

## Разработка метода безабберационной фокусировки ионных пучков для масс – сепаратора высокого разрешения на нейтронном канале реактора ПИК.

Тема семинара основана на результатах трех работ, опубликованных в журналах ЖТФ: 2020, **90**(3), 471; 2020, **90**(16), 1016; 2021, **91**(11), 1756. В первой работе описан метод фазовых диаграмм, на основе этого метода разработана безабберационная линза и корректоры aberrаций и эти результаты использованы для оптимизации масс – сепараторов. Под оптимизацией подразумевается достижение максимально возможной разрешающей способности.

Поскольку понятие фазовых диаграмм следует из теоремы Лиувилля, кратко напомним ее содержание.

- **Теорема Лиувилля**

- Понятия фазового пространства, фазовых диаграмм и эмиттанта, как площади фазовой диаграммы, следуют из теоремы Лиувилля. Теорема гласит, что
- шестимерный интеграл от функции распределения частиц  $F$  по трем компонентам координат и трем компонентам импульсов сохраняется для консервативных систем.
- В другой формулировке  $dF/dt=0$ , плотность потока по фазовой траектории не изменяется. Аналогия с течением несжимаемого газа или жидкости. В разные моменты времени форма объема может изменяться, но сам объем остается тем же. Теорема выводится из уравнений Гамильтона и уравнения непрерывности.
  - Область применения весьма обширна.
- Ядерная физика, физика элементарных частиц, физика плазмы, статистическая физика, приборостроение, медицина, дефектоскопия, астрофизика, обработка материалов в промышленности, лучевая сварка и так далее, иначе везде, где используются пучки частиц или объекты можно считать частицами.
- Пучки диагностируются обычно в каких то сечениях и шестимерный интеграл переходит в четырехмерный.
- А если уравнения движения по обоим плоскостям разделяются, то получаются две плоские фазовые диаграммы, одна для горизонтальной плоскости и другая для вертикальной.

- В электростатическую ионную оптику понятие эмиттанса перешло из физики ускорителей, в которой используется представление фазовой диаграммы в виде эллипса. В ускорителях движение циклично и есть области с высокочастотными полями. В результате частицы приобретают малые поперечные колебания, называемые бетатронными. Вид фазовой траектории можно получить рассматривая движение частицы в одномерной потенциальной яме или движение маятника.

$$\frac{p}{p_0} = \sin \vartheta, \frac{z}{z_0} = \cos \vartheta \text{ или } \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 = 1$$

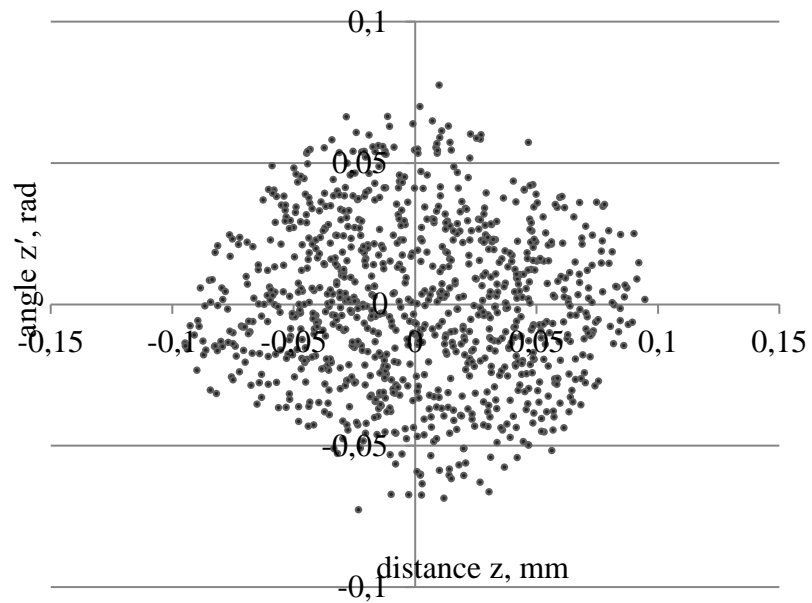
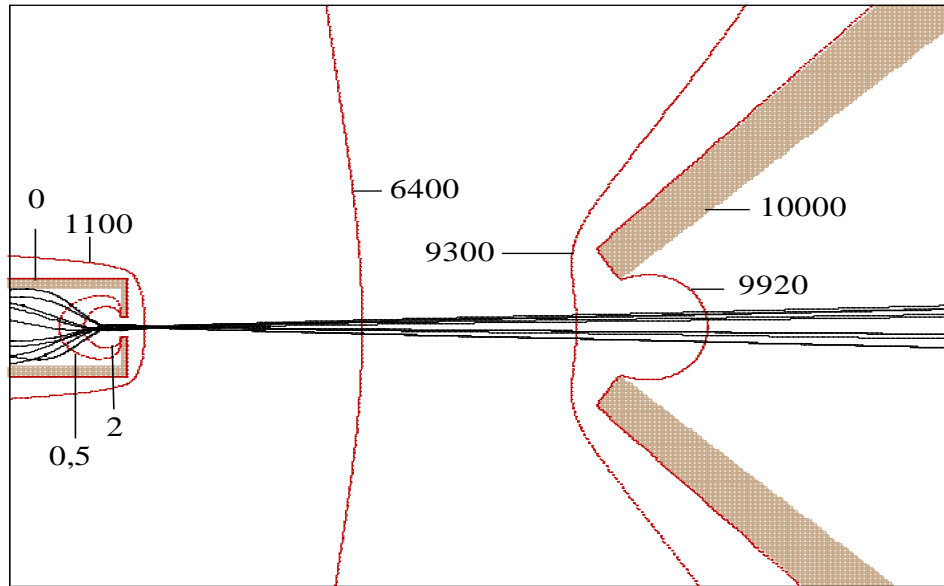
- Другая форма записи этого эллипса в кроссовере пучка

$$\beta p^2 + \gamma z^2 = \varepsilon / \pi, \text{ где } \gamma = 1 / \beta = p_0 / z_0 \text{ и } \varepsilon / \pi = p_0 z_0$$

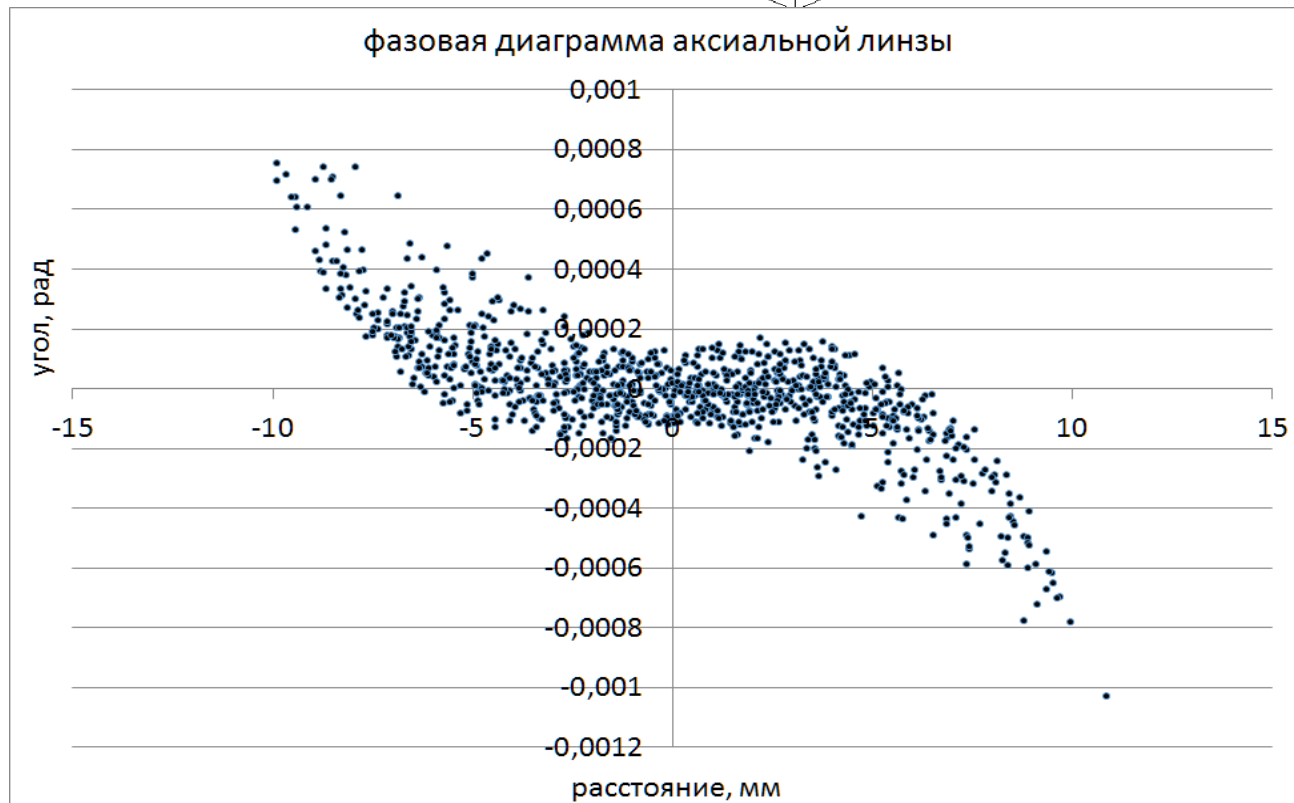
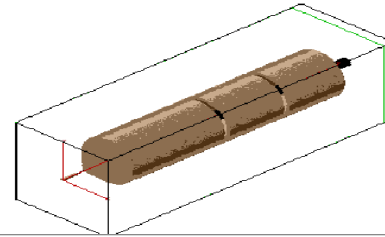
- При отклонении от точки кроссовера пучок может расходиться (или сходиться) и эллипс поворачивается и описывается тремя параметрами, называемыми параметрами Твисса. Параметр  $\gamma$  называется бетатронным.

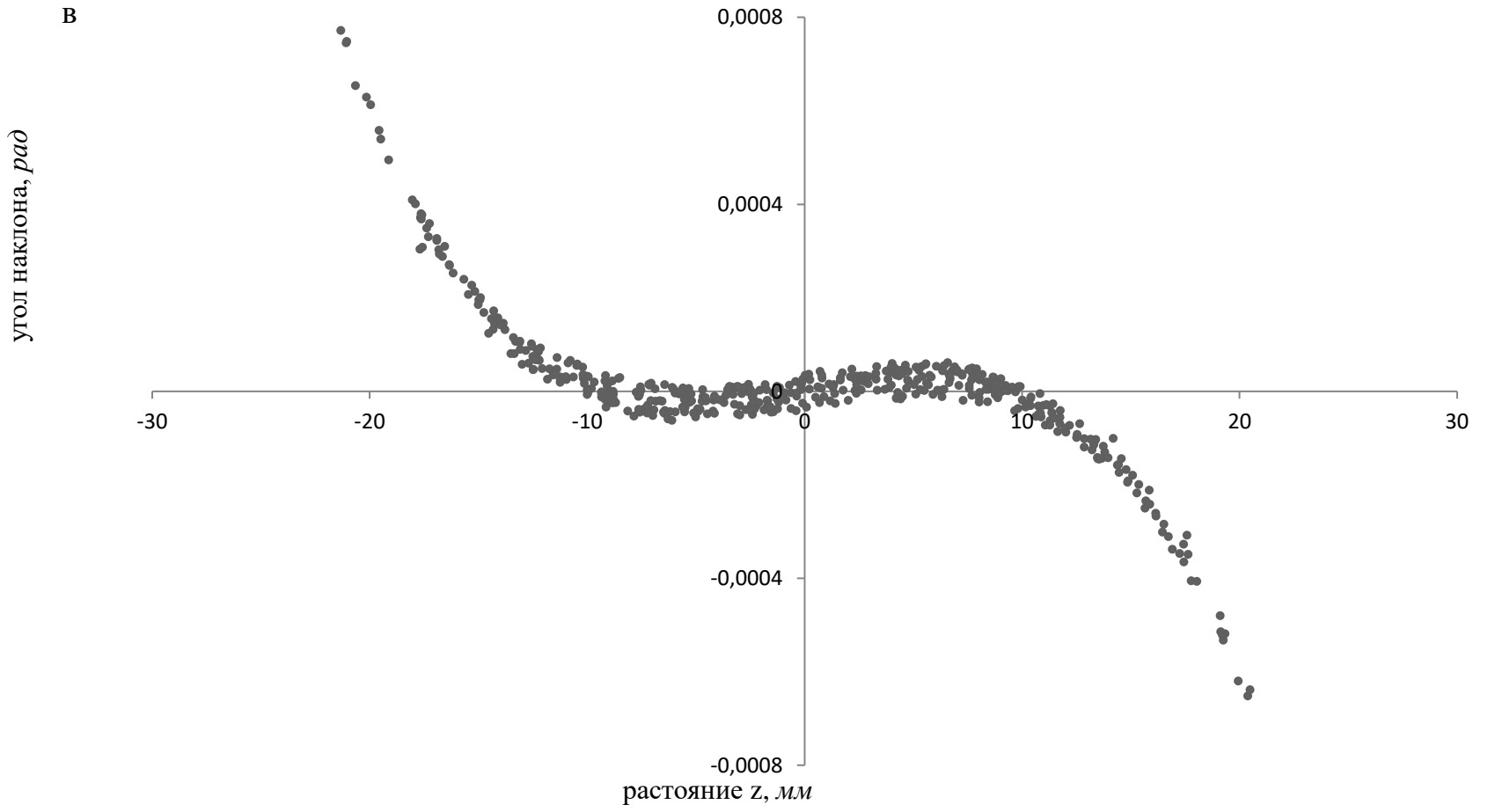
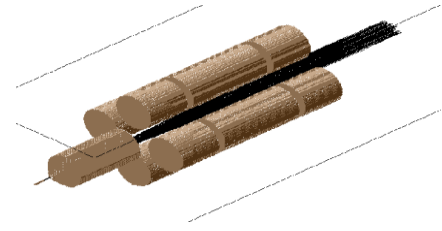
- Это представление фазовой диаграммы в виде эллипса часто встречается при описании пучков в сепараторах, в частности сепараторов ISOLDE в Церне и других.
- Но, в электростатической оптике нет цикличности движения и нет колебательных процессов. Поэтому сложившееся стереотипное представление диаграммы в виде эллипса является ошибочным.
- В линейном случае (при отсутствии аберраций), если фазовые точки расположены на линейном отрезке, то при прохождении областей с электростатическим полем этот отрезок может повернуться, изменить масштаб, но останется линейным.
- Поэтому задача создания высококачественной оптики сводится к созданию линейных пучков, формируемых безабберационными элементами.
- До сих пор в мировой практике безабберационные фокусирующие элементы не были известны, несмотря на значительные усилия по их поиску. В монография Силады описаны эти попытки.
- Далее, чтобы иметь дело с пучками ионов опишем ионный источник.

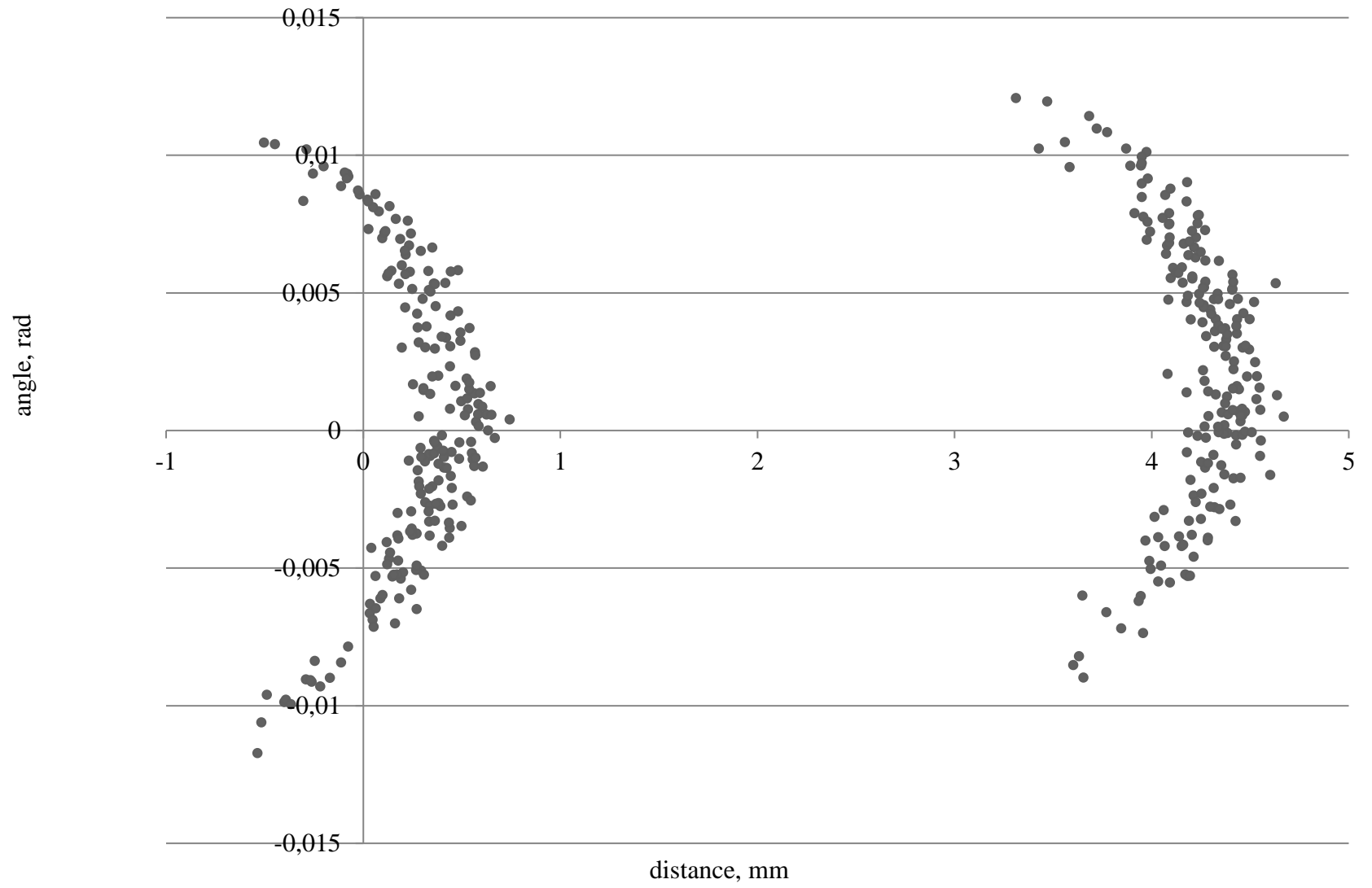
# Ионный источник



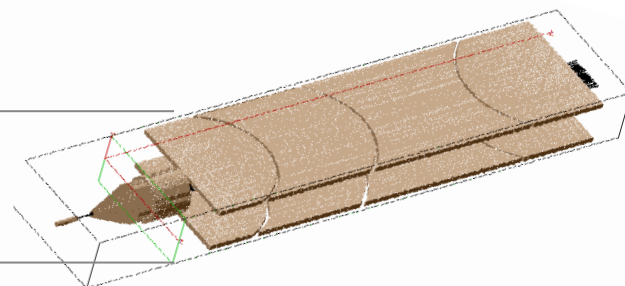
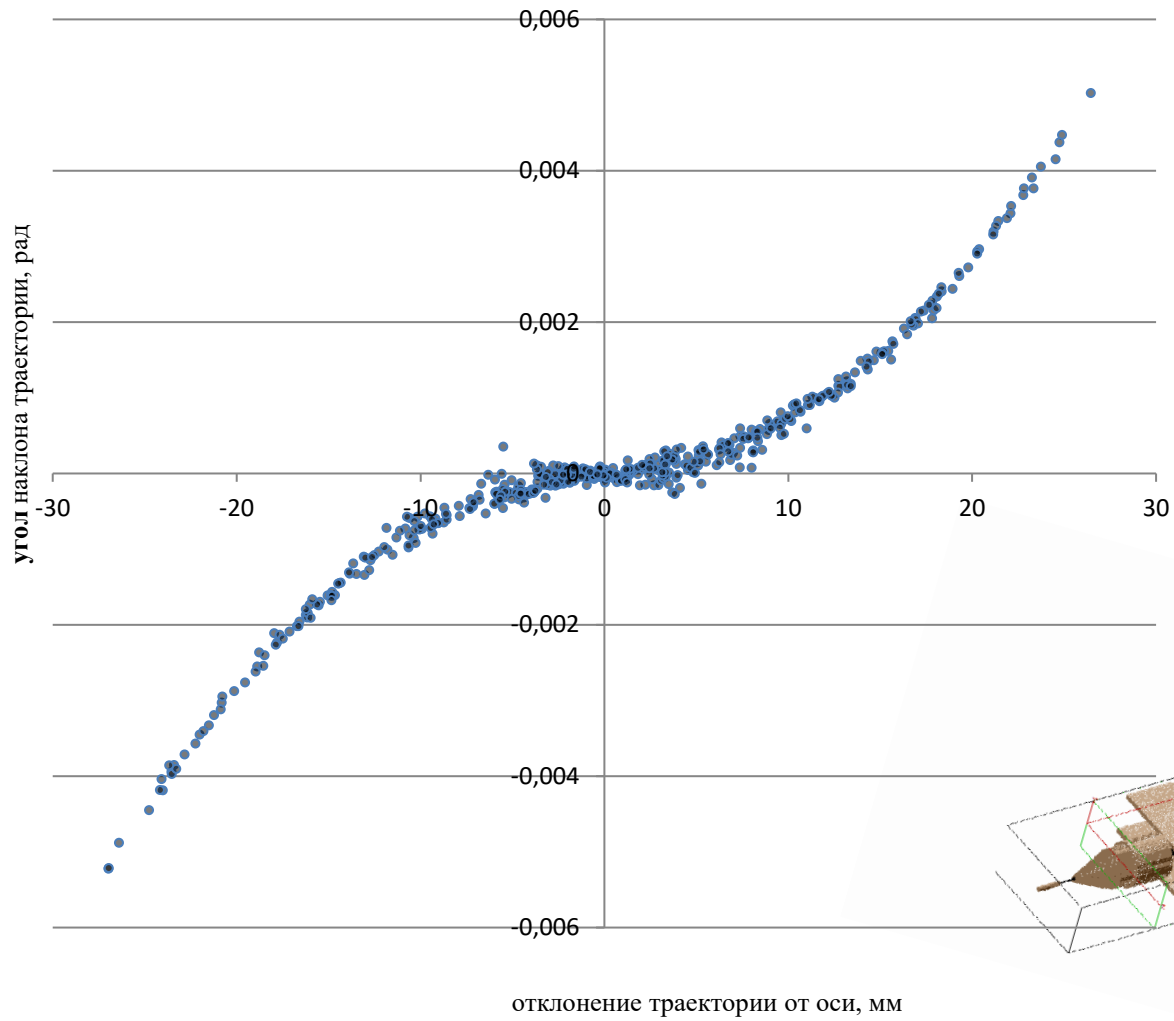
- Дискуссия в монографии Силады. Трубка длиной 2.5 мм и диаметром 0.2 мм.
- Пучок источника линейен.
- Приведем примеры фазовых диаграмм широко используемых ионно-оптических элементов.

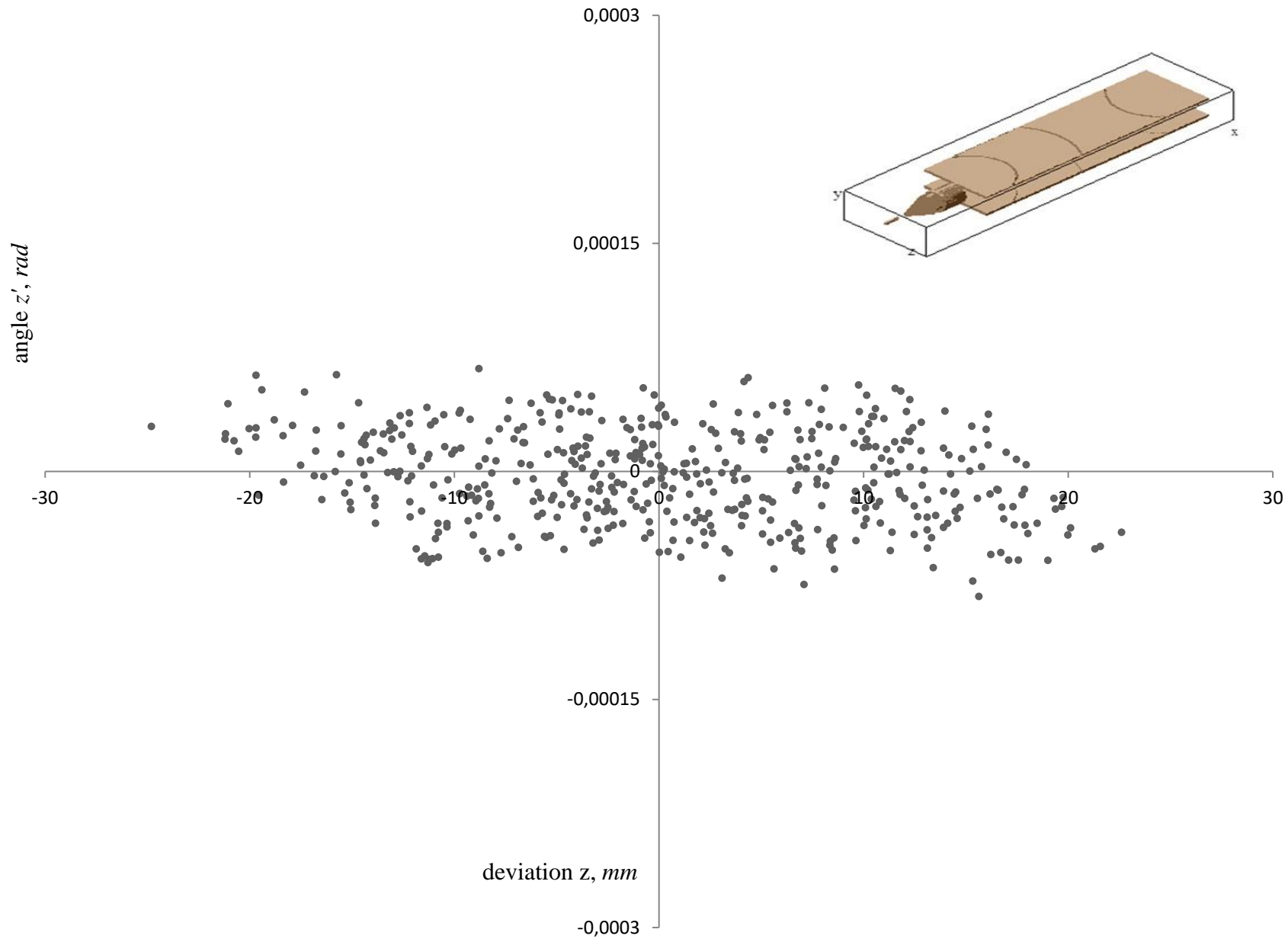




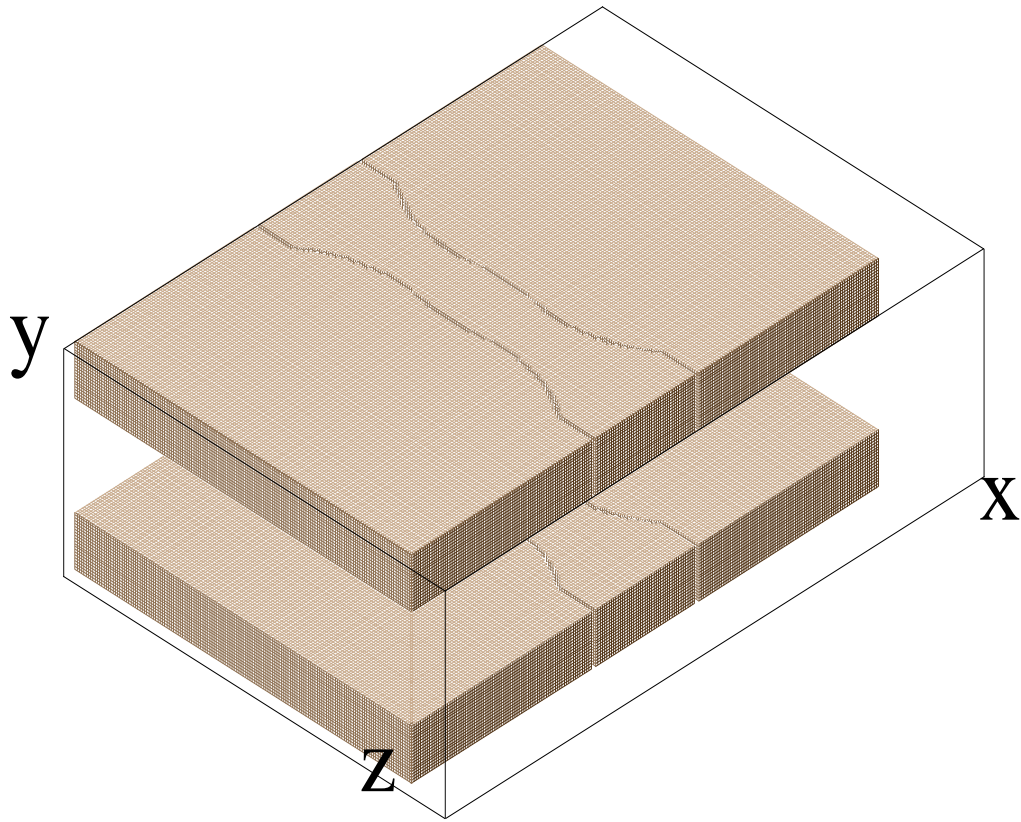








a



## Оптимизация сепараторов

- Ewald H., Hintenberger H. Methoden und Anwendungen der Massenspektroskopie. Weinheim: Verlag Chemie, 1953.

$$M_z = \begin{pmatrix} \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_1)}{\cos \varepsilon_1} & \rho \sin \vartheta & \rho(1 - \cos \vartheta) / 2 \\ \frac{\sin \Omega}{\rho \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2} & \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_2)}{\cos \varepsilon_2} & (\sin \vartheta + \operatorname{tg} \varepsilon_2 (1 - \cos \vartheta)) / 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} z \\ z' \\ \Delta m / m \end{pmatrix}$$

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_1 & \rho \vartheta \\ -\frac{1}{\rho} (\operatorname{tg} \varepsilon_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_2 (1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_1)) & 1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_2 \end{pmatrix}.$$

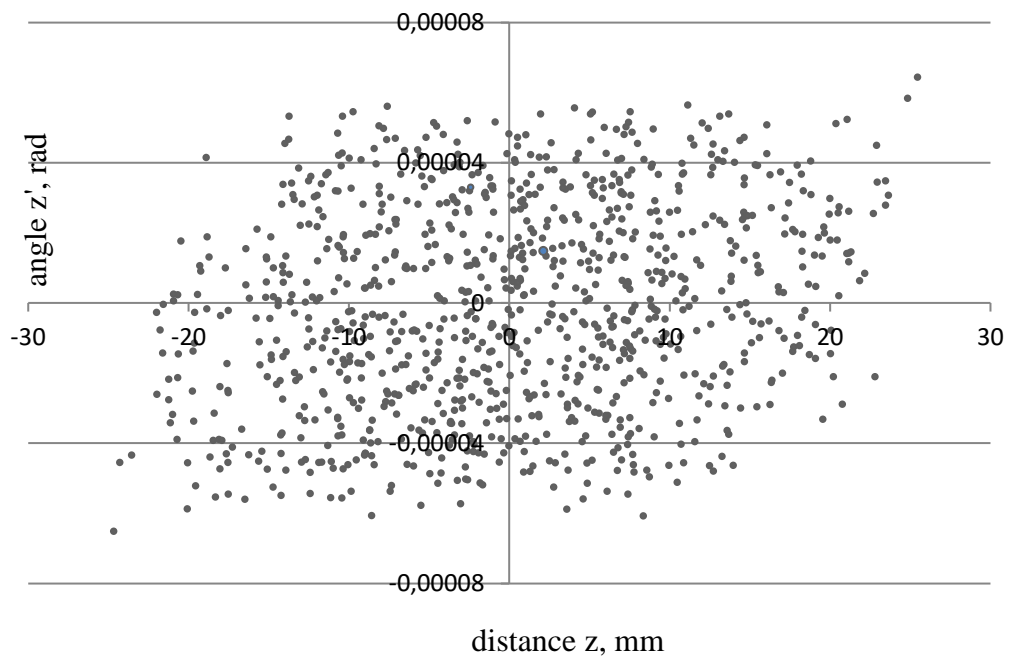
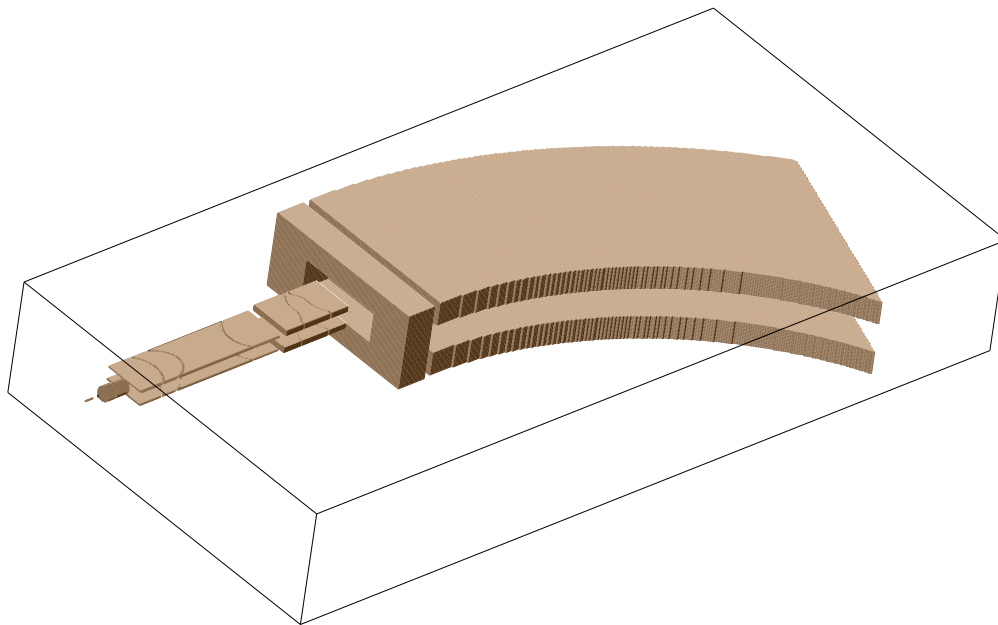
$$\langle L_i \rangle = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & L_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

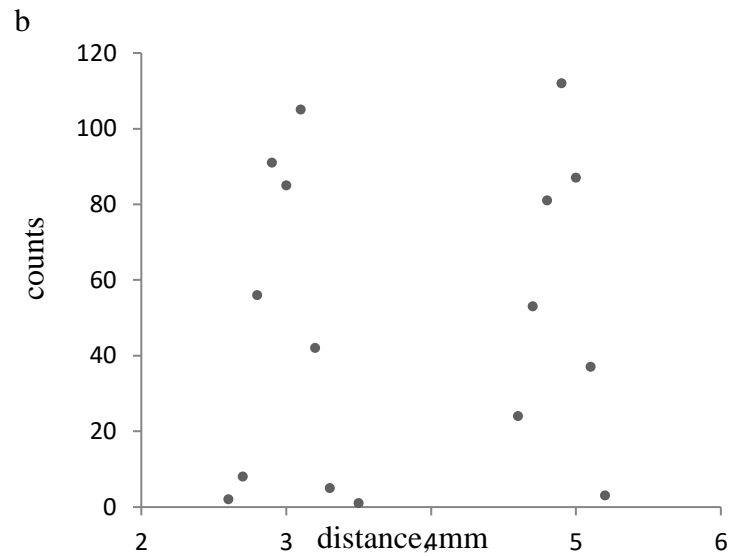
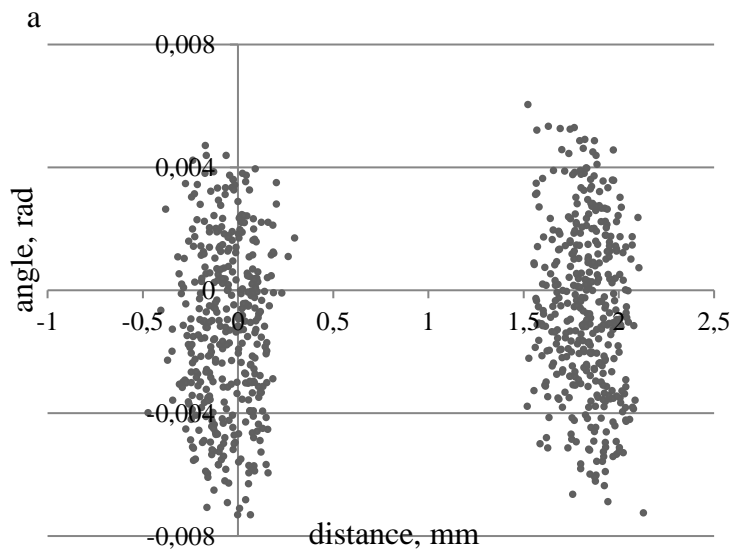
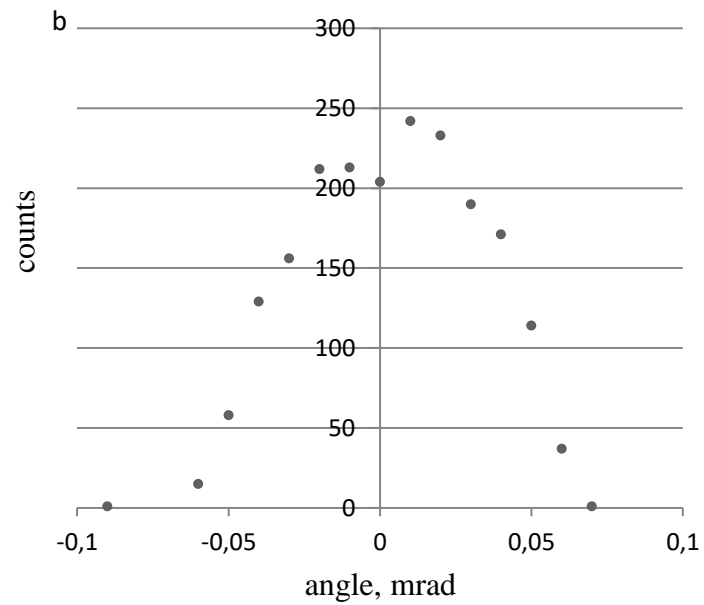
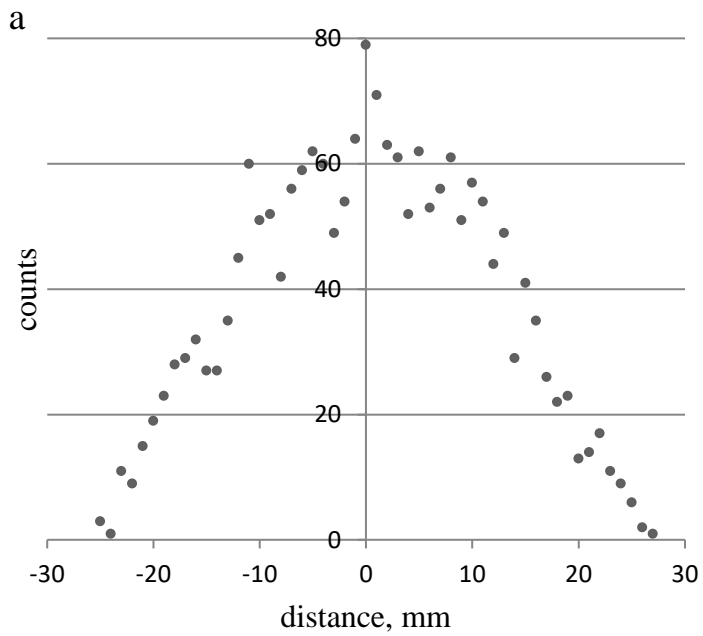
$$S_i = (I_i)(M_i)$$

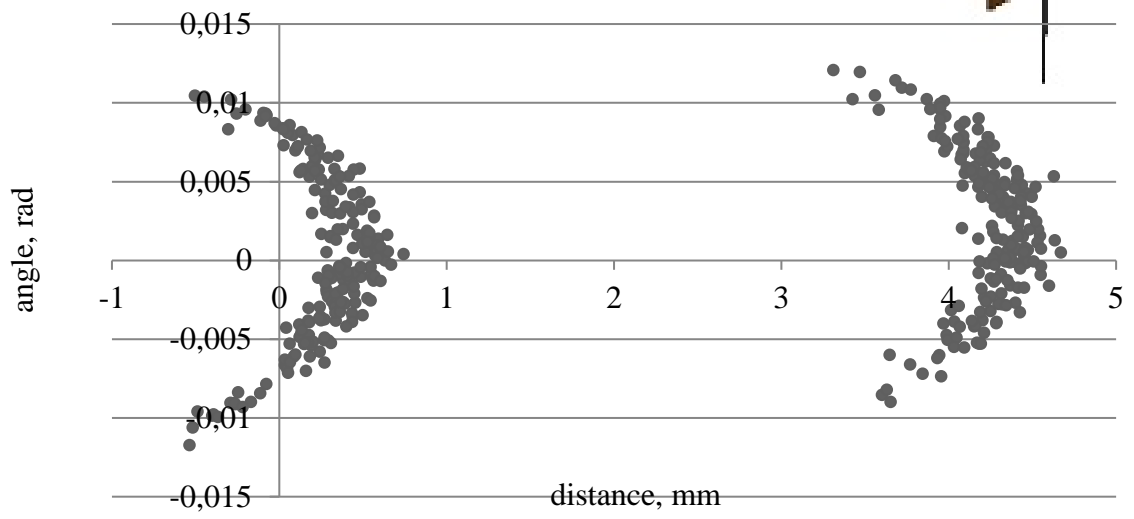
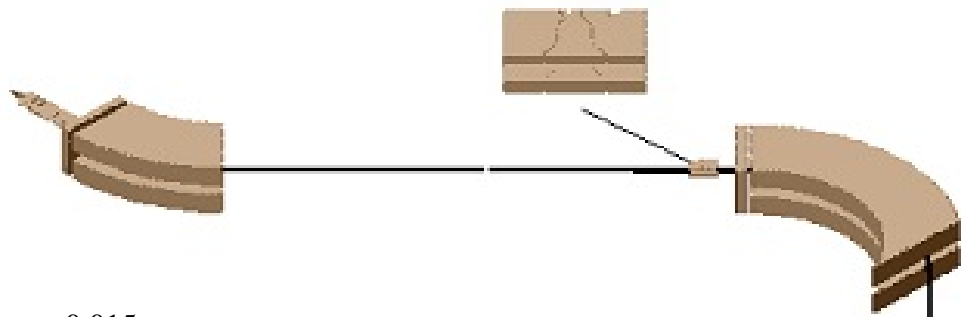
$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{S_{z13}}{S_{z12}\bar{z}'} = \frac{S_{z13}}{S_{z12}} \frac{\bar{z}}{\eta} = 0.408 \frac{\bar{z}}{\eta}$$

$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{S_{13}}{S_{12}} \frac{\bar{z}}{\eta} = 0.571 \frac{\bar{z}}{\eta}$$

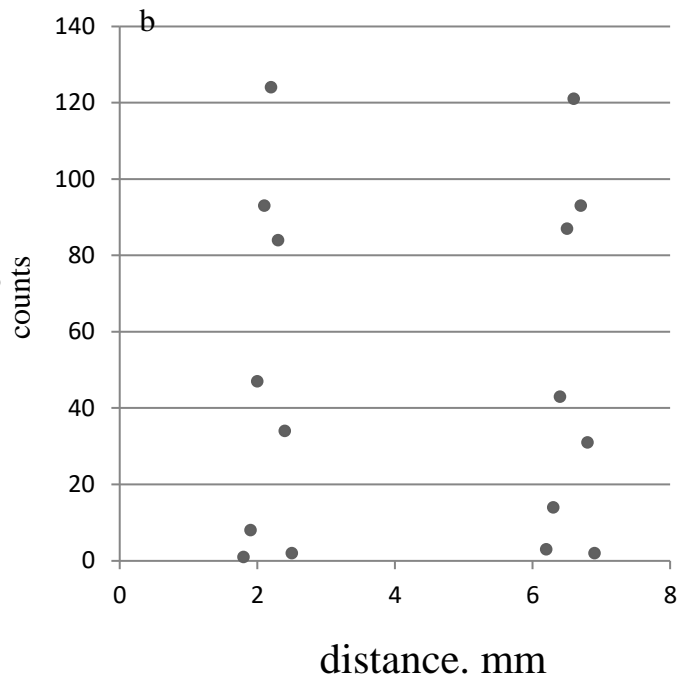
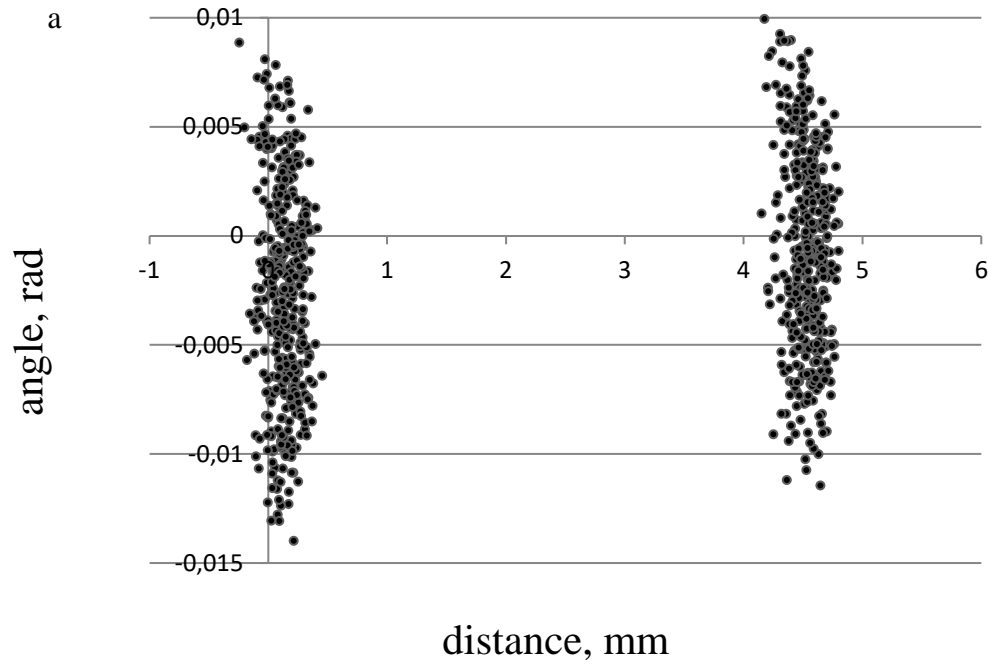
$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = -\frac{S_{z13}}{S_{z11}\bar{z}} = \frac{S_{z13}\bar{z}'}{\eta} = \frac{1.5\rho\bar{z}'}{\eta}$$











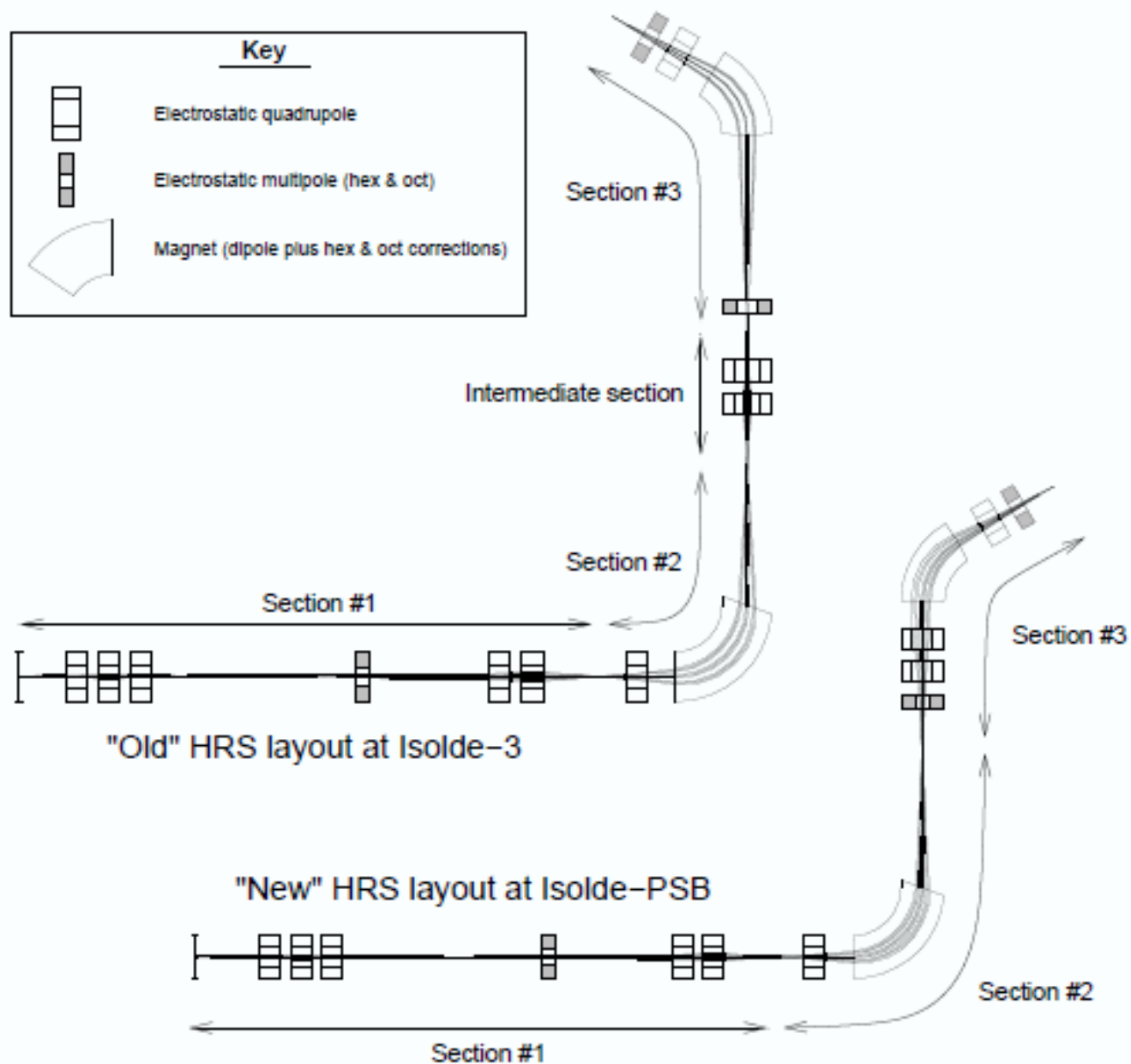


Figure 1: Overview of HRS ion optics — old and new

- При этом разрешающая способность этого сепаратора не высока и находится в интервале 3000 – 4500, что указывает на явную нелинейность системы.
- Для эмиттанса определен интервал  $\pi(10-20) \text{ mm} * \text{mrad}$
- Тогда для получения разрешения в 14000 в соответствии с линейной формулой ширина линейно сфокусированного пучка должна быть равна 450 мм для сепаратора ISOLDE 4 и 500 мм для сепаратора Isolde 1, изображенного на рисунке 5. Это нереально большие величины, значительно превышающие апертуру используемых линз.

## **Заключение**

- Показано, что ионно-фокусирующую систему можно сделать линейной и тем самым качество масс-сепараторов улучшить в несколько раз.