- $\rho = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$
- $g = 980 \text{ см}/\text{с}^2$
- $e' = -40 \text{ см}^{-1}$
- $q'_z = 0,1 \text{ см}^{-1}$
- $q'_r = -0,1 \text{ см}^{-1}$
- $Q_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ зар.эл.}$
- $\delta q = 0,011$
- $\Omega = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$
- $\gamma = 1 \text{ с}^{-1}$
- $\kappa = 10 \text{ см}^{-1}$
- $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-2} \text{ ед.СГСЭ}$
- $dt = 10^{-6} \text{ с}$
- $N = 3 \text{ и } 11$



Формулы

кин. энергии, параметра неидеальности,
ср. межчастичного расстояния от параметров системы

$$T_z \approx T_n + a(N) \cdot m \frac{(g \cdot \delta q)^2}{\gamma \cdot \Omega}$$

$$\Gamma \approx 1 + (13 \pm 1) \cdot N^{0.7} \varepsilon^{0.5} Q^{1.5} (\gamma \cdot \Omega / m (g \cdot \delta q)^2) / (\kappa + 24)$$

$$\Gamma \approx 1 + (2.1 \pm 0.2) \cdot N^{0.7} \varepsilon^{0.65} Q^{1.33} (\gamma \cdot \Omega / m (g \cdot \delta q)^2) / (\kappa + 27)$$

$$\Gamma \approx 1 + (8.4 \pm 0.8) \cdot N^{0.8} \varepsilon^{0.53} Q^{1.5} (\gamma \cdot \Omega / m (g \cdot \delta q)^2) / (\kappa + 40)$$

$$K_{cm} \approx (1.0 \pm 0.1) N^{-1} \left(T_n + m \frac{(g \cdot \delta q)^2}{\gamma \cdot \Omega} \right)$$

$$\langle \Delta r_{ij} \rangle \approx (0.36 \pm 0.02) \cdot N^{-0.22} Q^{0.3} \varepsilon^{-0.3} / (\kappa + 156)$$

$$\langle \Delta r_{ij} \rangle \approx (0.8 \pm 0.1) \cdot Q^{0.17} \varepsilon^{-0.3} / (\kappa + 169)$$

$$\langle \Delta r_{ij} \rangle \approx (37 \pm 2) \cdot Q^{0.2} \varepsilon^{-0.25} / (\kappa + 231)$$

Анализ системы уравнений движения пылевых частиц

**Передача энергии
от вертикальных колебаний
к горизонтальным колебаниям**

Передача энергии от вертикальных колебаний к горизонтальным (№3)

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = \Sigma F_{inter} + F_{trap} + F_{friction} + \dots \\ m\ddot{z} = \Sigma F_{inter} + F_{el} + F_{friction} + F_{grav} \dots \end{array} \right.$$

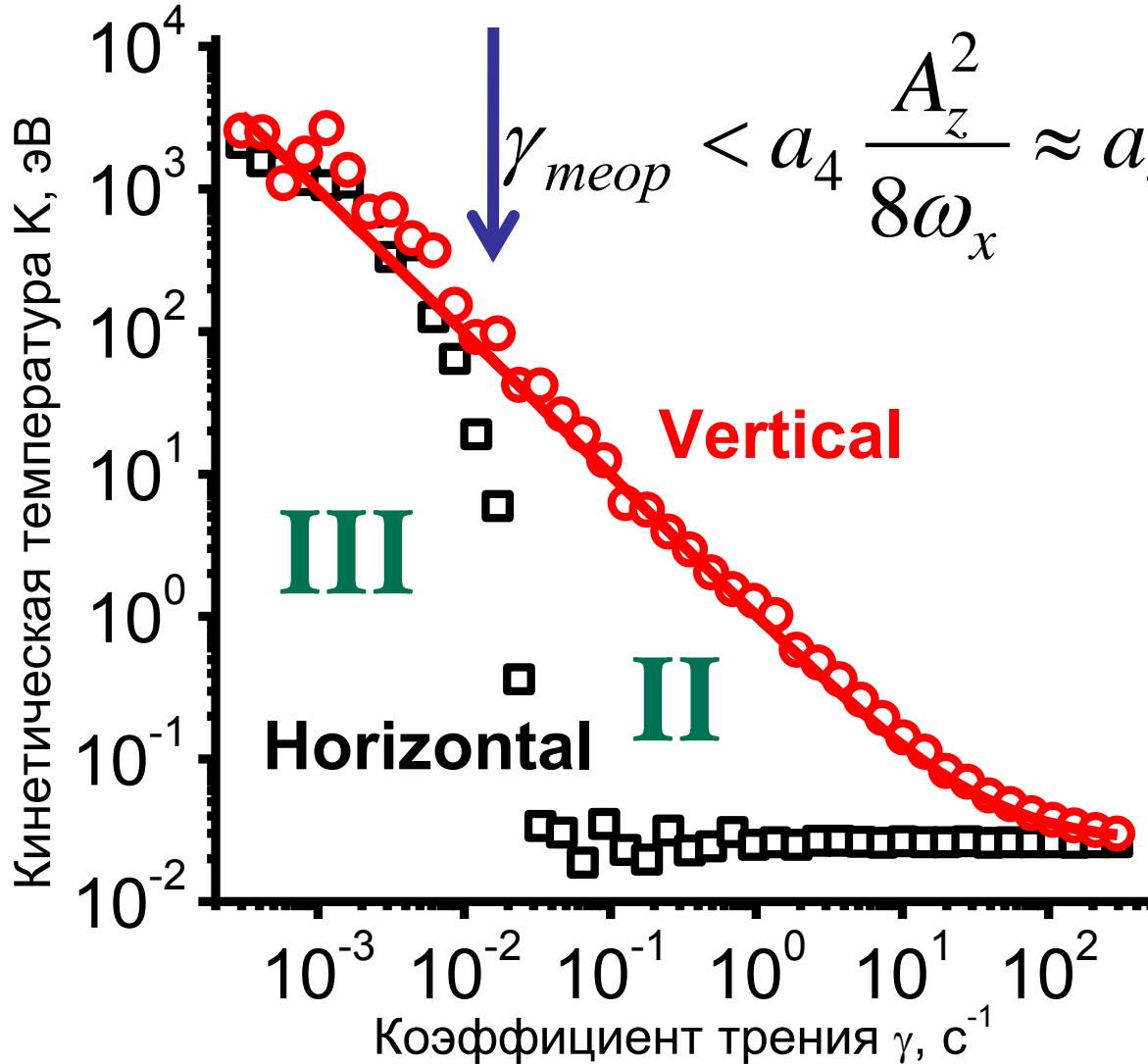
$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -a_1 x + \dots + a_4 x z^2 + \dots \approx -\omega_x^2 (1 - h_x \cos \omega_z t) \dots \\ \ddot{z} = -b_1 z + \dots + b_4 z x^2 + \dots \approx -\omega_z^2 (1 - h_z \cos \omega_x t) \dots \end{array} \right.$$

$$\gamma_{теор} < a_4 \frac{A_z^2}{8\omega_z}$$

$$A_z^2 - A_x^2 \approx \frac{\gamma\omega_z}{b_4} > 0$$

Обмен энергией между вертикальным и горизонтальным движением пылевых частиц

Условие развития параметрического резонанса



$$\gamma_{\text{теор}} < a_4 \frac{A_z^2}{8\omega_x} \approx a_4 \frac{\delta q^2}{8\gamma\Omega e'_z} \sqrt{\frac{g}{e'_z}}$$

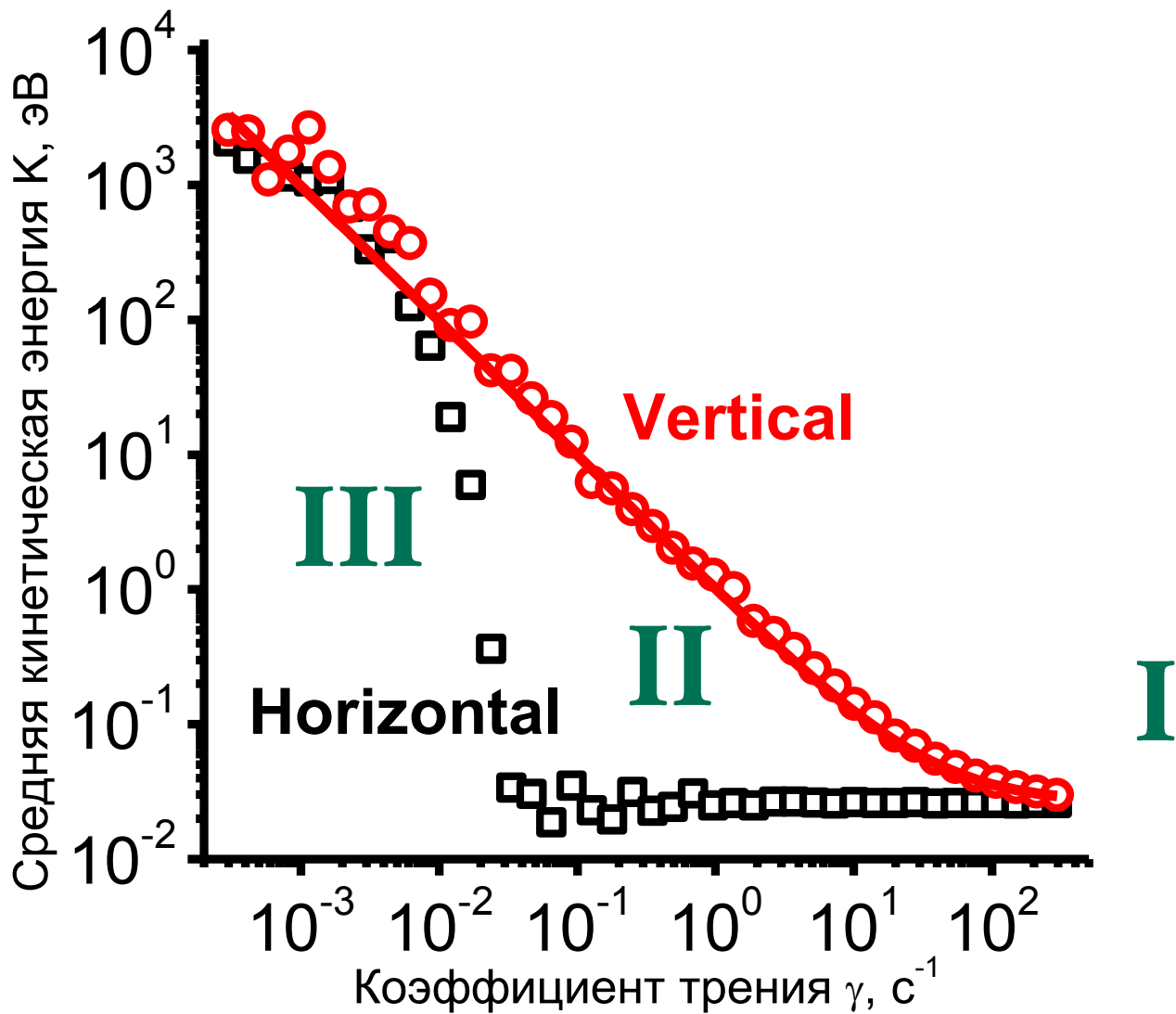
$$\delta q = \text{const}$$

$$\Omega = \text{const}$$

$$e'_z = \text{const}$$

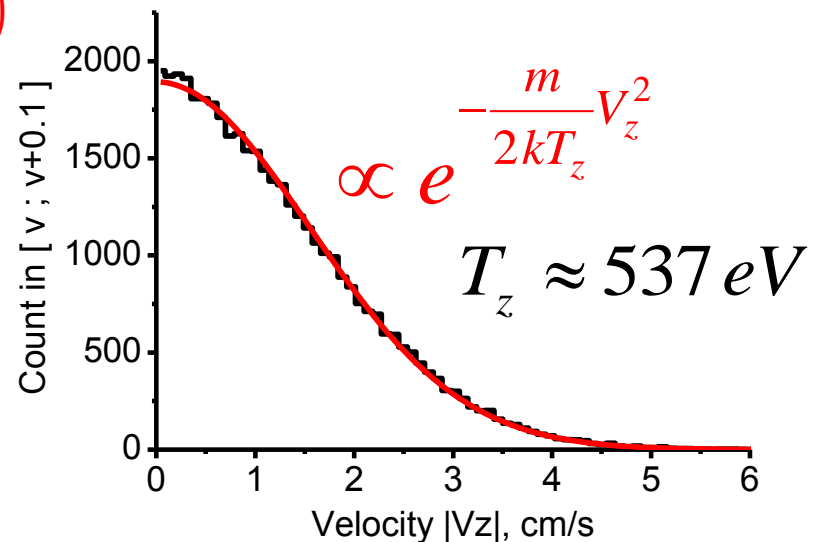
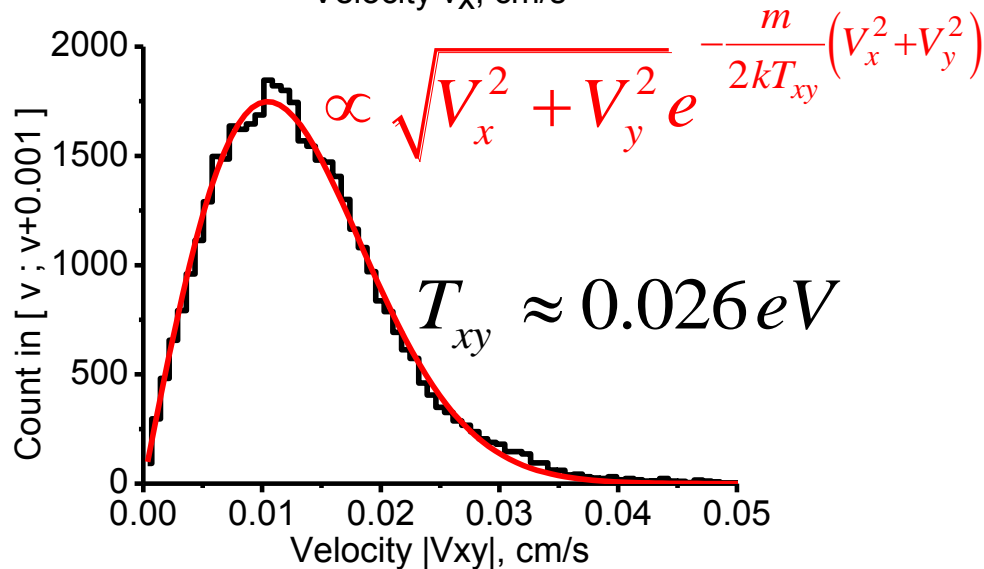
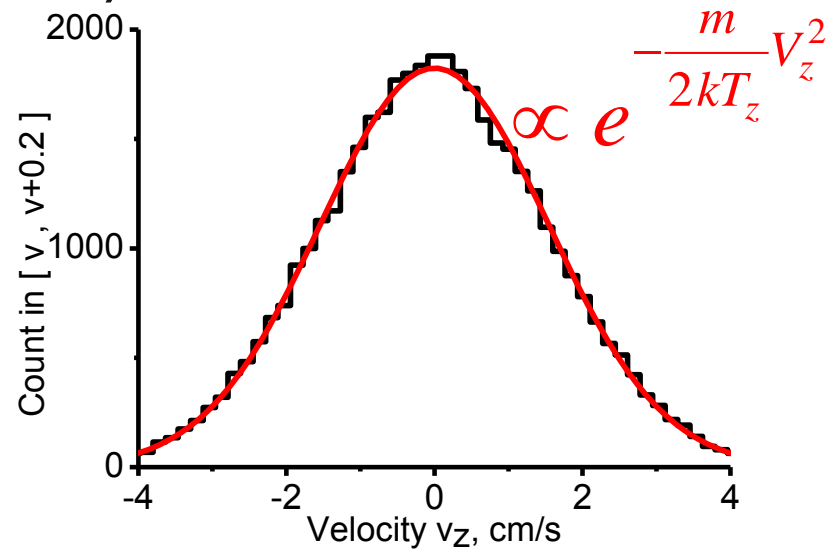
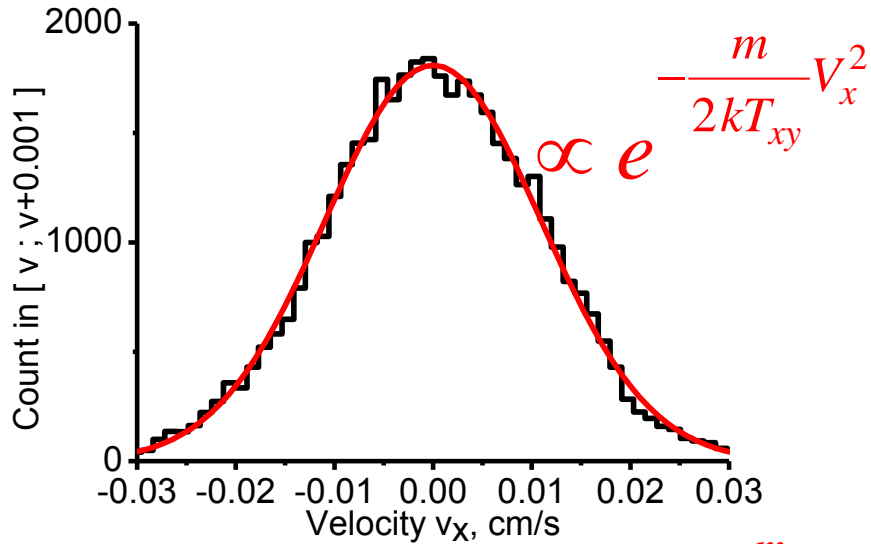
**О применимости термина
"температура"
для описания системы пылевых
частиц в плазме.**

Режимы с различными средними кинетическими энергиями.



Распределение скорости горизонтального и вертикального движения пылевых частиц

(моделирование)



Режимы с различными температурами. Шумовая температура.

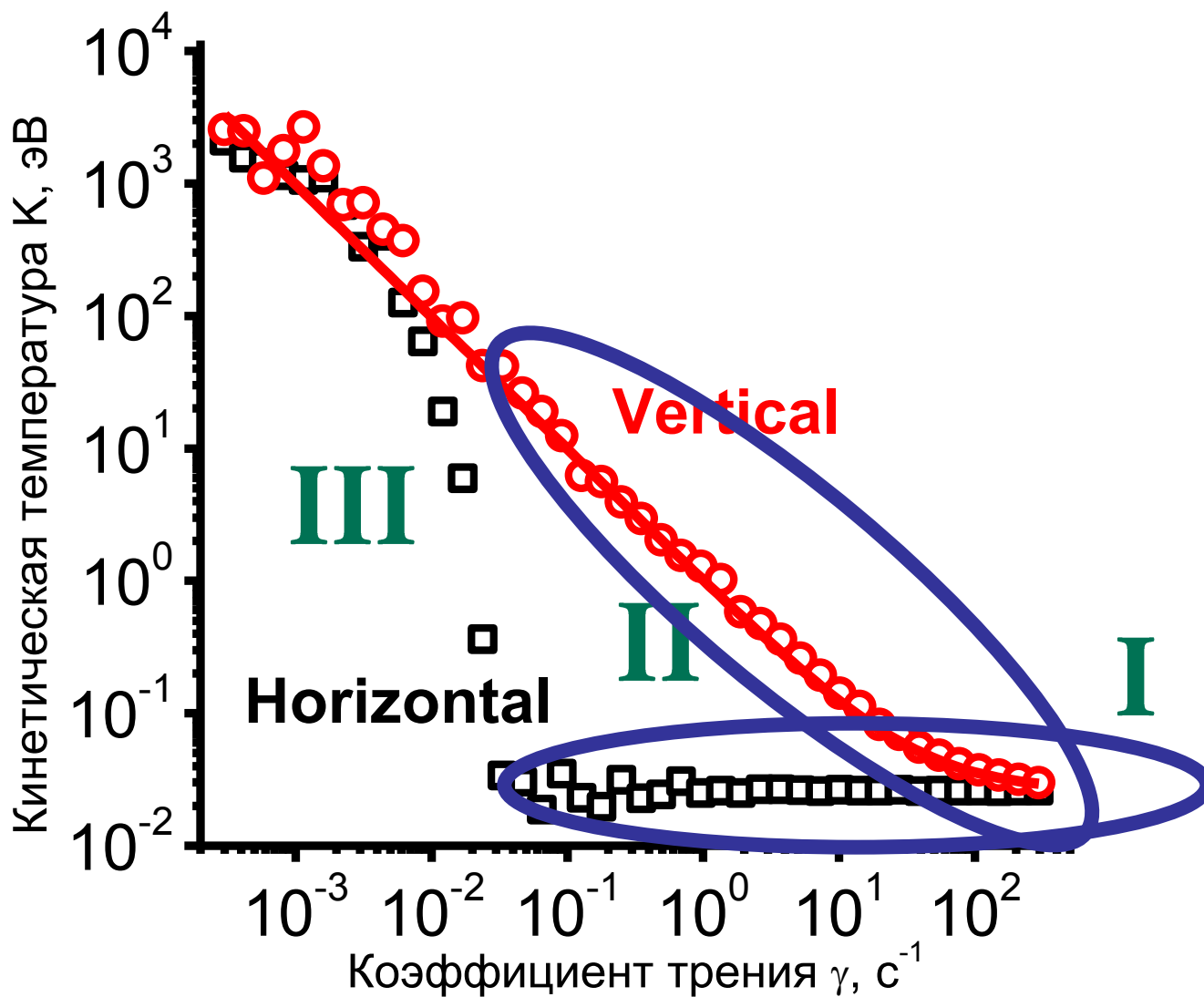
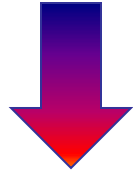


Схема передачи энергии в плазменно-пылевой системе.

Флуктуации заряда

$$\langle \delta q(t) \delta q(t') \rangle = \langle \delta q^2 \rangle \exp(-\Omega t)$$



Вертикальное движение

Вынужденные колебания

Вынужденные колебания

$$m\ddot{z} + \omega_z^2 z \approx \langle Q \rangle \langle E_z \rangle \delta q(t) \approx \frac{\langle Q \rangle^2 e^{-k\langle \Delta r_i \rangle} (k\langle \Delta r_{ij} \rangle + 1)}{\langle \Delta r_{ij} \rangle^2 m} \delta q(t)$$



Горизонтальное движение

Трение о нейтральный газ

$$F_{langevin} = -2m\gamma\dot{r} + A \cdot \xi(t)$$

Сравнение с экспериментом

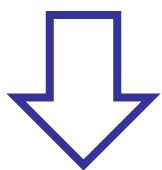
Кинетическая температура

$$T_z \approx m \cdot \frac{(g \cdot \delta q)^2}{\gamma \cdot \Omega}$$

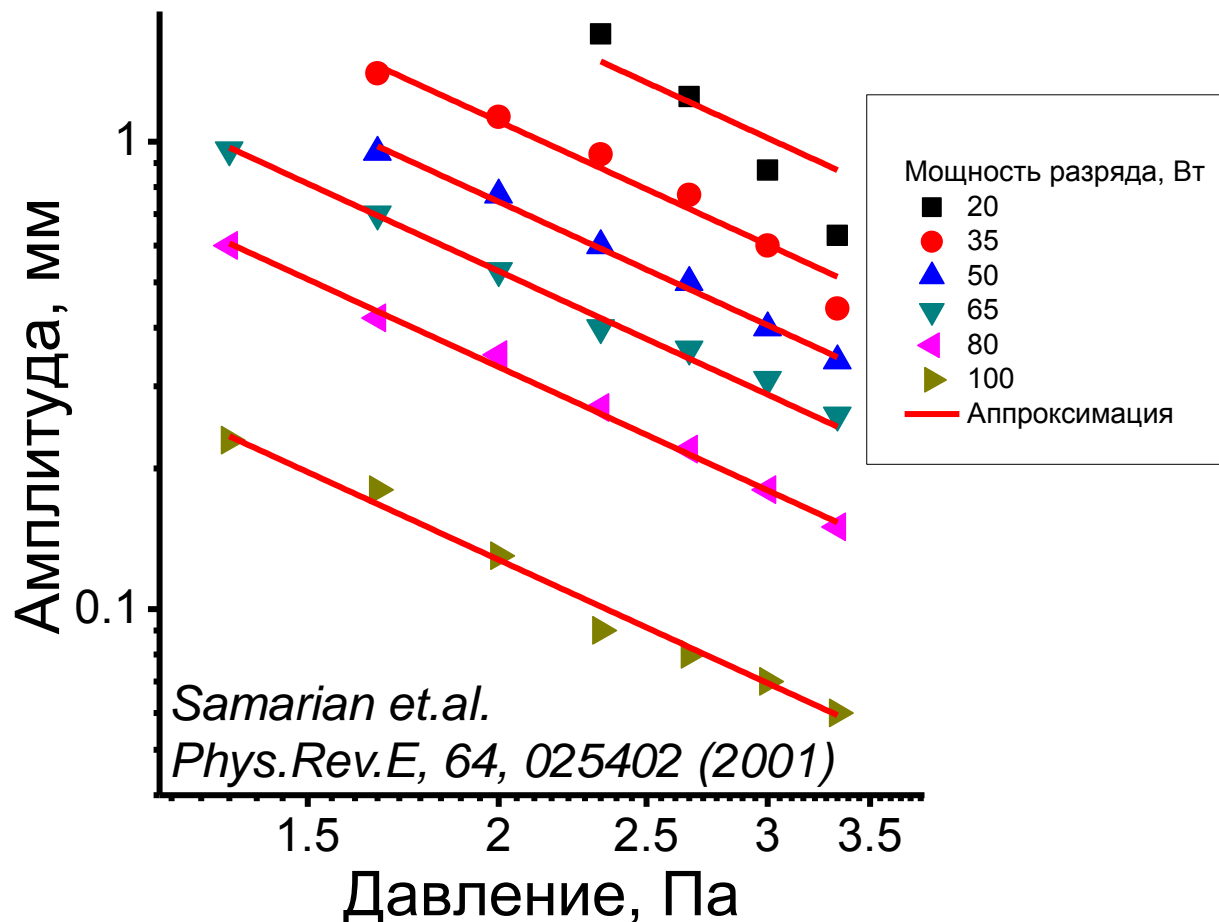
	Quinn, Goree 2000	Ivanov, Melzer 2005
Эксперимент	9 эВ	6 эВ
Теория	1÷30 эВ	2÷40 эВ
$(\delta q)^2 / \Omega$	$5.2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$2.9 \cdot 10^{-8} \text{ с}$

Амплитуда колебаний

$$A_z \approx \sqrt{\frac{2g \cdot (\delta q)^2}{\gamma \Omega e'_z}}$$



$$A_z \propto p^{-1,5}$$



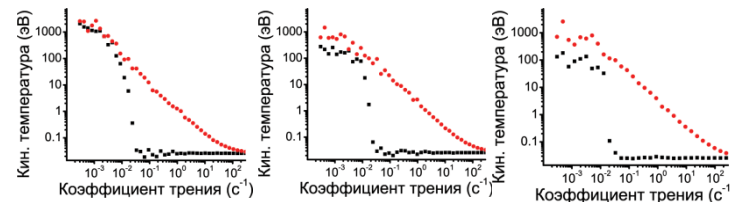
$$A_z(p, W)_{[мм]} \approx (-0,9 + 145 \cdot W_{[Вт]}^{-1}) \cdot p_{[Па]}^{-1,5}$$

Основные выводы и результаты работы

Уравнения движения пылевых частиц в плазме газового разряда дополнены членами, учитывающими флуктуации заряда и особенности приэлектродного слоя. Рассмотрено **совместное влияние** различных сил и явлений на динамику системы пылевых частиц.

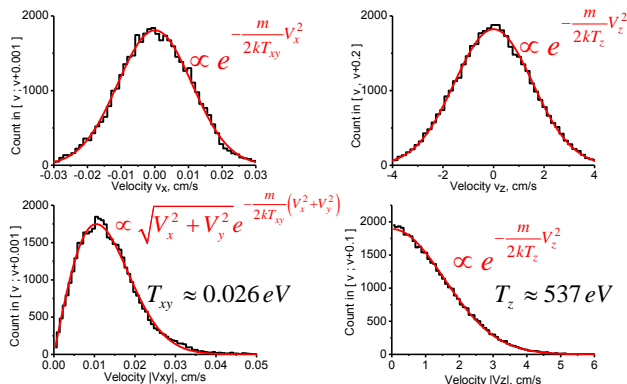
Анализ результатов дал следующие результаты:

1) Разработан подход для изучения свойств плазменно-пылевой системы и определения зависимости характеристик пылевой подсистемы от её параметров.



2) Получены характерные зависимости и формулы, связывающие горизонтальную и вертикальную температуру, параметр неидеальности пылевой подсистемы и межчастичное расстояние с параметрами системы пылевых частиц.

3) Показана допустимость и необходимость использования понятий горизонтальной и вертикальной температуры для описания движения пылевых частиц.



4) Построен механизм передачи энергии от газового разряда к вертикальному движению пылевых частиц, далее к горизонтальному и далее в окружающий газ.

