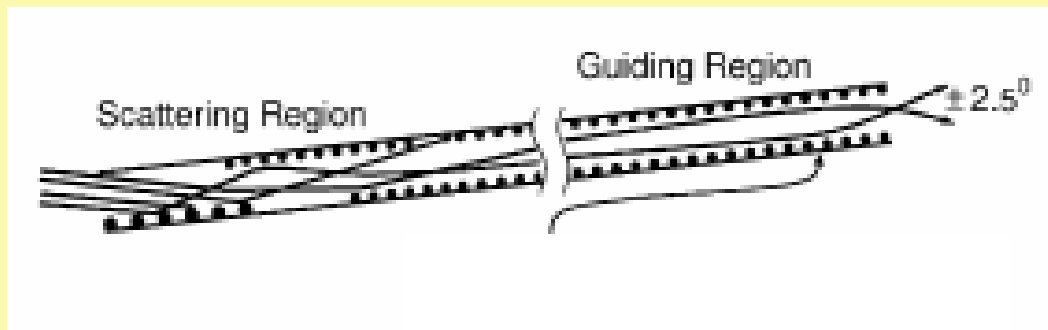


# ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНОВ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

ПОХИЛ Григорий Павлович



# Что такое guiding

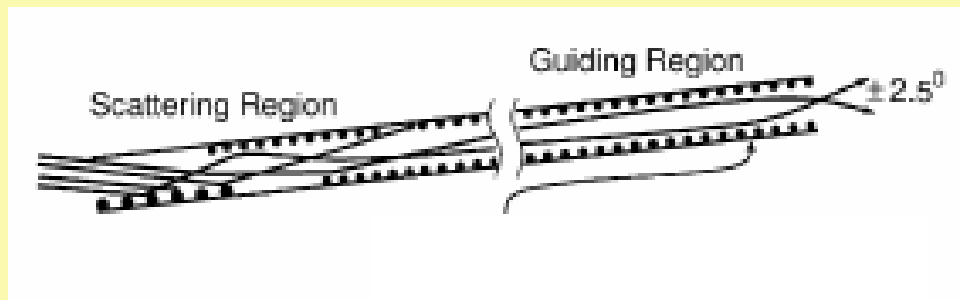
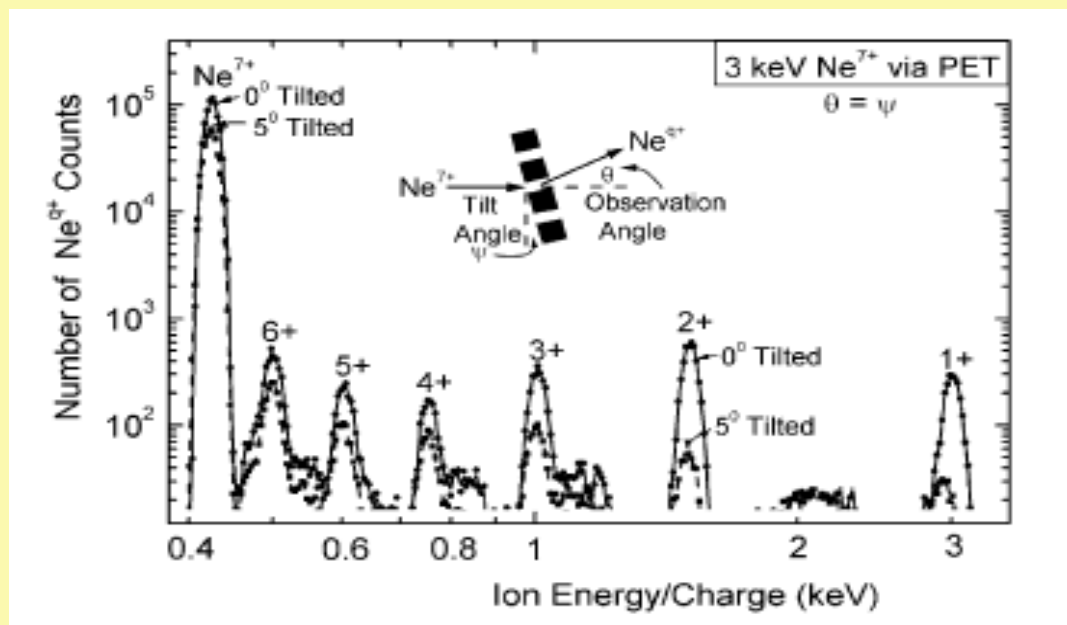
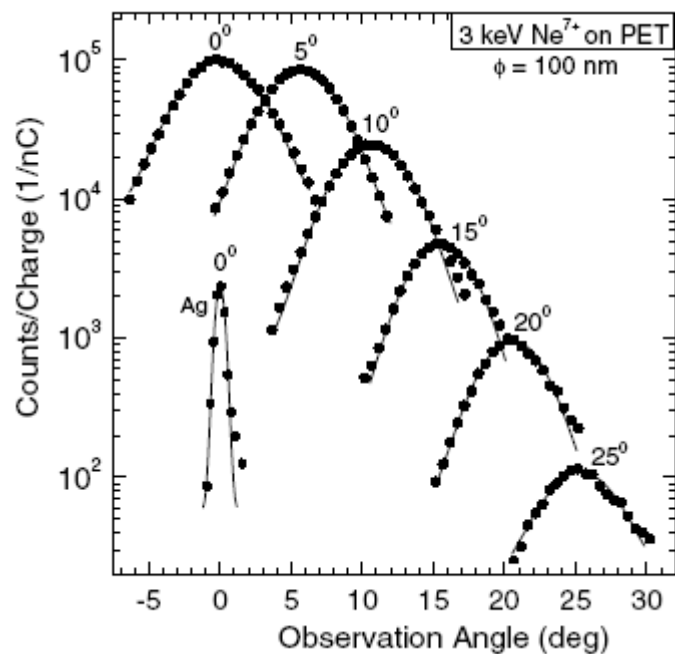


Схема прохождения ионов

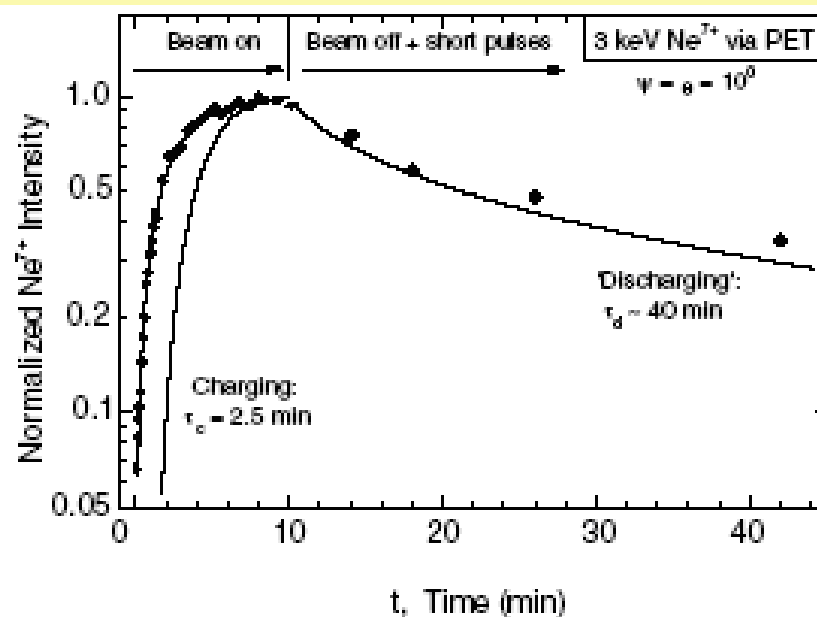


Зарядовый состав прошедших ионов

# Характерные зависимости



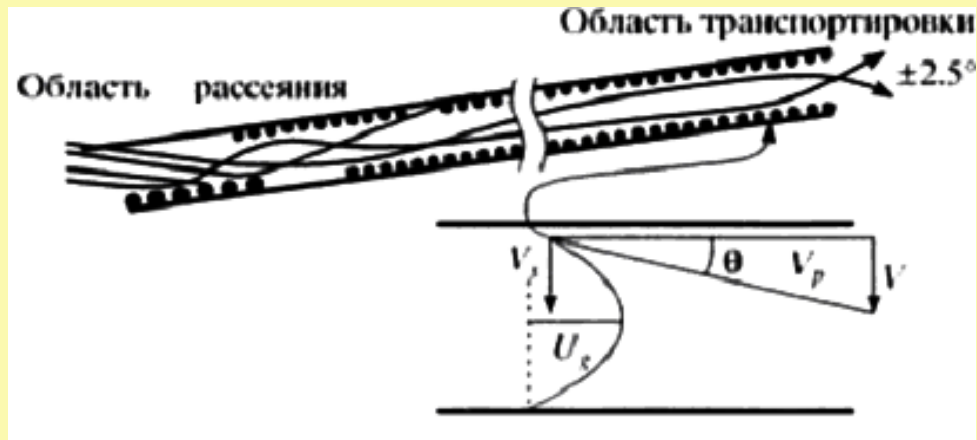
Угловые зависимости



Временная зависимость

## Проблемы guiding'a

1. Механизм изоляции быстрых ионов от стенок капилляра?
2. Как ионы отклоняются для движения вдоль капилляра?
3. Новые вопросы, которые возникли при проведении работы.



**Введение**

**Глава 1. Анализ области транспортировки ионов в  
диэлектрическом канале**

**Глава 2. Область рассеяния ионов при входе в  
диэлектрический канал**

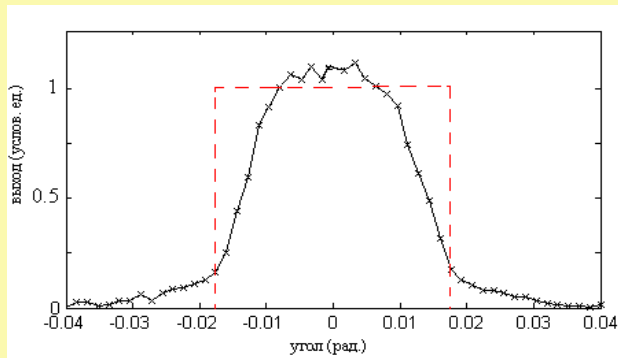
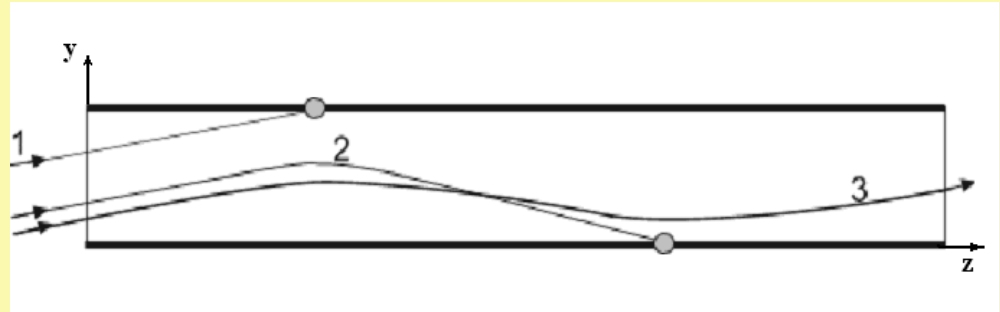
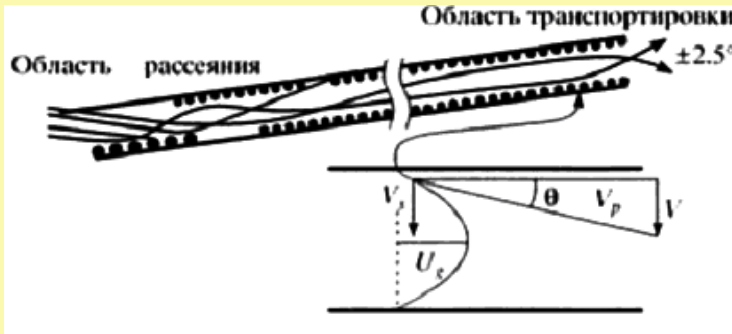
**Глава 3. Эффект двойного управления пучком  
положительных ионов с помощью плоских  
диэлектрических каналов**

**Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов прошедших  
через капилляр**

**Глава 5. Конические капилляры**

**Выводы**

# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале



**Не просматривается  
ни квадруполя,  
ни линзы ЭНЗЕЛЯ**

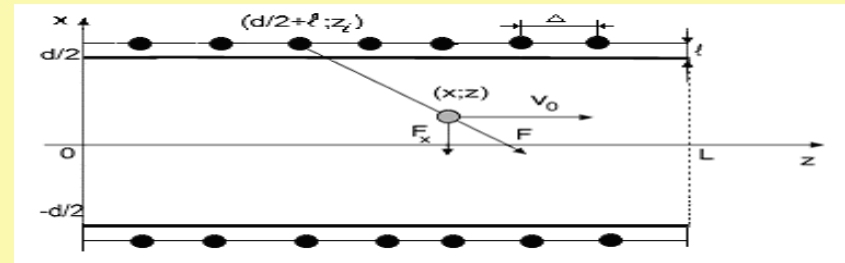
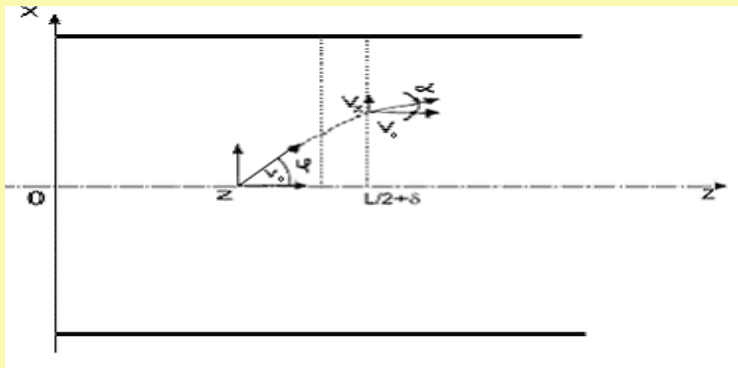
$$\begin{cases} v_{xi} = v_{xi-1} + \frac{F_{xi}}{m} t \\ v_{yi} = v_{yi-1} + \frac{F_{yi}}{m} t \\ z_i = z_{i-1} + v_o t \\ x_i = x_{i-1} + v_{xi} t \\ y_i = y_{i-1} + v_{yi} t \end{cases}$$

$$F_x = -ne^2 \frac{x_1 - x}{\left( (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \right)^{3/2}}$$

$$F_y = -ne^2 \frac{y_1 - y}{\left( (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \right)^{3/2}}$$

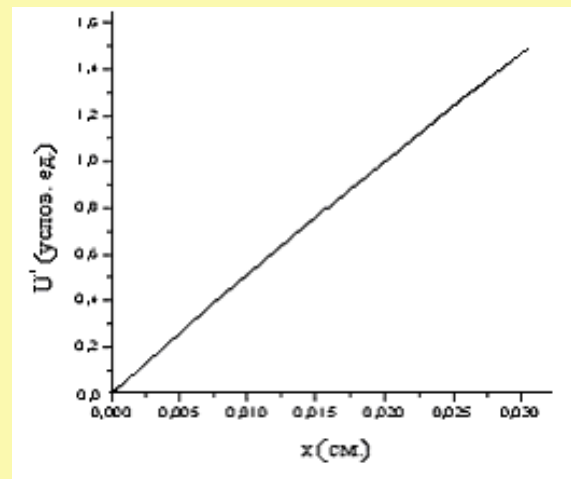
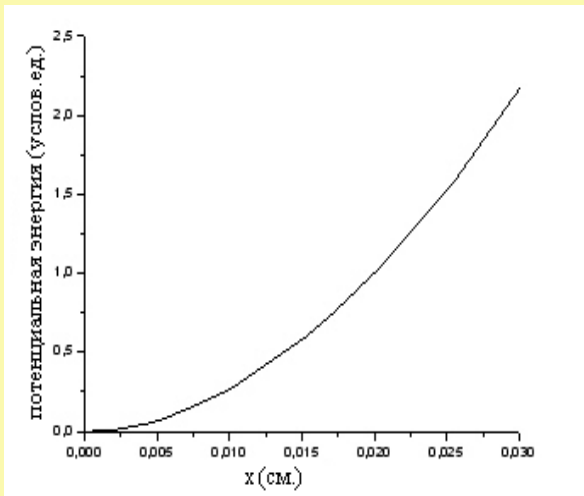
# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале

Переходим к более простой модели – плоский капилляр



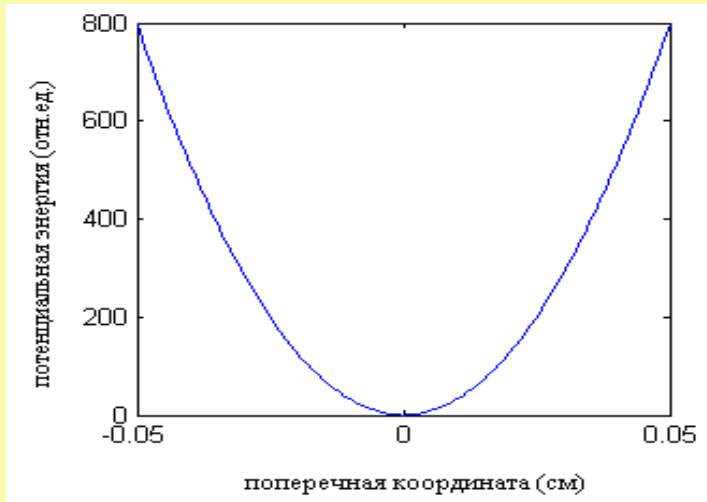
$$E_{\perp} = \frac{m(v_0 \varphi)^2}{2} = E_0 \varphi^2$$

$$U(x) = E_0 (\varphi^2 - \alpha^2)$$

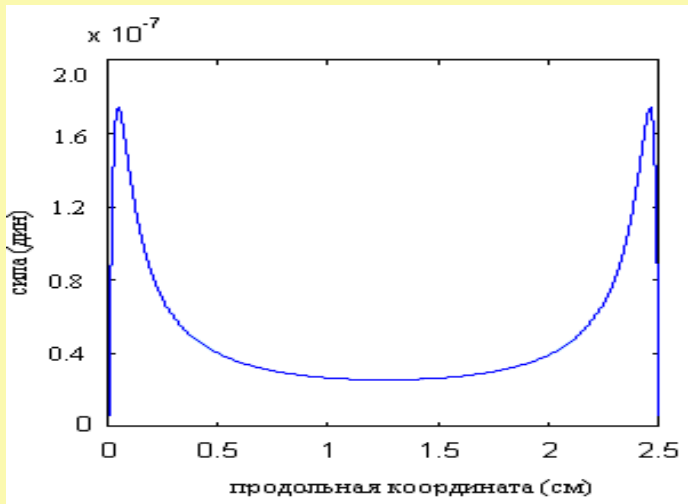
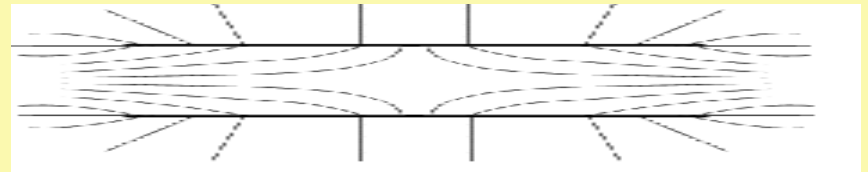


**Чисто  
осцилляторный  
потенциал!  
Откуда?**

# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале



**А капилляр то не бесконечный, есть краевой эффект !**



$$F_{\perp}(x, z) = 4\sigma \cdot e \frac{x}{L} \begin{cases} \frac{1}{\frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right)}, & \text{при } z \gg d \\ 1 + \frac{zL}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - x^2}, & \text{при } z \sim d \end{cases}$$



# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале

## Градиентные силы Миллера

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = f(x) \sin(\omega t)$$

$$x = \bar{x} + \xi \sin(\omega t)$$

$$m \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} - m \xi \omega^2 \sin(\omega t) = f(\bar{x}) \sin(\omega t) + \frac{df(\bar{x})}{dx} \xi \sin^2(\omega t)$$

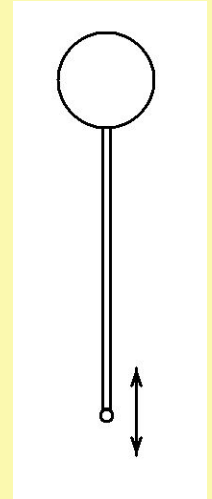
$$\xi = -\frac{f(\bar{x})}{m \omega^2}$$

$$m \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} = -\frac{d}{dx} \left( \frac{f^2(\bar{x})}{4m \omega^2} \right)$$

$$F_{grad}^{(1)} = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 E \delta^3} a_0^2 e^{-\frac{2x}{\delta}}, \quad U_{grad}^{(1)} = \frac{\lambda^2 a_0^2}{32\pi^2 E \delta^2} e^{-\frac{2x}{\delta}}$$

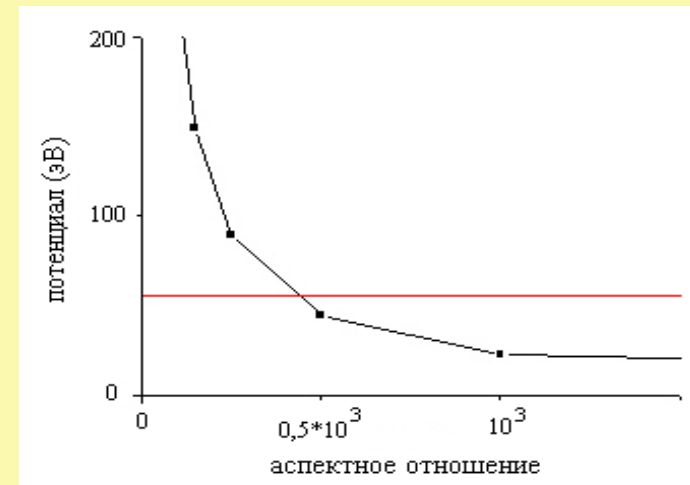
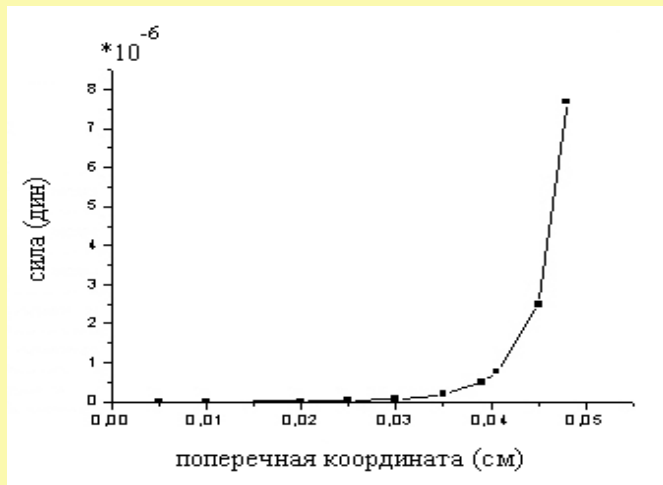
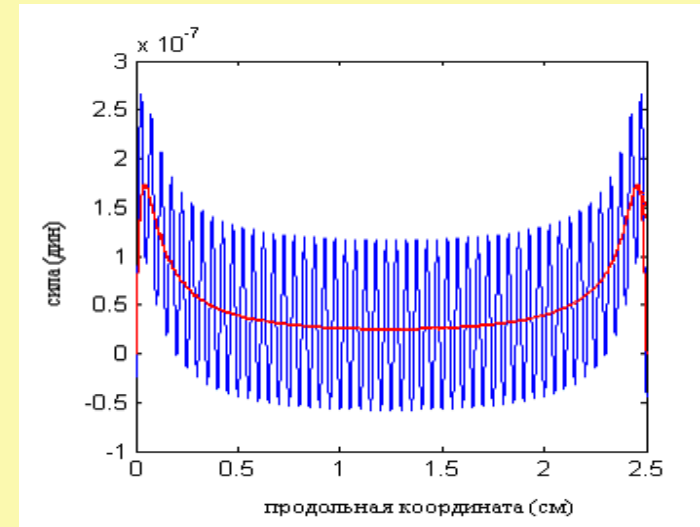
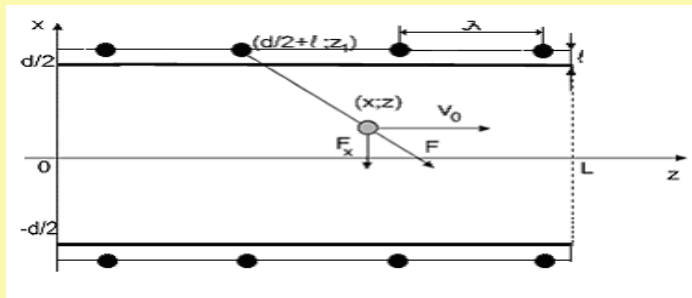
$$F_{grad}^{(2)} = \frac{1}{4E\delta} a_0^2 e^{-\frac{2x}{\delta}}, \quad U_{grad}^{(2)} = \frac{a_0^2}{8E} e^{-\frac{2x}{\delta}}$$

Маятник Капицы



# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале

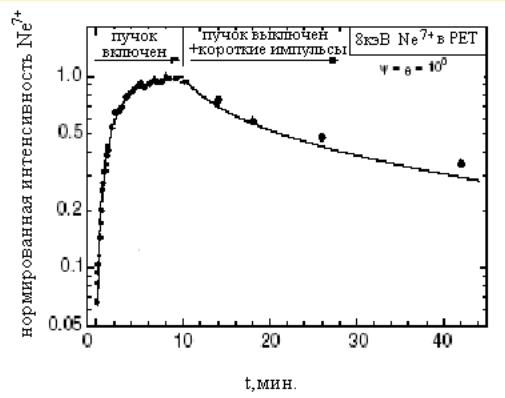
## Движение в плоском канале, образованном двумя одномерными решетками



При  $L/d > 400$  силы Миллера больше краевых сил

# Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале

## О временной зависимости



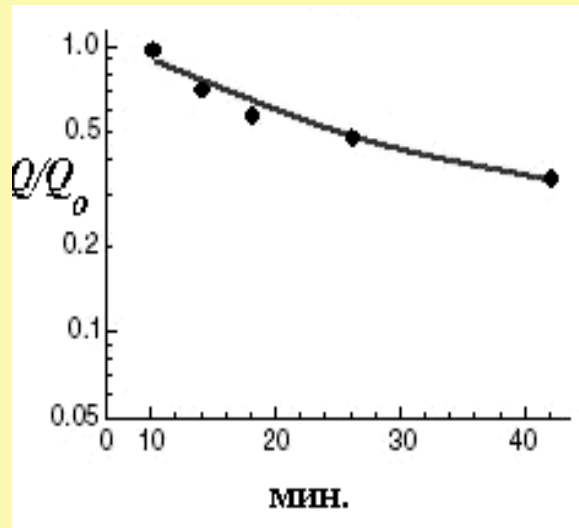
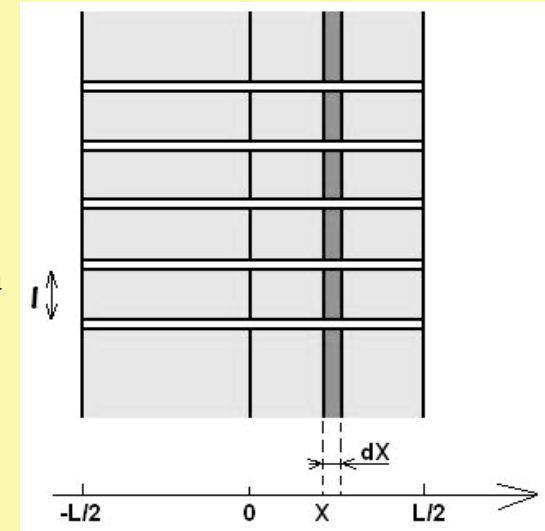
Напряженность полч

$$E(x, t) = 4\pi e \int_0^x n(x, t) dx$$

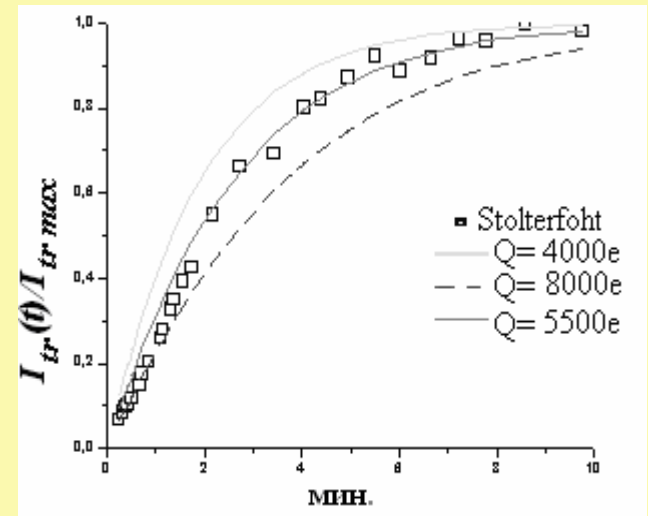
Характерные времена диффузии и дрейфа

$$\mu E t_{drift} = L \quad \sqrt{Dt_{diff}} = L$$

$$\frac{t_{diff}}{t_{drift}} = \frac{\mu EL}{D} \quad \mu = \frac{e}{kT} D$$



$$\frac{t_{diff}}{t_{drift}} = \frac{eLE}{kT} \sim 10^3$$



## Глава 1. Область транспортировки ионов в диэлектрическом канале

**Доказано, что основными силами обеспечивающими транспортировку ионов в капилляре без контакта со стенками являются силы, связанные с краевым эффектом, т.е. с конечностью длины капилляра. При большой длине капилляра в средней его части существенную роль играют градиентные силы, возникающие благодаря дискретной структуре заряда стенки канала.**

**Дрейф зарядов – это основной механизм разрядки стенок капилляра.**

# Глава 2. Область рассеяния ионов

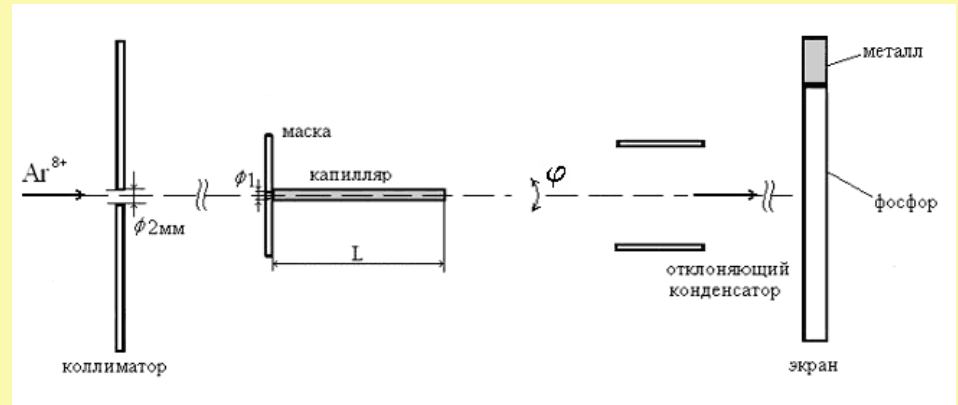
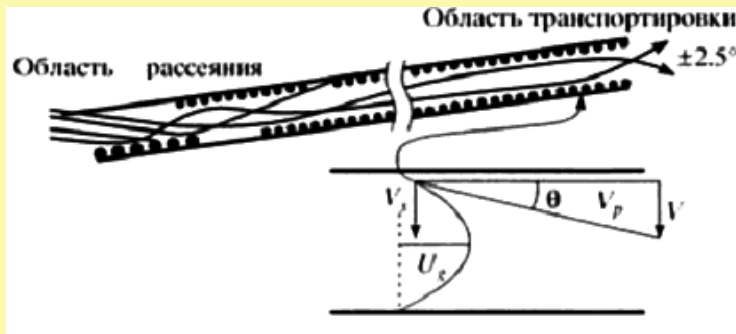
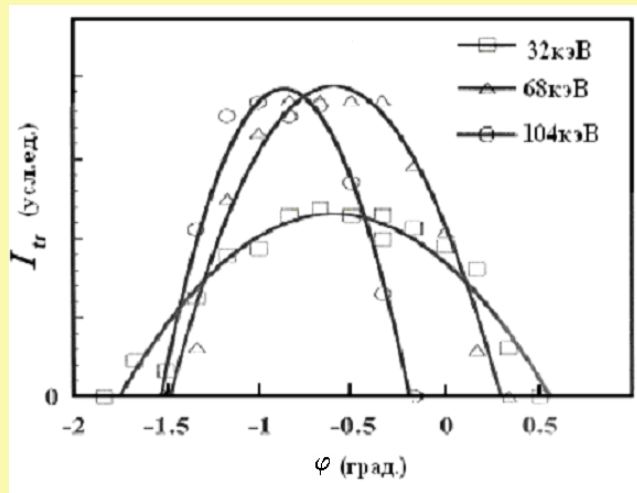
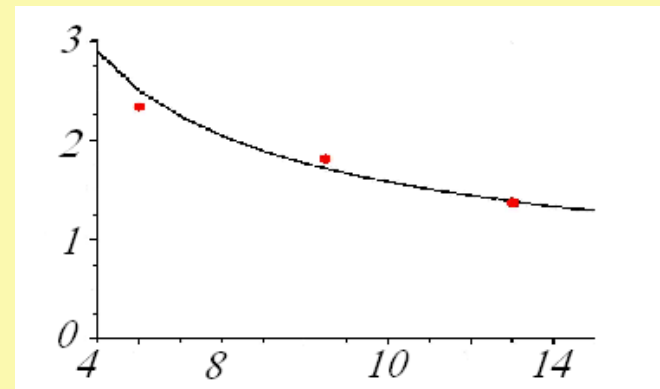


Схема эксперимента

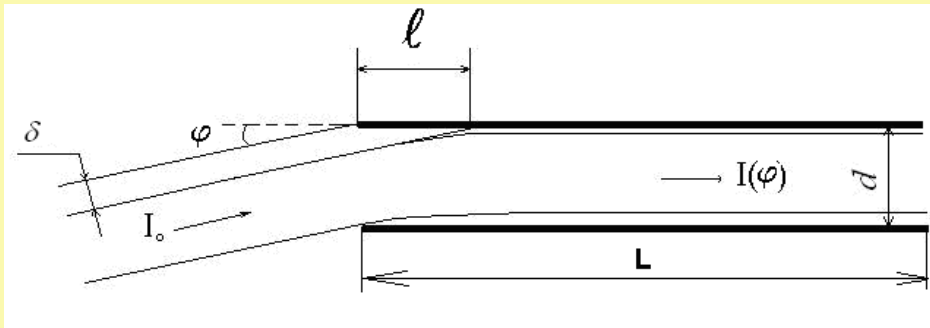


Зависимость прозрачности капилляра от угла наклона капилляра



Угловая ширина, как функция энергии

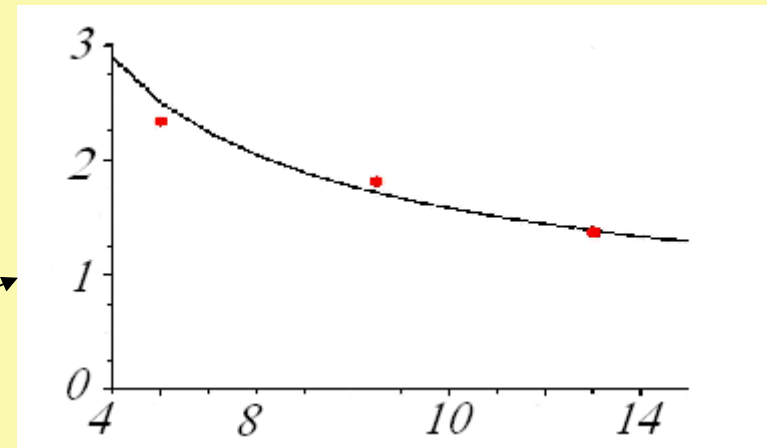
## Глава 2. Область рассеяния ионов



$$\ell = \frac{\theta E}{ze^2 \pi \sigma_0} < L, \quad \delta = \theta^2 \frac{E}{ze^2 2\pi \sigma_0}$$

$$\frac{I_{tr}}{I_0} = 1 - \theta^2 \frac{E}{ze^2 2\pi \sigma_0 d}$$

$$\theta_1 = \sqrt{\frac{ze^2 2\pi \sigma_0 d}{E}}$$

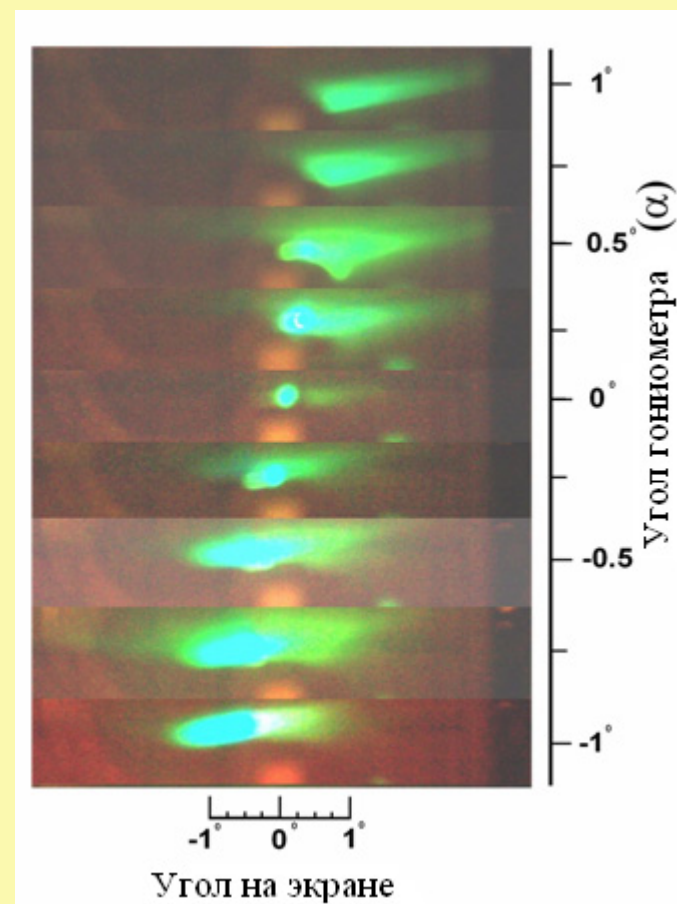
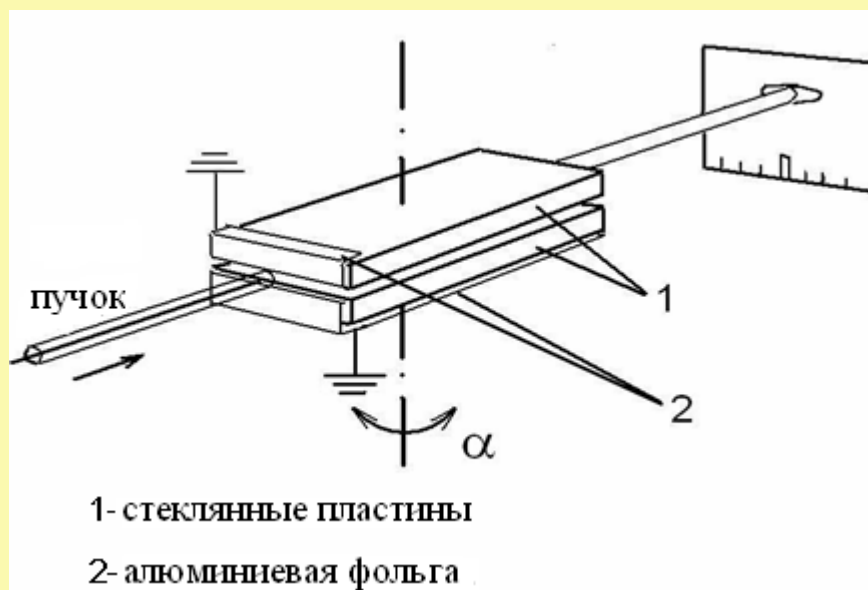


**Впервые экспериментально исследована «прозрачность» плоских капилляров при различных углах падения пучка относительно оси капилляра. На основе теоретической модели, объясняющей движение ионов в области рассеяния, показано, что в стационарном режиме пучок ионов отклоняется лишь один раз, не испытывая перерассеяния на противоположной стенке канала.**

**Показано, что поверхностная проводимость резко зависит от величины заряда, который накапливается на стенке канала при воздействии скользящего пучка ионов на диэлектрик.**

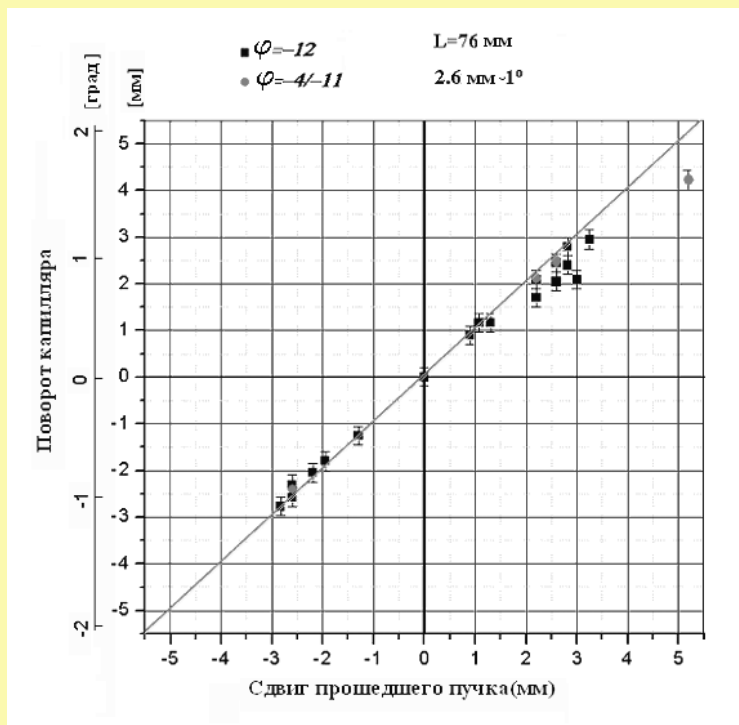
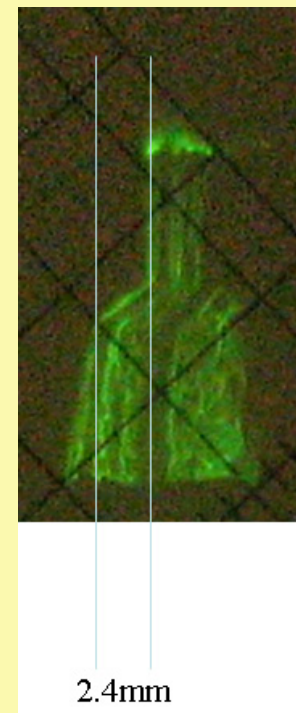
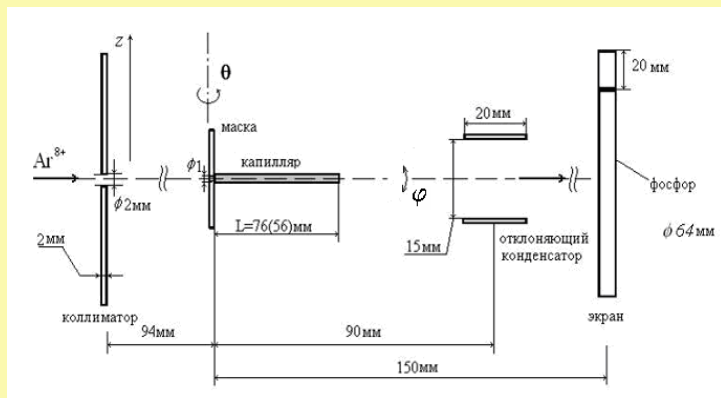
## Глава 3. Эффект двойного управления

Пучок протонов  $E=100\text{кэВ}$ ,  $I=2\text{мкА}$   
пластина:  $L=5\text{см}$ ,  $d=0.1\text{мм}$ .





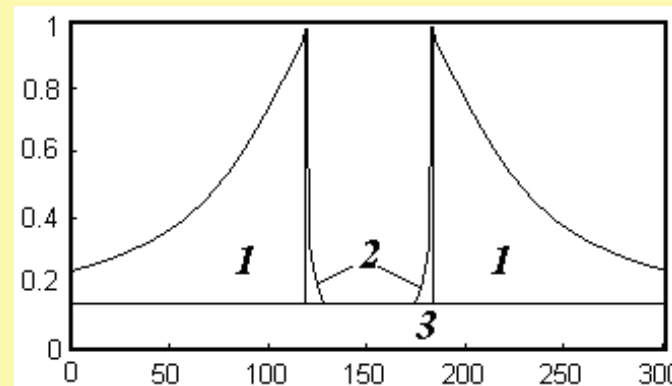
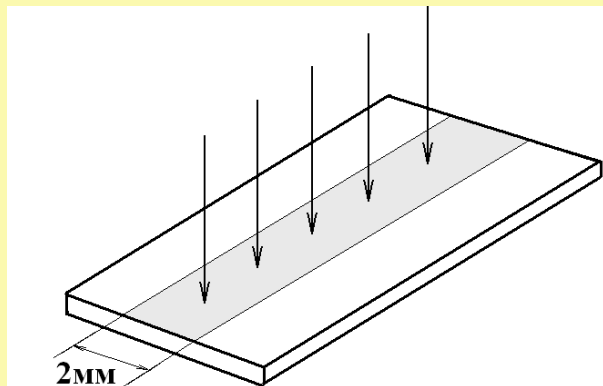
# Глава 3. Эффект двойного управления



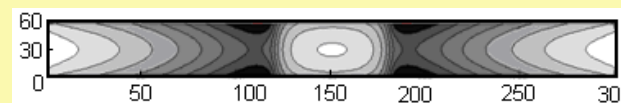
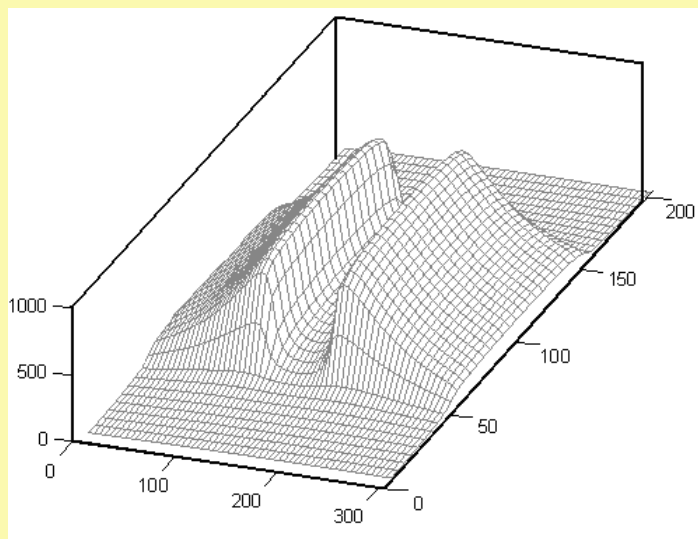
**Пучок следует за капилляром в соотношении один к одному**

# Глава 3. Эффект двойного управления

Есть две возможности: или микро, или макро структура заряда на поверхности



Распределение заряда

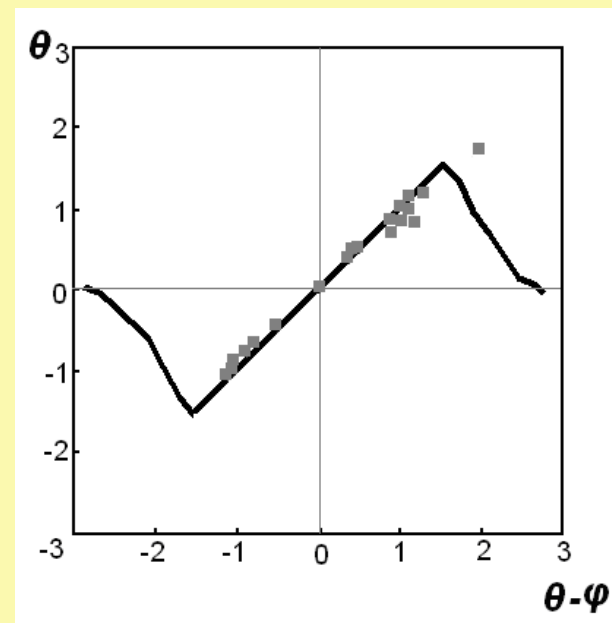
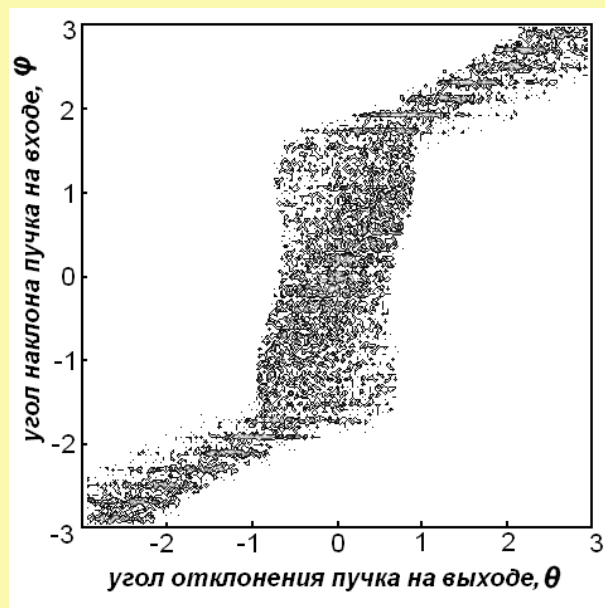
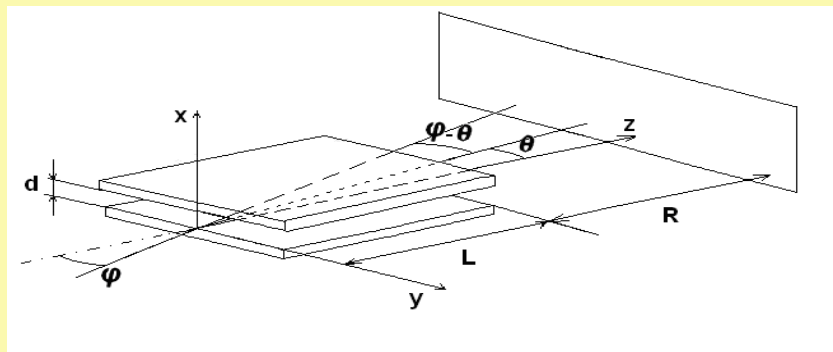


Распределение потенциала в среднем по длине сечения капилляра

Потенциал в срединной плоскости канала

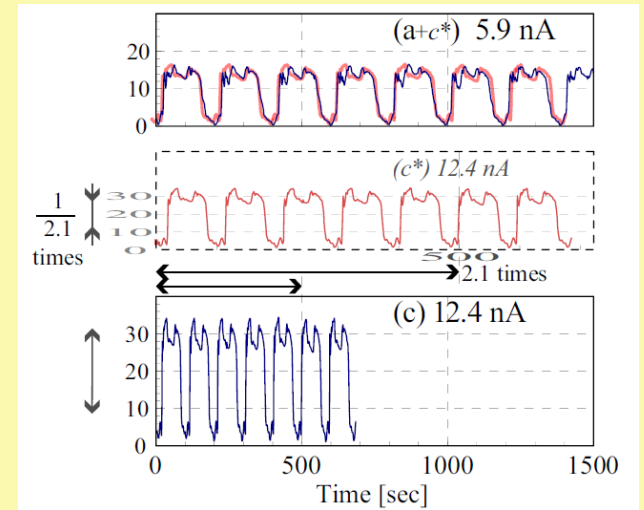
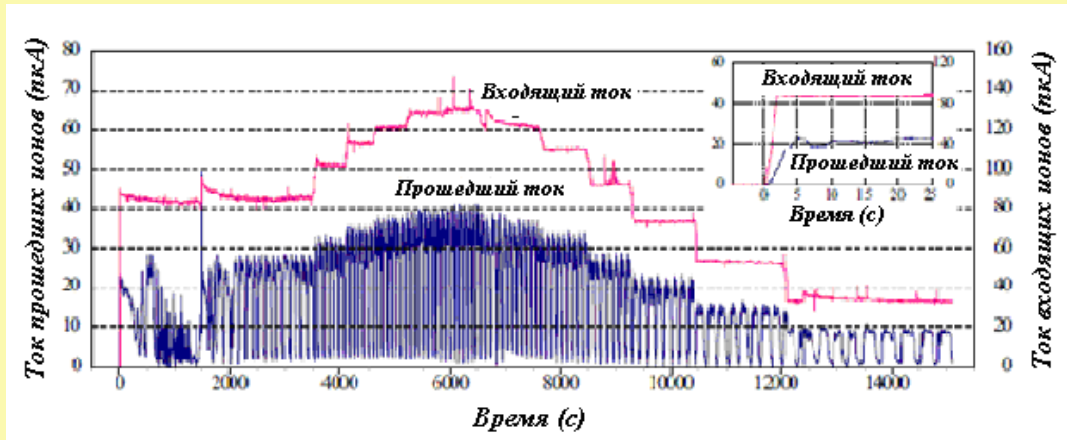
# Глава 3. Эффект двойного управления

## Моделирование траекторий



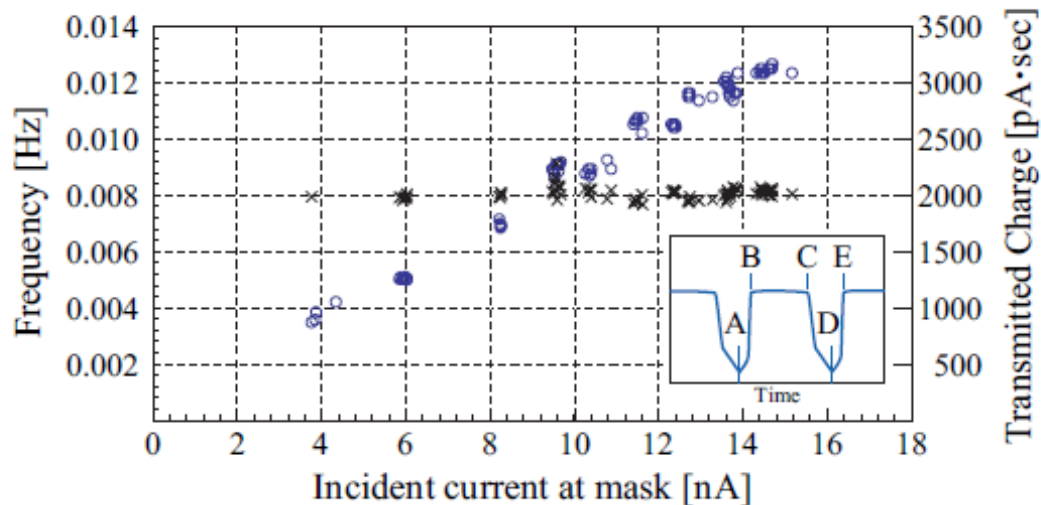
**Впервые экспериментально показано, что имеет место двойное управление пучком ионов заключающееся в том, что пучок ионов следует за плоским капилляром не только при его наклоне, но и при его повороте без нарушения ориентации его плоскости вокруг оси, перпендикулярной плоскости капилляра. Поворот пучка происходит в соотношении один к одному с поворотом капилляра. Разработана теоретическая модель, объясняющая этот эффект.**

# Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов



**Подобие форм осцилляций при различных токах**

**Зависимость частоты осцилляций и заряда протекающего за одну осцилляцию от тока ионов.**

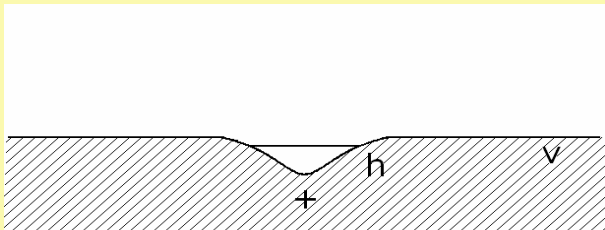


## Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов

При облучении поверхности изолятора ионами происходит много различных эффектов :

1. Зарядка поверхности.
2. Рождение заряженных точек без изменения среднего заряда поверхности (e-h пары)
3. Рождение различных других дефектов и т.п.

Положительный заряд дырки создает локализованное состояние электрона с некоторой локализацией  $r_0$ . Если поверхностная плотность этих состояний ( $n$ ) достигает величины  $n^* \sim r_0^{-2}$ , то волновые функции этих состояний перекрываются и образуется зона коллективных нелокализованных состояний электрона\*. Это зона незанятых состояний и расположена она вблизи верхнего края валентной зоны. Появляется металлическая проводимость, заряд поверхности сбрасывается и капилляр “запирается”.

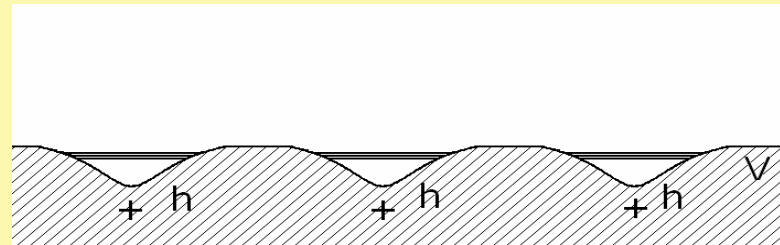
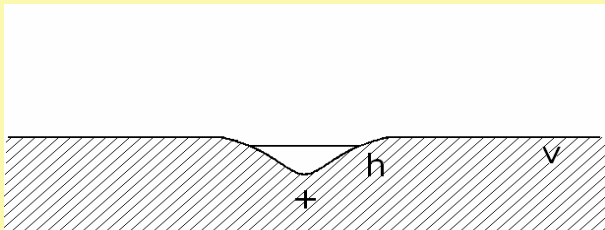


## Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов

При облучении поверхности изолятора ионами происходит много различных эффектов :

1. Зарядка поверхности.
2. Рождение заряженных точек без изменения среднего заряда поверхности (e-h пары)
3. Рождение различных других дефектов и т.п.

Положительный заряд дырки создает локализованное состояние электрона с некоторой локализацией  $r_0$ . Если поверхностная плотность этих состояний ( $n$ ) достигает величины  $n^* \sim r_0^{-2}$ , то волновые функции этих состояний перекрываются и образуется зона коллективных нелокализованных состояний электрона\*. Это зона незанятых состояний и расположена она вблизи верхнего края валентной зоны. Появляется металлическая проводимость, заряд поверхности сбрасывается и капилляр “запирается”.



# Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов

Количественная модель осцилляций. Уравнения для заряда

$$\frac{dQ(t)}{dt} = I_i - I_t - I_{leak}$$

$$I_t = \begin{cases} 0, & Q(t) < Q_0 \\ k_1(Q(t) - Q_0), & Q(t) \geq Q_0 \end{cases}$$

$$I_{leak} = I_{drift} + I_{cond}$$

$$I_{drift} = k_2 Q^2(t)$$

$$I_{cond}(t) = \begin{cases} 0 & n(t) \leq n_1, & \frac{dn}{dt} > 0 \\ k_3 Q(t) & n_2 < n(t) < n_1, & \frac{dn}{dt} < 0 \end{cases}$$

Уравнения для дефектов

$$\frac{dn}{dt} = k_4(I_0 - I_t) - k_5 n(t)$$

$$k_5 = \begin{cases} k_5^{(1)} & n(t) \leq n_1, & \frac{dn}{dt} > 0 \\ k_5^{(2)} & n_2 < n(t) < n_1, & \frac{dn}{dt} < 0 \end{cases}$$

$k_1$  – неизвестный коэффициент.

$k_2$  – коэф. дрейфа. \*

$k_3$  – проводимость после образования новой зоны  
 $k_4$  – вероятность рождения ДП ионом

$k_5^{(1)}$  – вероятность рекомбинации ДП, когда нет новой зоны

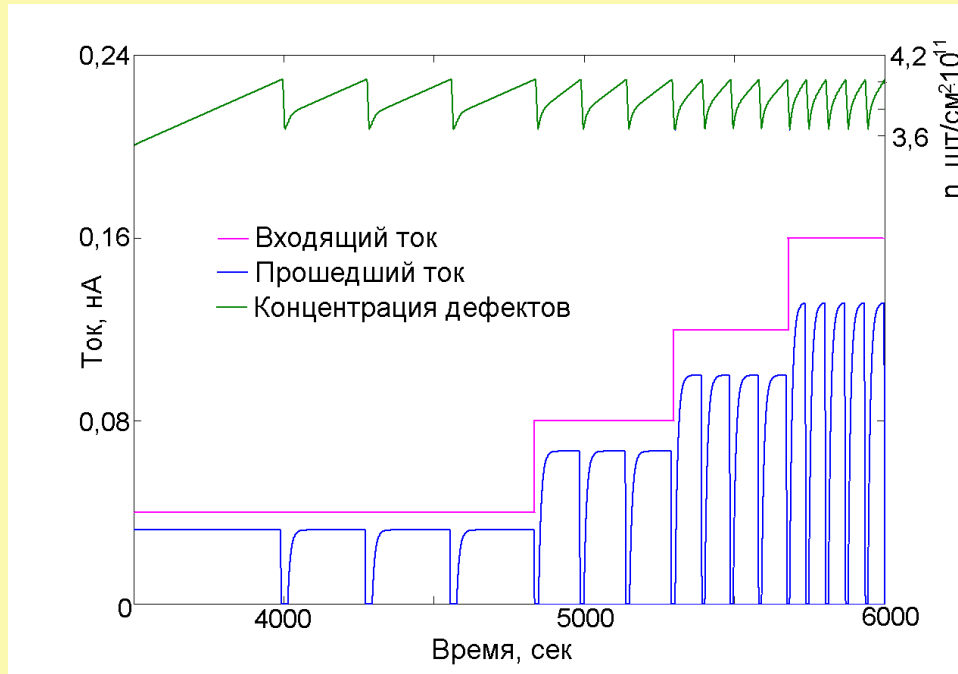
$k_5^{(2)}$  – вероятность рекомбинации ДП, когда новая зона появилась

$n_1$  – концентрация ДП, при которой возникает новая зона

$n_2$  – концентрация ДП, при которой новая зона исчезает

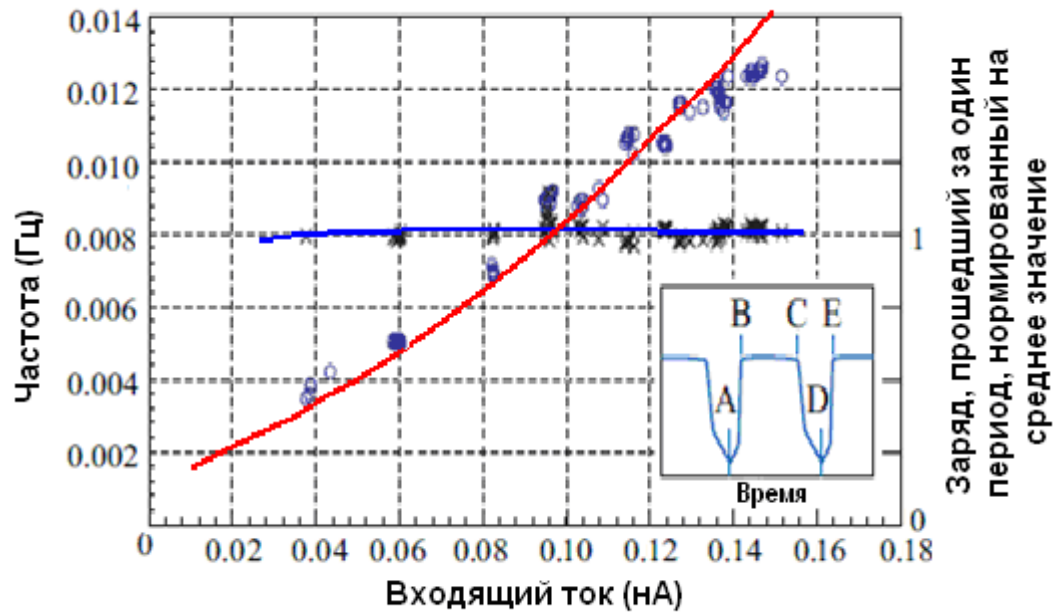


## Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов



$$k_1=0,1c^{-1}; k_2=10^{-12}c^{-1}e^{-1}; k_3=0,4c^{-1}; k_4=2e^{-1}; k_5^{(1)}=10^{-8}c^{-1}; k_5^{(2)}=0,008c^{-1};$$
$$Q_0 = 0,5 \cdot 10^{10} e; n_1=4,02 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}; n_2=3,65 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$$

## Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов

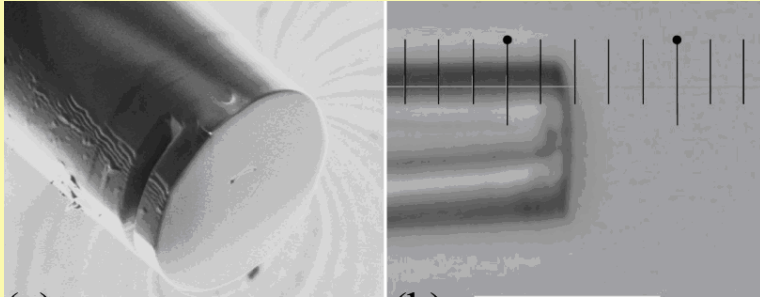


## Глава 4. Регулярные осцилляции тока ионов

**Обнаружено новое явление периодического «запирания» и «открывания» плоского капилляра (осцилляции тока прошедших ионов). Построена теоретическая модель этого явления, в рамках которой показано, что причиной периодического изменения «прозрачности» капилляра является периодический переход поверхностного слоя стекла в металлическое состояние. Предложен механизм такого перехода поверхности изолятора в металлическое состояние при радиационном воздействии, в основу которого положено предположение о генерации достаточной концентрации поверхностных дефектов, у которых волновые функции электронных состояний при этом перекрываются.**

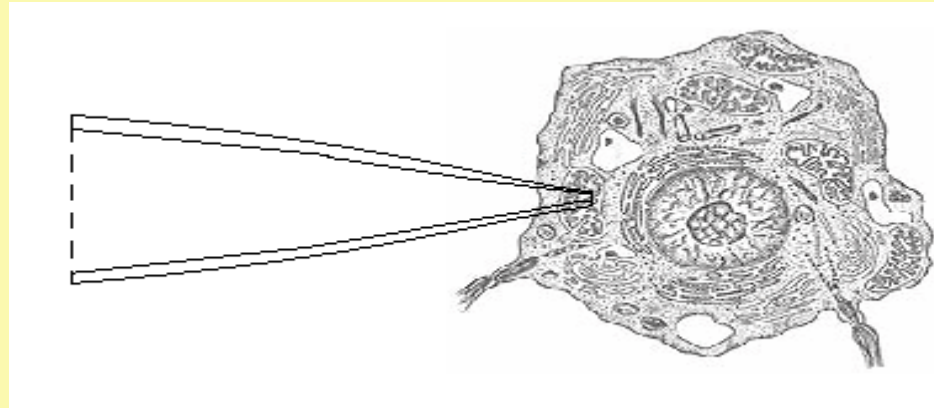
## Глава 5. Конические капилляры

### Капилляр с тонким выходным окном

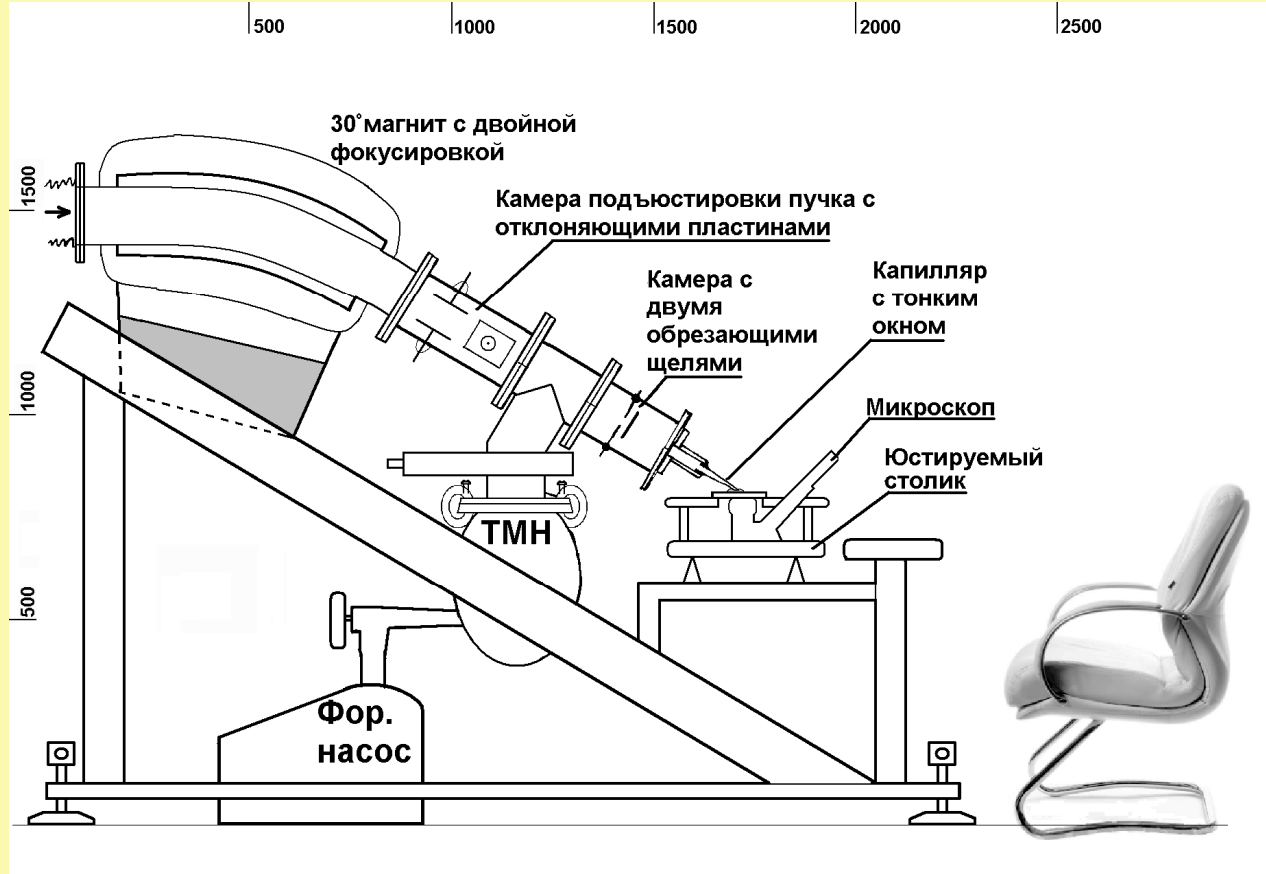


Выходное окно толщиной 1 мкм получено срезанием заплавленного конца капилляра острым ионным пучком (FIB).

### Введение ионов в биологическую клетку.



# Глава 5. Конические капилляры



**Предложена идея и проведен первый эксперимент по прицельной бомбардировке участка ядра живой клетки ускоренными  $\alpha$ -частицами с помощью разработанного для этой цели конического стеклянного капилляра с тонким выходным окном.**

## **ВЫВОДЫ**

**Доказано, что основными силами обеспечивающими транспортировку ионов в капилляре без контакта со стенками являются силы, связанные с краевым эффектом, т.е. с конечностью длины капилляра. При большой длине капилляра в средней его части существенную роль играют градиентные силы, возникающие благодаря дискретной структуре заряда стенки канала.**

**Дрейф зарядов – это основной механизм разрядки стенок капилляра.**

**Впервые экспериментально исследована «прозрачность» плоских капилляров при различных углах падения пучка относительно оси капилляра. На основе теоретической модели, объясняющей движение ионов в области рассеяния, показано, что в стационарном режиме пучок ионов отклоняется лишь один раз, не испытывая перерассеяния на противоположной стенке канала.**

## **ВЫВОДЫ**

**Показано, что поверхностная проводимость резко зависит от величины заряда, который накапливается на стенке канала при воздействии скользящего пучка ионов на диэлектрик.**

**Впервые экспериментально показано, что имеет место двойное управление пучком ионов заключающееся в том, что пучок ионов следует за плоским капилляром не только при его наклоне, но и при его повороте без нарушения ориентации его плоскости вокруг оси, перпендикулярной плоскости капилляра. Поворот пучка происходит в соотношении один к одному с поворотом капилляра. Разработана теоретическая модель, объясняющая этот эффект.**



## ВЫВОДЫ

**Обнаружено новое явление периодического «запирания» и «открывания» плоского капилляра (осцилляции тока прошедших ионов). Построена теоретическая модель этого явления, в рамках которой показано, что причиной периодического изменения «прозрачности» капилляра является периодический переход поверхностного слоя стекла в металлическое состояние. Предложен механизм такого перехода поверхности изолятора в металлическое состояние при радиационном воздействии, в основу которого положено предположение о генерации достаточной концентрации поверхностных дефектов, у которых волновые функции электронных состояний при этом перекрываются. Предложена идея и проведен первый эксперимент по прицельной бомбардировке участка ядра живой клетки ускоренными  $\alpha$ -частицами с помощью разработанного для этой цели конического стеклянного капилляра с тонким выходным окном.**

***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ***