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 безаберрационная линза и корректоры аберраций 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 эмиттанса, 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.

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

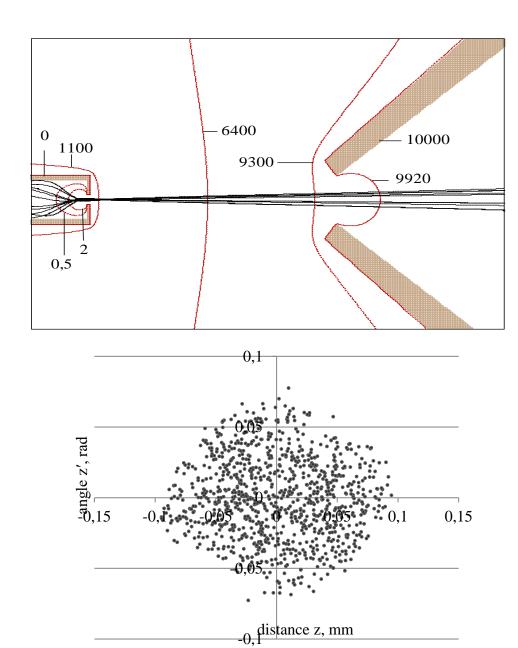
• Другая форма записи этого эллипса в кроссовере пучка

$$\beta p^2 + \gamma z^2 = \varepsilon / \pi$$
, $\varepsilon \partial e \gamma = 1 / \beta = p_0 / z_0 u \varepsilon / \pi = p_0 z_0$

 При отклонении от точки кроссовера пучок может расходиться (или сходится) и элиппс поворачивается и описывается тремя параметрами, называемыми параметрами Твисса. Параметр ү 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 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 безаберрационные фокусирующие элемены не были известны, несмотря на значительные усилия по их поиску. В монография Силадьи описаны эти попытки.
- Далее, чтобы иметь дело с пучками ионов опишем ионный источник.

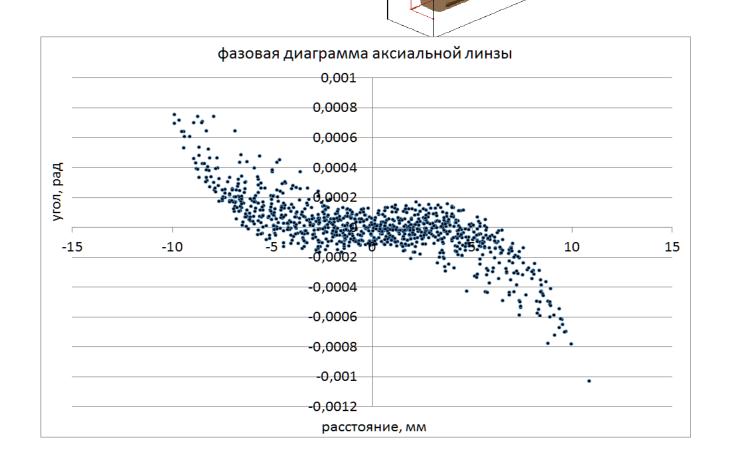
Ионный источник

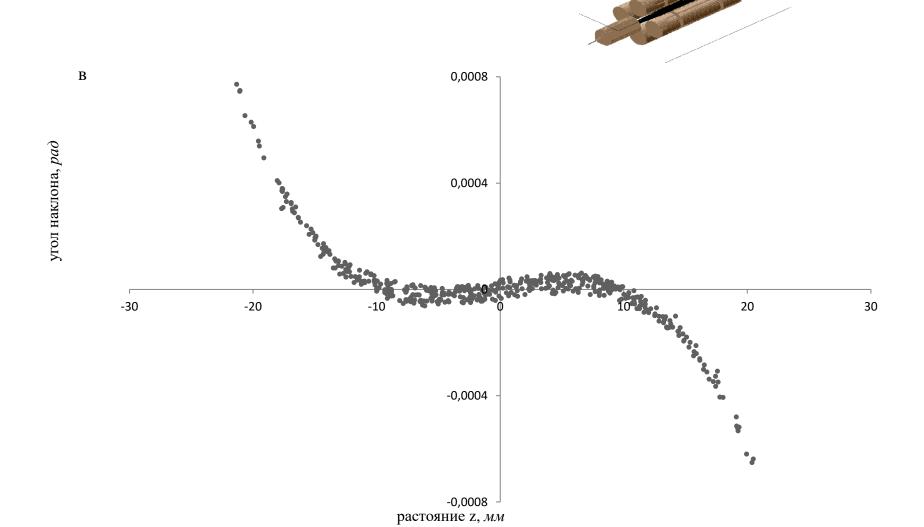


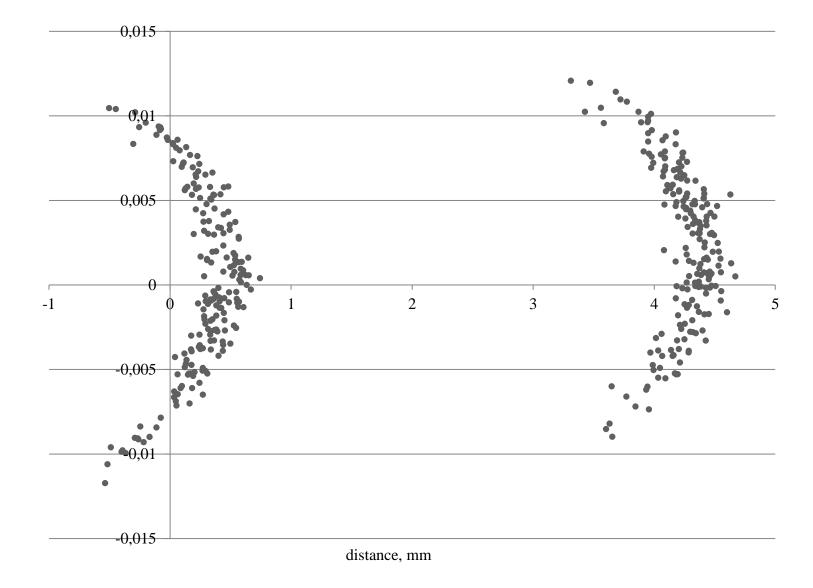
- Дискусия в монографии Силадьи. Трубка длиной 2.5 мм и диаметром 0.2 мм.
- Пучок источника линеен.

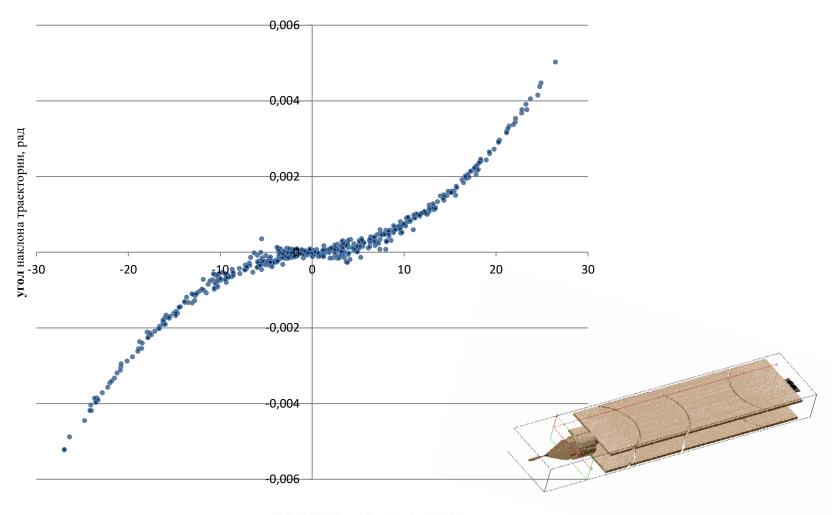
• Приведем примеры фазовых диаграмм широко используемых ионно-

оптических элементов.

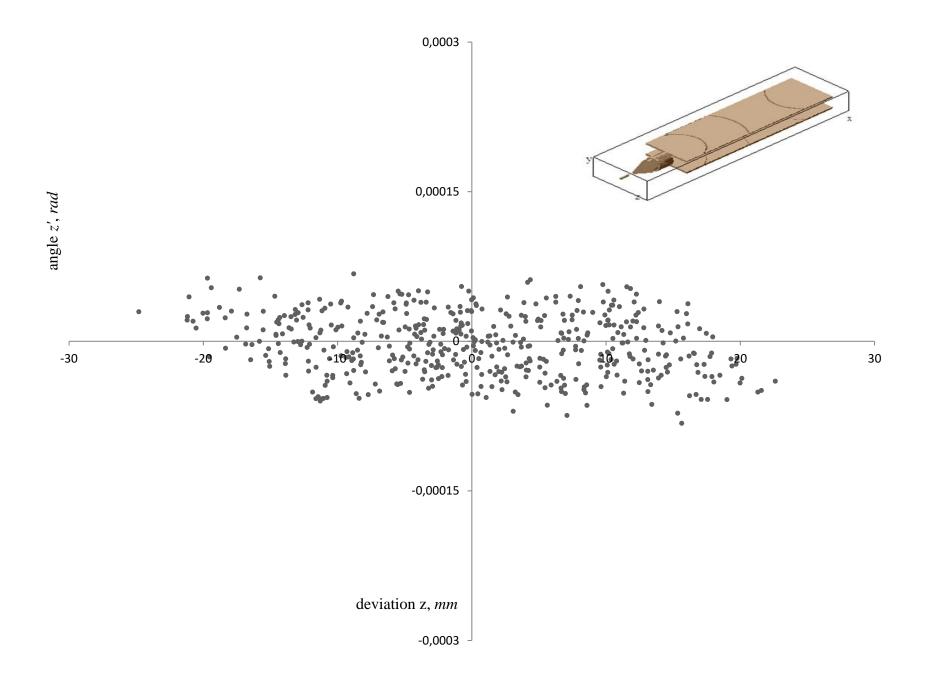


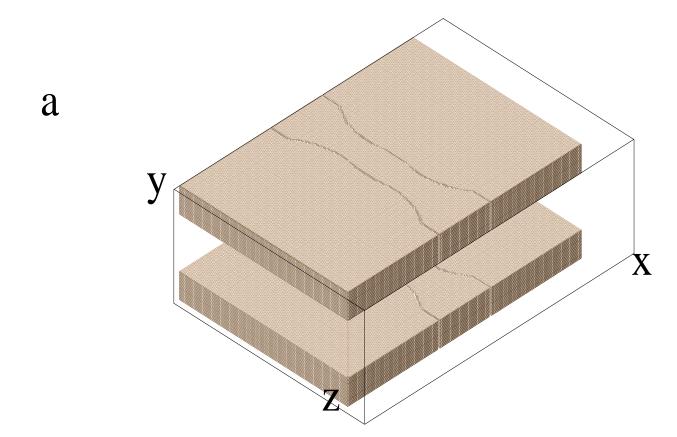






отклонение траектории от оси, мм





Оптимизация сепараторов

• Ewald H., Hintenberger H. Methoden und Anwendungen der Massenspectroskopie. Weinheim: Verlag Chemie, 1953.

$$M_{z} = \begin{pmatrix} \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_{1})}{\cos\varepsilon_{1}} & \rho\sin\vartheta & \rho(1-\cos\vartheta)/2 \\ -\frac{\sin\Omega}{\rho\cos\varepsilon_{1}\cos\varepsilon_{2}} & \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_{2})}{\cos\varepsilon_{2}} & (\sin\vartheta + tg\varepsilon_{2}(1-\cos\vartheta))/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad \begin{pmatrix} z \\ z' \\ \Delta m/m \end{pmatrix}$$

$$M_{y} = \begin{pmatrix} 1 - \theta t g \varepsilon_{1} & \rho \theta \\ -\frac{1}{\rho} (t g \varepsilon_{1} + t g \varepsilon_{2} (1 - \theta t g \varepsilon_{1})) & 1 - \theta t g \varepsilon_{2} \end{pmatrix}.$$

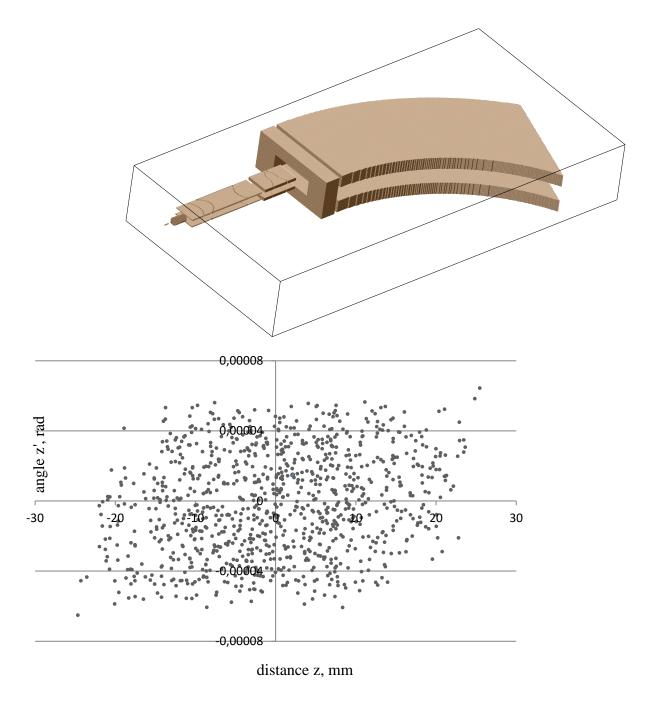
$$(Z_{i}) = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & Z_{i} \\ \mathbf{O} & \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

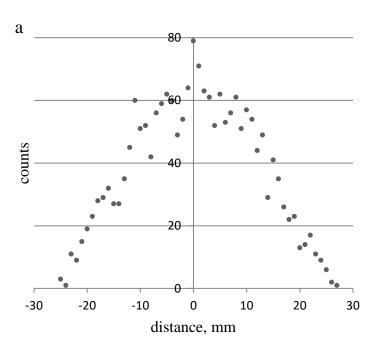
$$S_i = (l_i)(M_i)$$

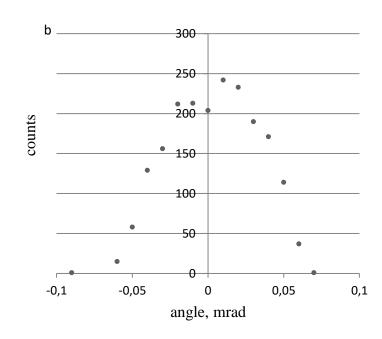
$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{S_{z13}}{S_{z12}\overline{z}'} = \frac{S_{z13}}{S_{z12}} \frac{\overline{z}}{\eta} = 0.408 \frac{\overline{z}}{\eta} \qquad \tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{S_{13}}{S_{12}} \frac{\overline{z}}{\eta} = 0.571 \frac{\overline{z}}{\eta}$$

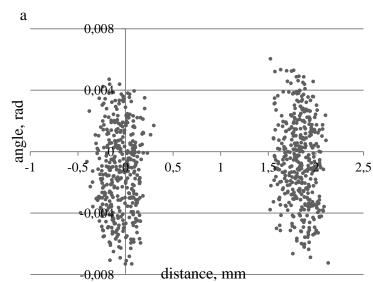
$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{S_{13}}{S_{12}} \frac{z}{\eta} = 0.571 \frac{z}{\eta}$$

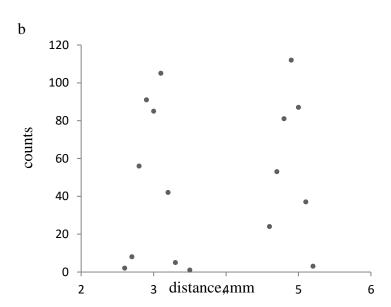
$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = -\frac{S_{z13}}{S_{z11}\overline{z}} = \frac{S_{z13}\overline{z}'}{\eta} = \frac{1.5\rho\overline{z}'}{\eta}$$

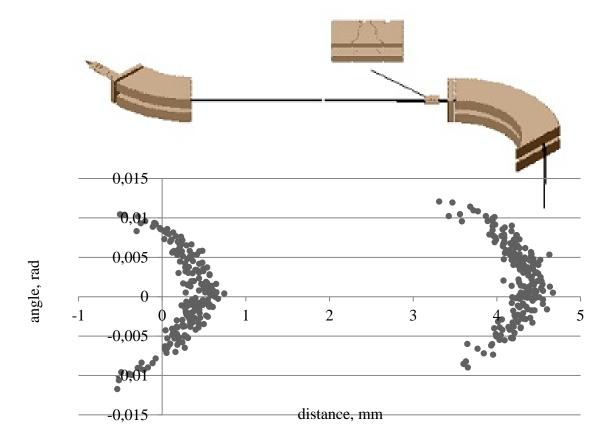


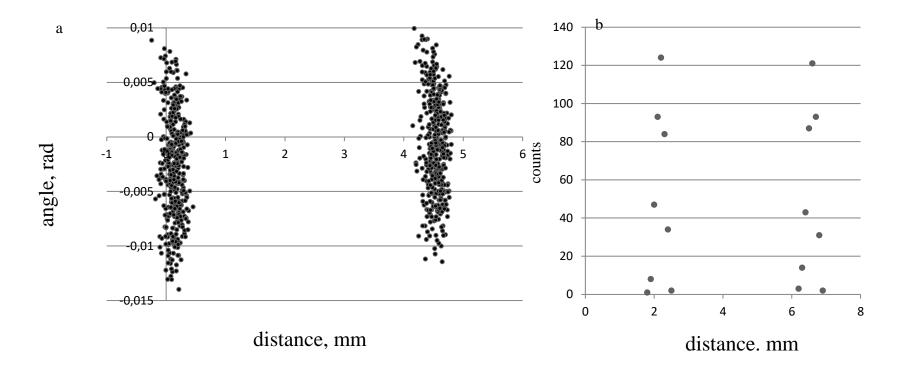












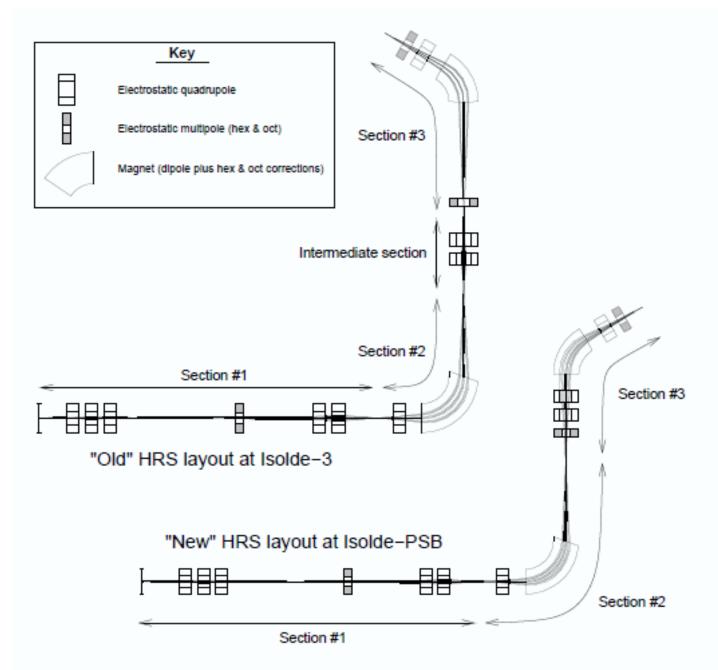


Figure 1: Overview of HRS ion optics — old and new

- При этом разрешающая способность этого сепаратора не высока и находится в интервале 3000 4500, что указывает на явную нелинейность системы.
- Для эмиттанса определен интервал π(10-20) mm*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.