

ДИНАМИЧЕСКОЕ УДЕРЖАНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ЯДЕРНО- ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПЛАЗМЕ

Лапицкий Д.С.

ОИВТ РАН, 125412, Москва, ул. Ижорская 13/2.

dmitrucho@yandex.ru

Уравнение движения

Во множестве работ рассматриваются процессы, происходящие в плазме, создаваемой жестким ионизатором. Одним из ключевых направлений является изучение организованных структур, образуемых в среде из микроскопических частиц плазмы, а так же их удержание. Экспериментальные работы аргон-ксеноновой газовой среды [1,2] показали возможность пылевым структурам организовывать пылевые кристаллы из пылевых частиц микронных размеров. Для создания условий захвата и организации пылевых частиц в исследуемой области в этой работе предполагается использовать электродинамические ловушки, основанные на квадрупольной ловушке. Расчеты проводятся для естественных условий при атмосферном давлении и наличии постоянного потока. Анализ полученных результатов позволяет выявить области захвата частиц.

При моделировании поведения пылевых частиц учитывается влияние буферного газа на поведение пылевых частиц. Движение пылевых частиц описывается Броуновской динамикой. Уравнение движения описывается уравнением Ланжевена:

$$m_d \frac{d}{dt} r_i^2 = F_{tr}(r_i) + F_{int}(r_i) - 6\pi\eta R_d \frac{dr_i}{dt} + F_{Br}(r_i) + F_{mg}$$

m_d – масса пылевой частицы; r_i – радиус j -ой частицы; $i = 1, 2, \dots, N$; N – число пылевых частиц;

$F_{tr}(r_i)$ – внешняя потенциальная сила

$F_{int}(r_s, r_i)$ – сила парного взаимодействия между частицами i и s

F_{mg} – сила тяжести

$F_{Br}(r_i)$ – ланжевенский дельта коррелированный источник, действующий на пылевую частицу. Описание метода решения уравнения (1) описывается в работе [3].

Схема расчета

Описание схемы расчета поведения пылевых частиц в среде описана в работе [4], где рассматривается численный интегратор для уравнения Ланжевена:

$$Mdv = F(x)dt - k_B \frac{T}{D} vdt + \sqrt{2}k_B \frac{T}{D^{1/2}} dW(t)$$

, где x и v – набор положений и скоростей, которые необходимо определить как функции от времени t , M - матрица масс, $F(x)$ - векторная результирующая сила, k_B – постоянная Больцмана, T -температура, D - тензор диффузии, $W(t)$ - набор независимых стандартных Виннеровских процессов.

Для начального момента времени:
$$x^1 = x^0 + \frac{1 - \exp(-\gamma\Delta)}{\gamma} (v^0 + \Delta\omega_+ M^{-1} F(x^0) + R_+^0)$$

, где $x^0 = x(t^0)$, $v^0 = v(t^0)$ и $\omega_+ = \omega_+(\gamma\Delta) = \frac{\exp(-\gamma\Delta) - 1 + \gamma\Delta}{\gamma\Delta(1 - \exp(-\gamma\Delta))}$

Для следующего момента времени:
$$x^{n+1} = (1 + \exp(\gamma\Delta))x^n - \exp(-\gamma\Delta)x^{n-1} + \frac{1 - \exp(-\gamma\Delta)}{\gamma} (\Delta M^{-1} F(x^n) + \Delta S M^{-1} (F(x^n) - F(x^{n-1}))) + R^n$$

, где $n = 1, 2, \dots, N-1$, $R^n = R^n + R_+^n$, $S = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} \psi(t) \chi(t) dt$

В данном случае сила F представлена уравнением: $F(x(t)) = F(x^n) + \chi(t - t^n)(F(x^n) - F(x^{n-1}))$, $\chi(-\Delta) = -1$, $\chi(0) = 0$

Завершающая формула, которая позволяет получить значение скоростей $v^N = v(t^N)$:

$$v^N = \frac{\gamma \exp(-\gamma\Delta)}{1 - \exp(-\gamma\Delta)} (x^N - x^{N-1}) + \Delta\omega_- M^{-1} F(x^N) + \Delta S M^{-1} (F(x^N) - F(x^{N-1})) + R^N$$

, где $\omega_- = \omega_-(\gamma\Delta) = 1 - \omega_+(\gamma\Delta)$

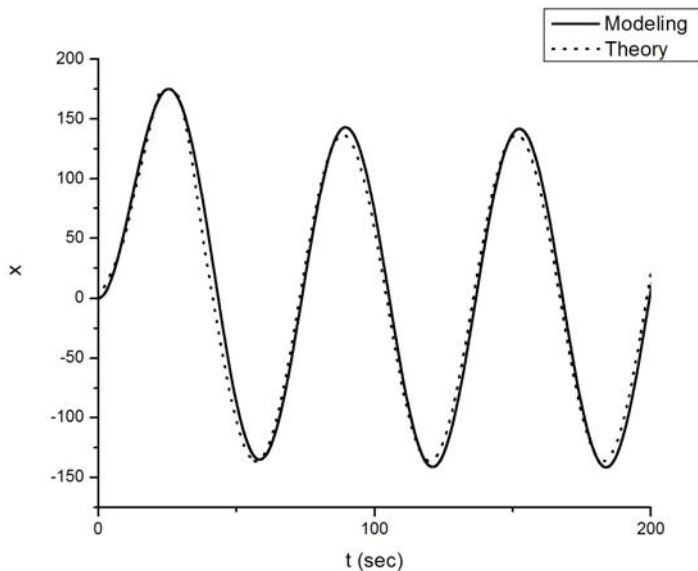
Проверка работы программы

Для проверки программы расчет проводился для одной частицы в одномерном пространстве без учета силы тяжести в двух случаях

$$m_d \frac{d}{dt} r_i^2 = F_{tr}(r_i) + F_{int}(r_i) - 6\pi\eta R_d \frac{dr_i}{dt} + F_{Br}(r_i) + F_{mg}$$

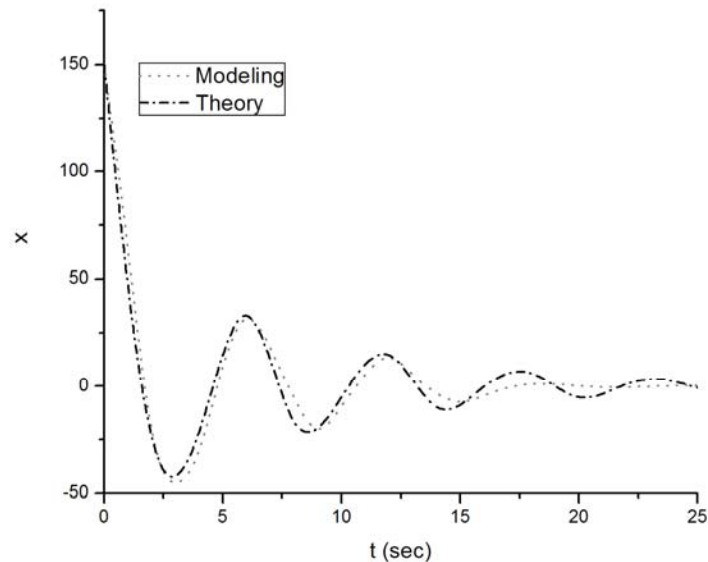
1) без учета случайной силы, когда частица находится в поле и действующая на нее со стороны поля сила $F_\omega(t) = A \cos(\omega t)$

$$m_d \frac{d}{dt} r_i^2 = F_\omega - 6\pi\eta R_d \frac{dr}{dt}$$



2) с учетом столкновений с нейтральными частицами, когда частица находится в поле и действующая на нее со стороны поля $U(t) = A \cos(\omega t)$ сила.

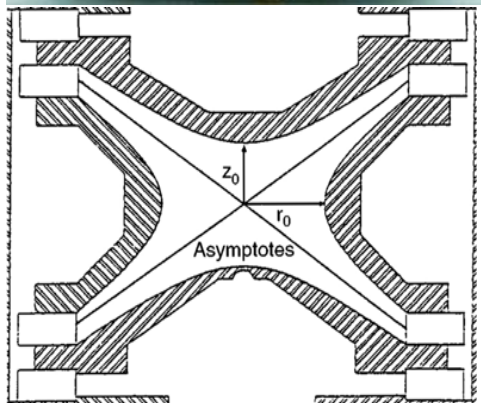
$$m_d \frac{d}{dt} r_i^2 = F_\omega - 6\pi\eta R_d \frac{dr}{dt} + F_{Br}(r)$$



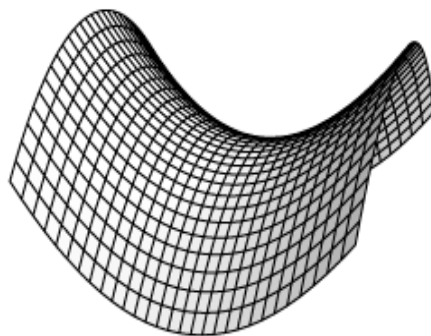
Ловушка Паули

Потенциал ловушки Паули описывается уравнением:

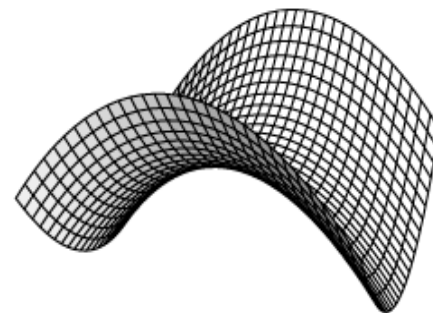
$$\Phi = \frac{U_0 + V_0 \cos(\omega t)}{2d^2} (2z^2 - x^2 - y^2), d = \sqrt{z_0^2 + r_0^2}$$



$t=0$



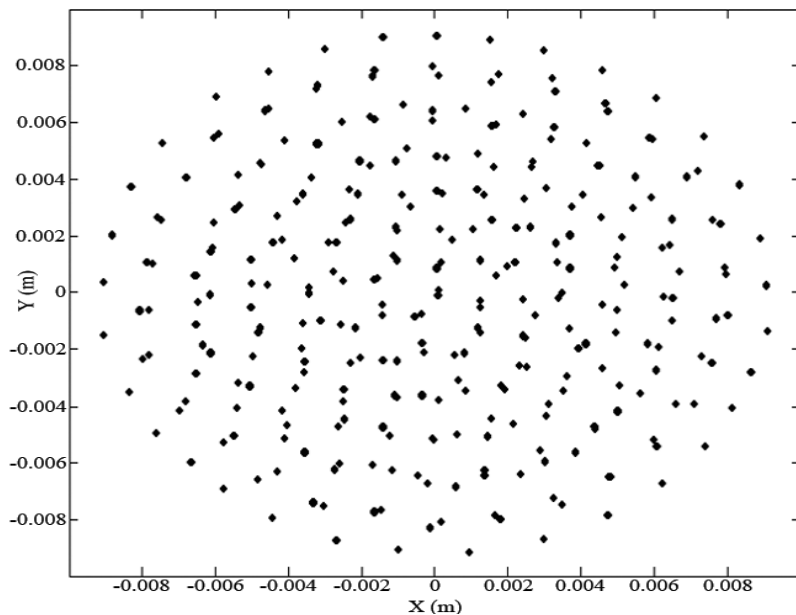
$t=T/2$



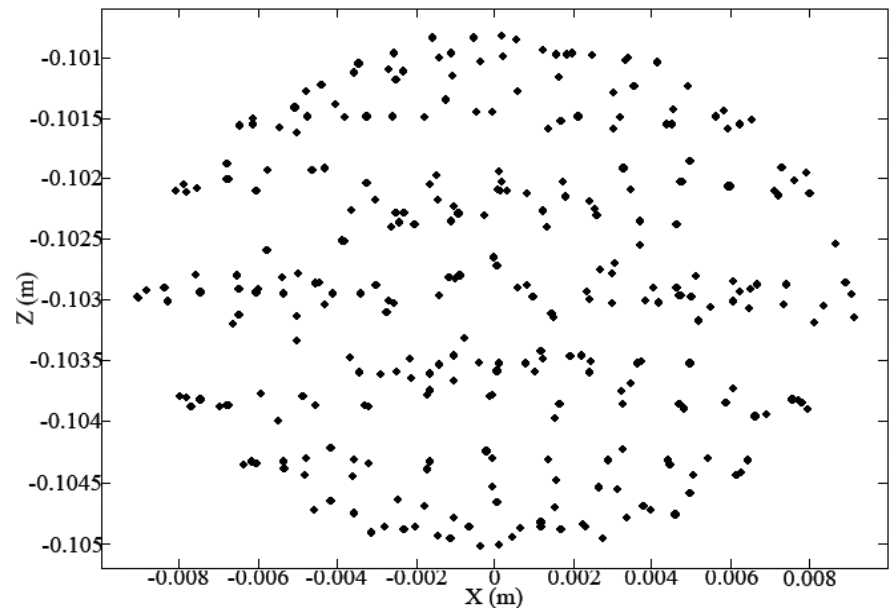
Эволюция электрического потенциала, изменяющегося с периодом T

Результат вычисления поведения пылевых частиц в ловушке Паули

- Левитация пылевой структуры в случае действия потенциальных сил на 300 пылевых частиц
- Параметры пылевых частиц: заряд $Q=1200e$, радиус $r=1\text{мк м}$, плотность $\rho=19\text{г/см}^3$.
- Параметры пылевой плазмы: температура $T=300\text{К}$, радиус Дебая $R_d=40\text{мк м}$, динамическая вязкость $\eta = 17\text{ мк П*сек}$.
- Величина переменного поля $V=800\text{В}$, частота $\omega=1000\text{Hz}$.

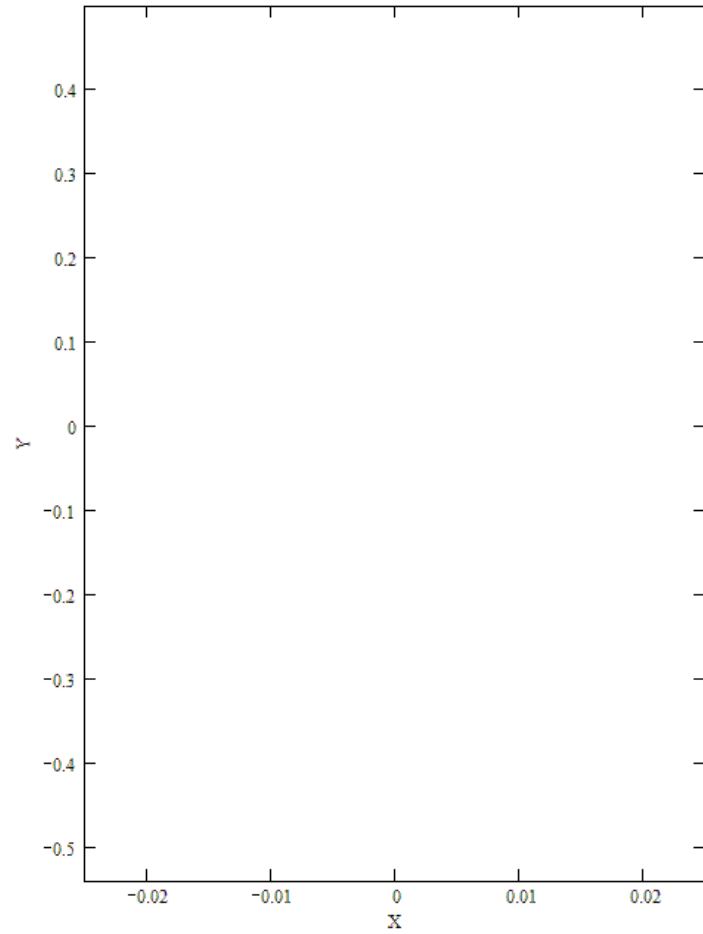


Вид сверху

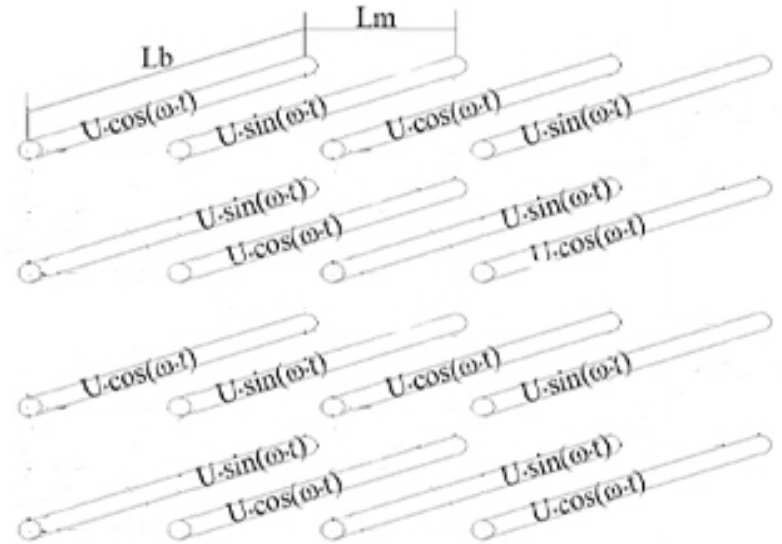
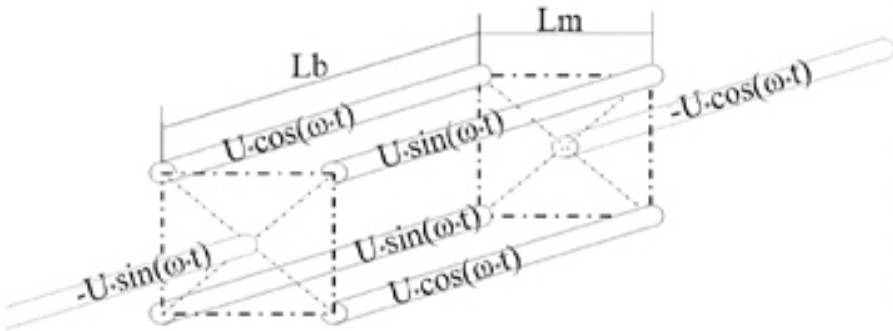


Вид сбоку

КИНО



Квадрупольная ловушка



Квадрупольная ловушка

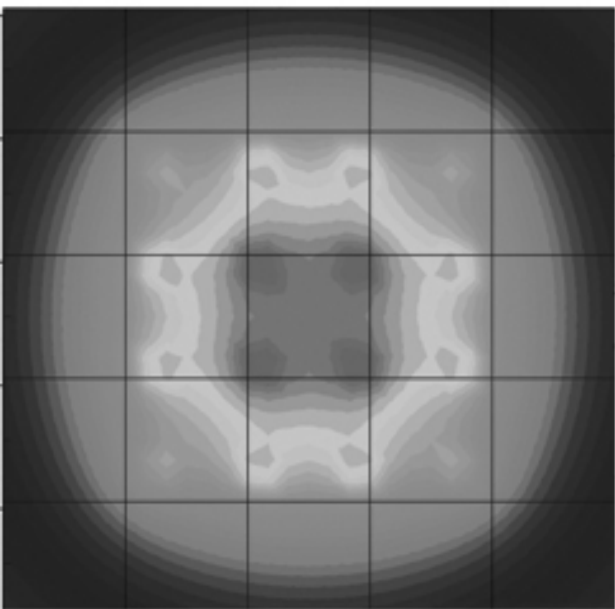
4 квадрупольные ловушки, объединенные в одну

При рассмотрении динамики частиц в квадрупольной ловушке расчет силы, действующей на частицы происходит следующим образом: проволока делится на множество точек, для каждой из которых находится свой заряд. Сила, действующая со стороны каждой точки проволоки на каждую частицу:

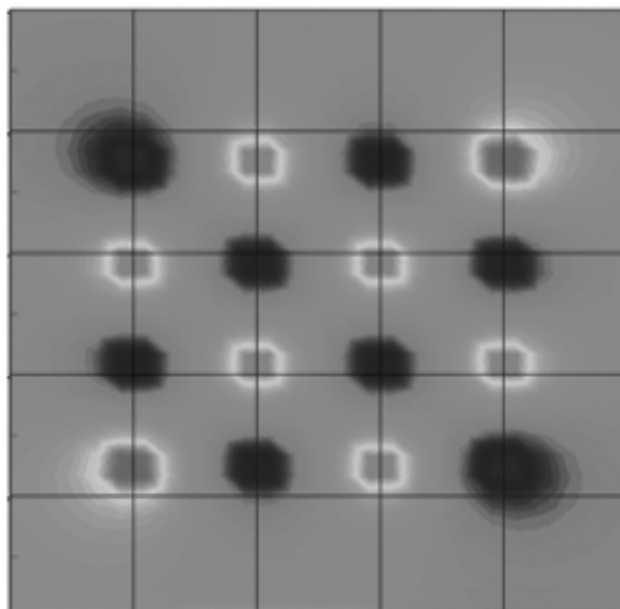
$$F_{\text{int}}(r_i) = \frac{LUQ_i}{2T \ln(R_2/R_1)(r_i - r_k)^2}$$

,где T= количество точек, на которые разделена проволока, L- ее длина, R_2 – радиус внешней обмотки, R_1 - радиус проволоки, r_i и r_k – соответственно радиус векторы точки проволоки и пылевой частицы.

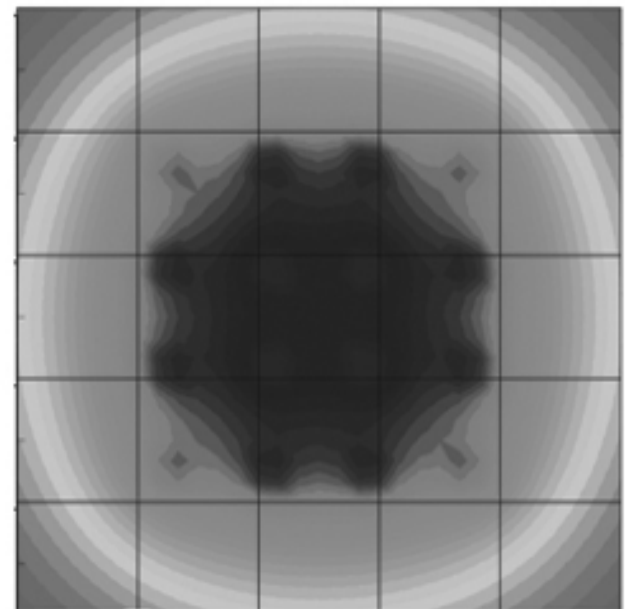
Эволюция поля улучшенной квадрупольной ловушки



$\pi/4$

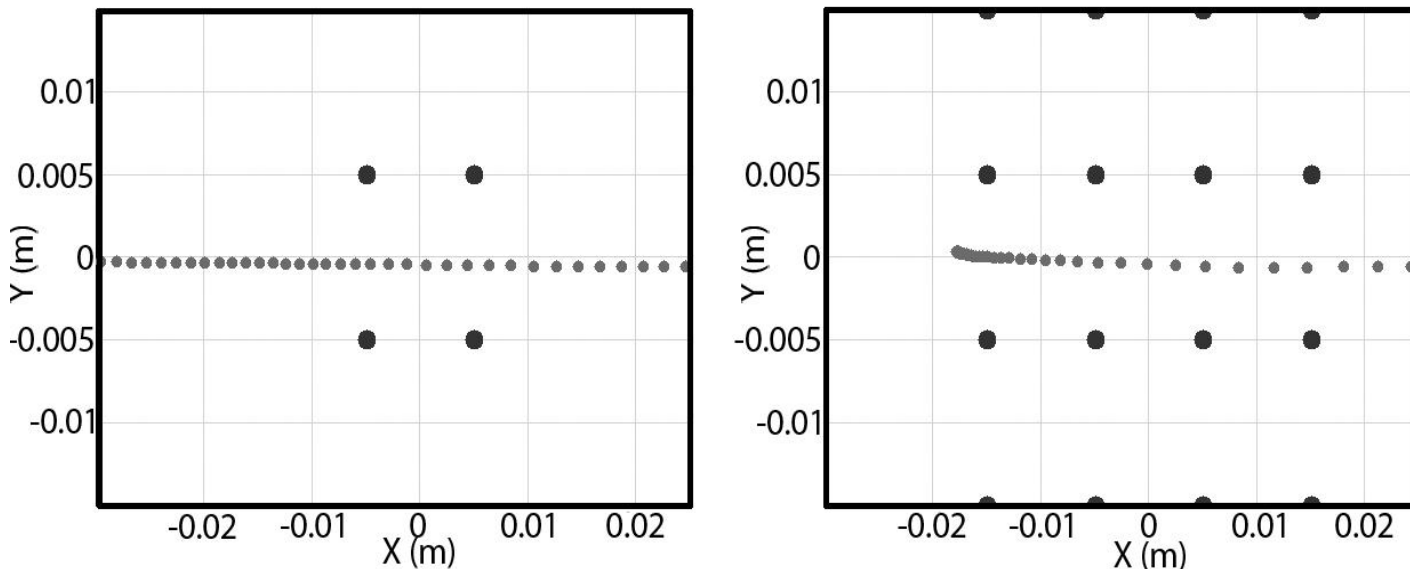


$3\pi/4$



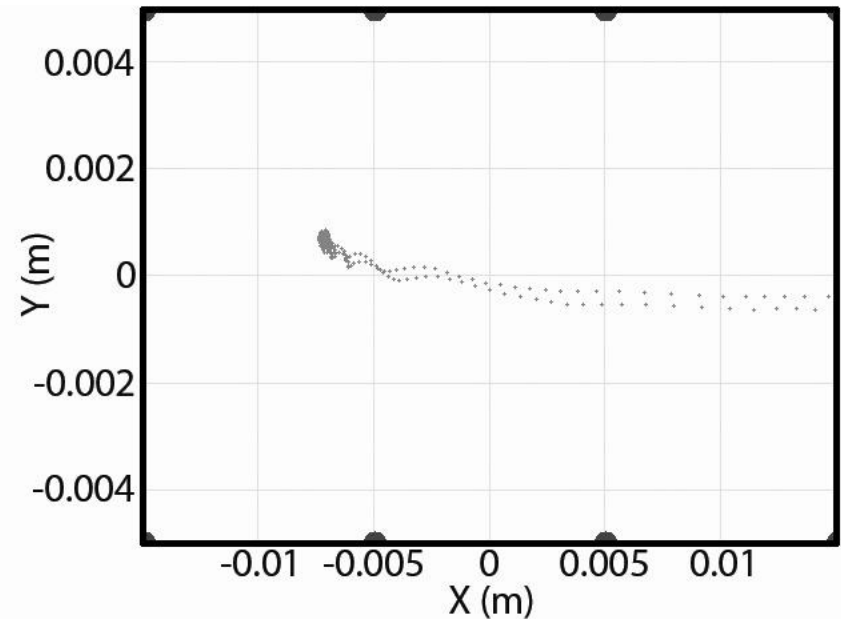
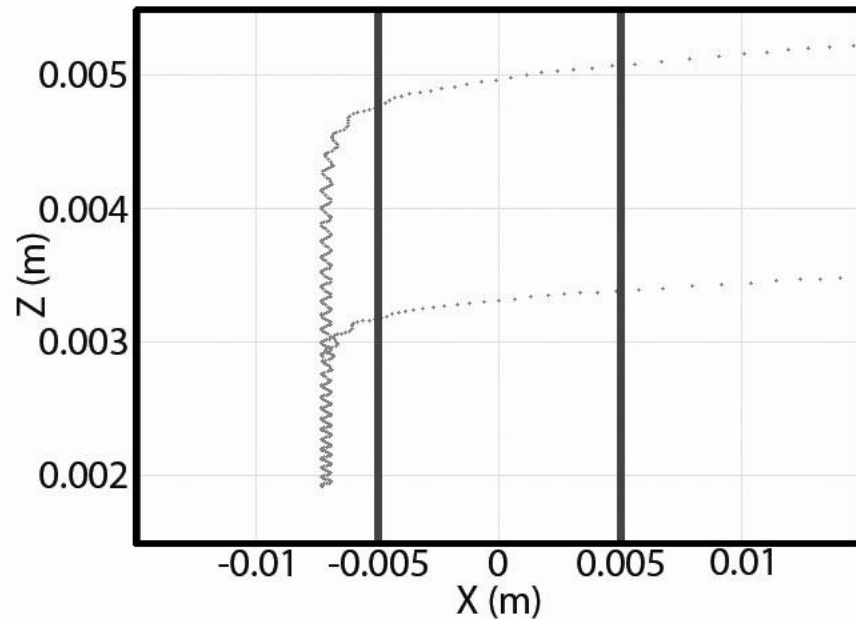
$5\pi/4$

Сравнение эффективности обычной квадрупольной ловушки и ловушки из 16 проволочек.



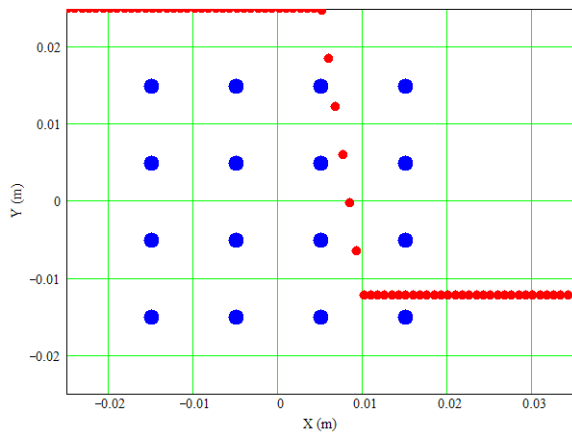
Параметры эксперимента: заряд частиц $Q=100e$, радиус частиц $r=0.1$ мк м, плотность частиц $\rho=15\text{г/см}^3$.
Параметры пылевой плазмы: $T=300\text{К}$, дебаевский радиус $R_d=40$ мк м, динамическая вязкость $\eta=17$ мк П*сек. Величина переменного напряжения $U_\omega=10$ кВ, величина постоянного напряжения $\Delta U=1800\text{В}$, частота $\omega=400$ Hz. Параметры ловушки: длина ловушки $L_b=20$ см, диаметр цилиндра $D=25$ см, $L_m=1$ см. Направление потока справа налево со скоростью $v_{\text{flow}}=0.1$ м/с. Большие точки на этих картинках соответствуют проволочкам. Маленькие точки соответствуют трекам частиц. Слева частицы пролетают сквозь ловушку, в то время, как на правом рисунке они ей захватываются.

Поведение пылевых частиц в квадрупольной ловушке из 16 проволок.

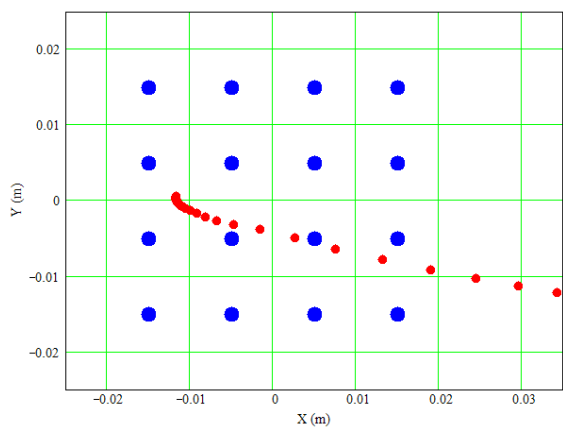


Параметры эксперимента: 2 частицы, заряд частиц $Q = 400e$, радиус частиц $r = 0.1$ мк м, плотность частиц $\rho = 15 \text{ г/см}^3$. Параметры пылевой плазмы: $T = 300 \text{ К}$, дебаевский радиус $R_d = 40$ мк м, динамическая вязкость $\eta = 17$ мк П*сек. Величина переменного напряжения $U_\omega = 10$ кВ, величина постоянного напряжения $\Delta U = 10$ кВ, частота $\omega = 400$ Hz. Параметры ловушки: длина ловушки $L_b = 20$ см, диаметр цилиндра $D = 25$ см, $L_m = 1$ см. Направление потока справа налево со скоростью $v_{\text{flow}} = 0.1$ м/с. Большие точки на этих картинках соответствуют проволочкам. Маленькие точки соответствуют трекам частиц. Слева частицы пролетают сквозь ловушку, в то время, как на правом рисунке они ей захватываются.

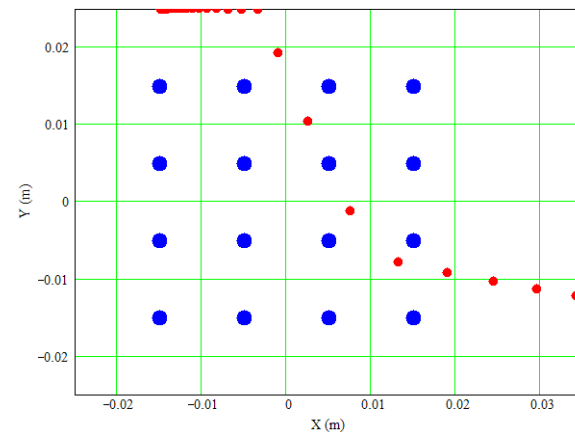
Сравнение со статическими ловушками



Статическая ловушка



Динамическая ловушка



Динамическая+статическая ловушки

Параметры эксперимента: заряд частиц $Q=50e$, радиус частиц $r=0.1$ мк м, плотность частиц $\rho=15\text{г/см}^3$.
Параметры пылевой плазмы: $T=300\text{К}$, дебаевский радиус $R_d=40$ мк м, динамическая вязкость $\eta=17$ мк П*сек. Направление потока справа налево со скоростью $v_{\text{flow}}=0.1$ м/с.

- Динамическая ловушка: величина переменного напряжения $U_\omega=10$ кВ, величина постоянного напряжения $\Delta U=10$ кВ, частота $\omega=400$ Hz. Параметры ловушки: длина ловушки $L_b=20$ см, диаметр цилиндра $D=25$ см, $L_m=1$ см.

- Статическая ловушка: величина создаваемого поля $E=20$ кВ/см. Ширина между пластинами 5 см.

Большие точки на этих картинках соответствуют проволочкам. Маленькие точки соответствуют трекам частиц. Слева частицы пролетают сквозь ловушку, в то время, как на правом рисунке они ей захватываются.

