

# Оптимизация масс – сепараторов (компьютерное моделирование)

История масс – сепараторов

Традиционный метод . Вторичные радиоактивные пучки.

Доклад Комитета по ядерной физике при Департаменте энергии и Национальном научном фонде США по ISOL системам.

Магнит анализирует импульс частицы

$$p = mv = \sqrt{2mE} \sqrt{2m\varphi_{ac}} = \frac{e}{c} \rho H$$

1. Методы анализа. Матричный анализ и дисперсии.

2. Типы магнитов сепараторов

Сепараторы из двух магнитов.

Как реализовать потенциальные возможности магнита и системы двух магнитов?

3. Аксиально симметричная оптика.

4. Трансаксиальная оптика.

5. Оптимальный выбор

$$\begin{array}{c}
 \text{Ж}x \\
 3 \\
 3x^1 \\
 3 \\
 \text{И} \Delta m / m
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Ц} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ш} \\
 \text{Ш}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{Ж}M_{11} \\
 3 \\
 3 \\
 3 \\
 \text{И} 0
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 M_{12} \\
 M_{21} \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 M_{13} \\
 M_{22} \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Ц}x_0 \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ш} \Delta m / m
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{Ц} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ч} \\
 \text{Ш}
 \end{array}$$

$$M_{13} = \frac{dx}{d(\ln p)} = p \frac{dx}{dp}$$

$$M_{23} = p \frac{dx\check{y}}{dp}$$

Tun 1

$$M_{11} = 0$$

$$\tau = \frac{m}{\Delta m} = \frac{M_{13}}{M_{12}x\check{y}} = \frac{M_{13}X}{M_{12}\xi}$$

Tun 2

$$M_{12} = 0$$

$$\tau = \frac{M_{13}}{M_{11}x_0}$$

$$M_x = \begin{matrix} \times \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ \text{N} \end{matrix} \begin{matrix} \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_1)}{\cos \varepsilon_1} \\ \sin \Omega \\ \rho \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} \rho \sin \vartheta \\ \frac{\cos(\vartheta - \varepsilon_2)}{\cos \varepsilon_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} \frac{\rho(1 - \cos \vartheta)}{\cos \varepsilon_2} \\ \sin \vartheta + \operatorname{tg} \varepsilon_2 (1 - \cos \vartheta) \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \begin{matrix} \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \end{matrix}$$

$$M_y = \begin{matrix} \times \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ \text{N} \end{matrix} \begin{matrix} 1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_1 \\ \frac{1}{\rho} (\operatorname{tg} \varepsilon_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_2 (1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_1)) \\ 1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_2 \end{matrix} \begin{matrix} \rho \vartheta \\ 1 - \vartheta \operatorname{tg} \varepsilon_2 \end{matrix} \begin{matrix} \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \\ \text{H} \end{matrix}$$

$$\vartheta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \Omega$$

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Ж} & b_{11} & b_{12} & b_{13} & \text{Ц} & a_{11} & a_{12} & -a_{13} & \text{Ц} \\
 \text{З} & & & & \text{Ч} & a_{21} & a_{22} & -a_{23} & \text{Ц} \\
 \text{З} & b_{21} & b_{22} & b_{23} & \text{Ч} & a_{21} & a_{22} & -a_{23} & \text{Ц} \\
 \text{З} & 0 & 0 & 1 & \text{Ч} & 0 & 0 & 1 & \text{Ц} \\
 \text{И} & & & & \text{Ш} & & & & \text{Е}
 \end{array}$$

$$M = (l_2 M_2 l_1) \quad \Gamma \quad (l_1 M_1 l_0)$$

Матрица свободного промежутка – это уравнение прямой линии

Общая дисперсия

$$M_{13} = -b_{11} a_{13} - b_{12} a_{23} + b_{13}$$

$$l = \begin{array}{c} \text{Ж} \\ \text{З} \\ \text{И} \\ 1 \end{array} \begin{array}{c} l \\ \text{Ц} \\ \text{Е} \end{array}$$



Первый магнит просто поворачивает пучок, а второй фокусирует

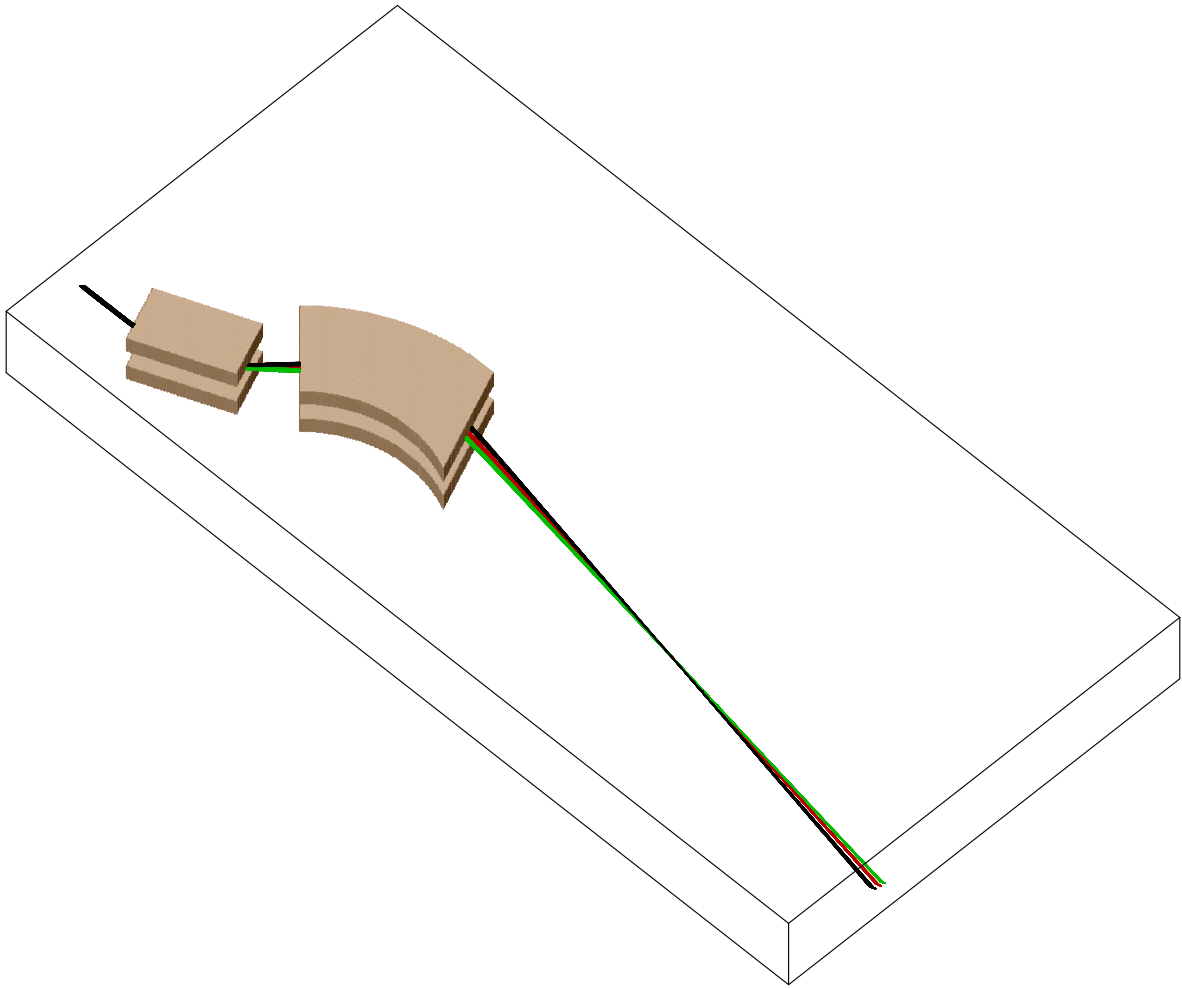
$$\begin{pmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & -a_{13} \\ 0 & a_{22} & -a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

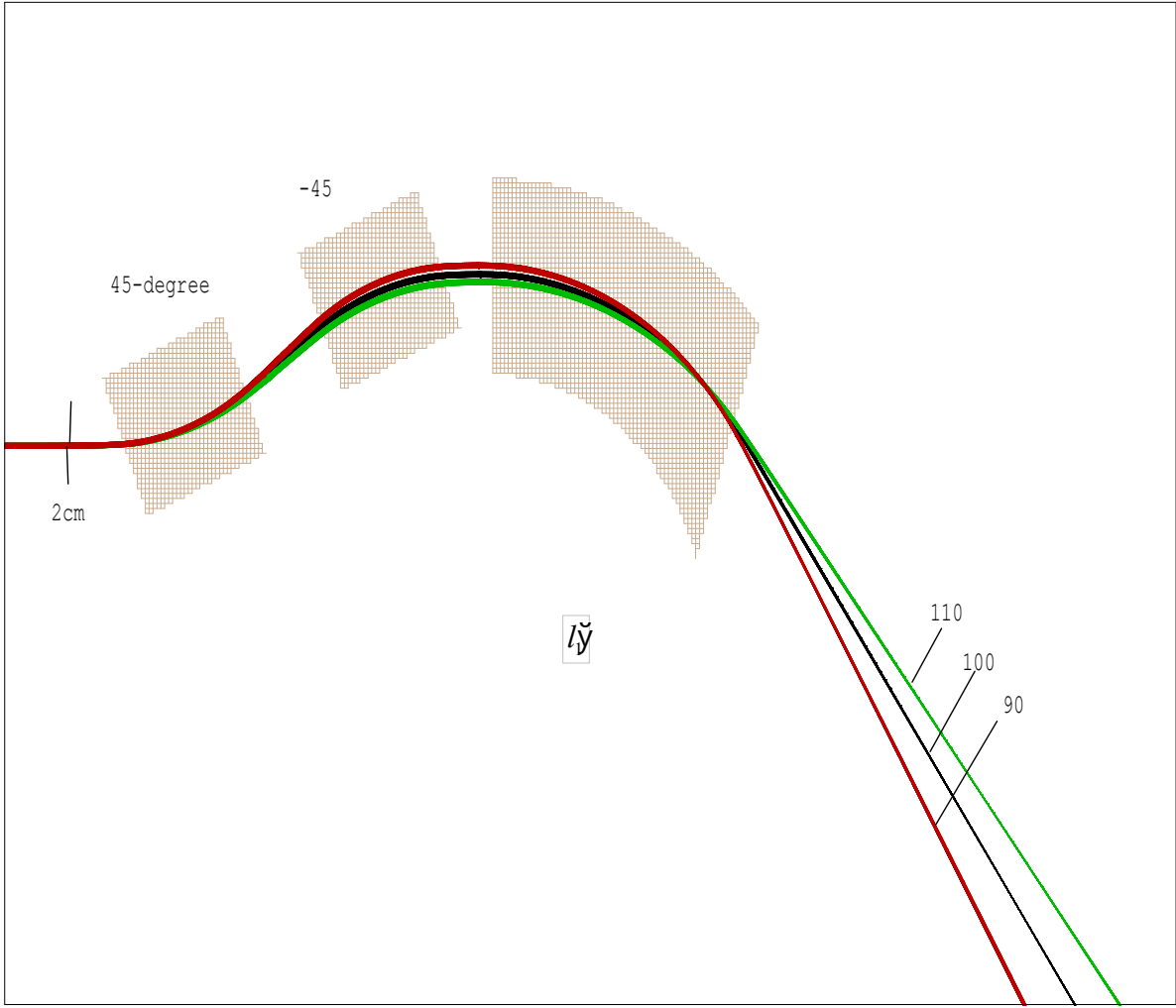
$$M = (l_2 M_2) \times (l_1 M_1 l_0)$$

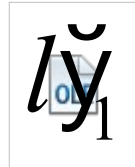
$$M_{13} = -b_{12} a_{23} + b_{13}$$

$$b_{12} > 0$$

Покажем это на виртуальном сепараторе на следующих слайдах







Первый магнит секторный, фокусирует пучок на расстояние

$$\begin{pmatrix} b_{11} & 0 & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & -a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & -a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M = (l_2 M_2 l_1'') \times (l_1' M_1 l_0)$$

$$M_{13} = -b_{11} a_{13} + b_{13}$$

Дисперсия положительна

$$l_1''' = \frac{l_2 \cos \Omega / \cos \varepsilon_2 + \sin \vartheta}{l_2 \sin \Omega / \cos \varepsilon_2 - \cos \vartheta}$$

$$l_{x2} = \cos \varepsilon_2 \frac{\cos \vartheta \pm 1}{\sin \Omega}$$

Минимизируем общую длину

$$\frac{dL}{dl_2} = 0$$

$$L = l_1''' + l_2$$

$$l_{x1}'' = \frac{\cos \Omega + \cos \varepsilon_2}{\sin \Omega}$$

$$l_{x2} = \cos \varepsilon_2 \frac{\cos \vartheta \pm 1}{\sin \Omega}$$

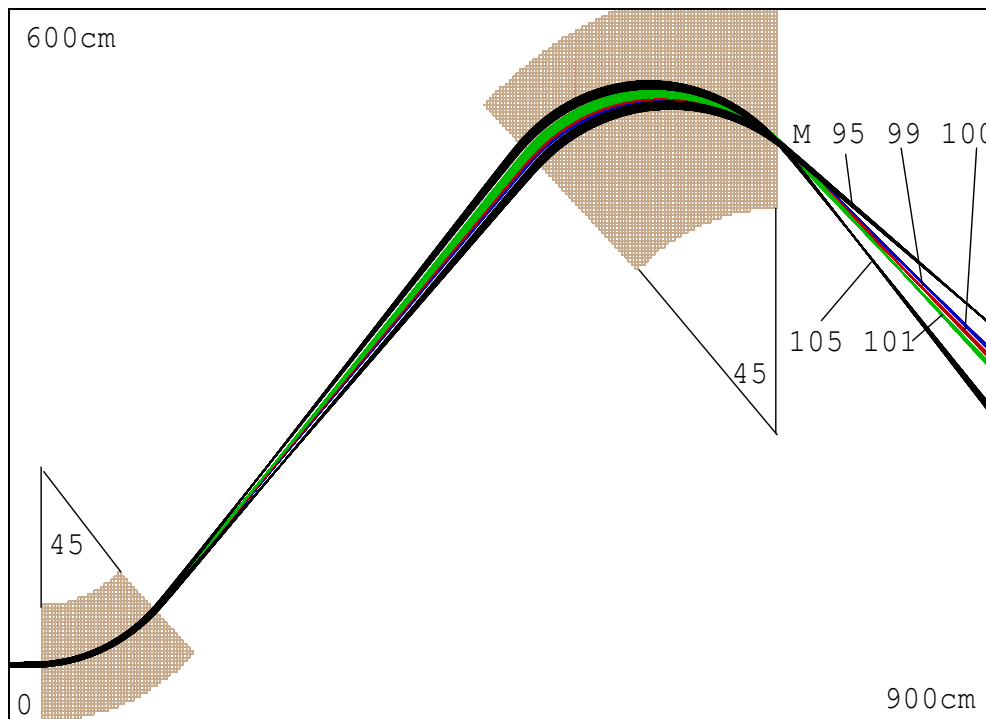
$$\frac{1 + \cos(\Omega + \varepsilon_2)}{\sin \Omega} - \frac{1}{\sin \varepsilon_2} = 0$$

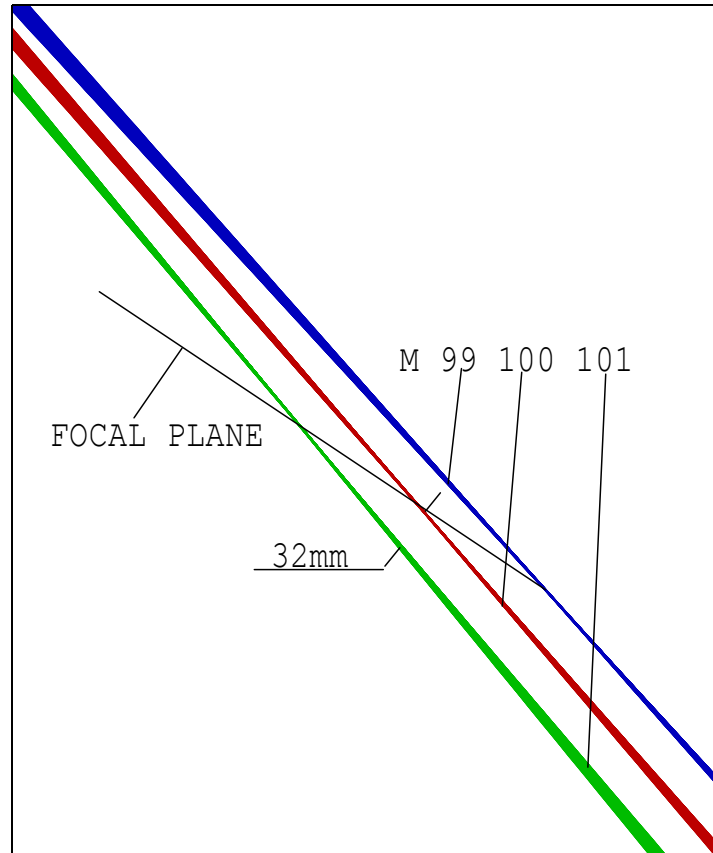
$$\operatorname{tg} \Omega = \operatorname{tg}^3 \varepsilon_2$$

Решением является

$$\Omega = \varepsilon_2 = 45^{\circ}$$

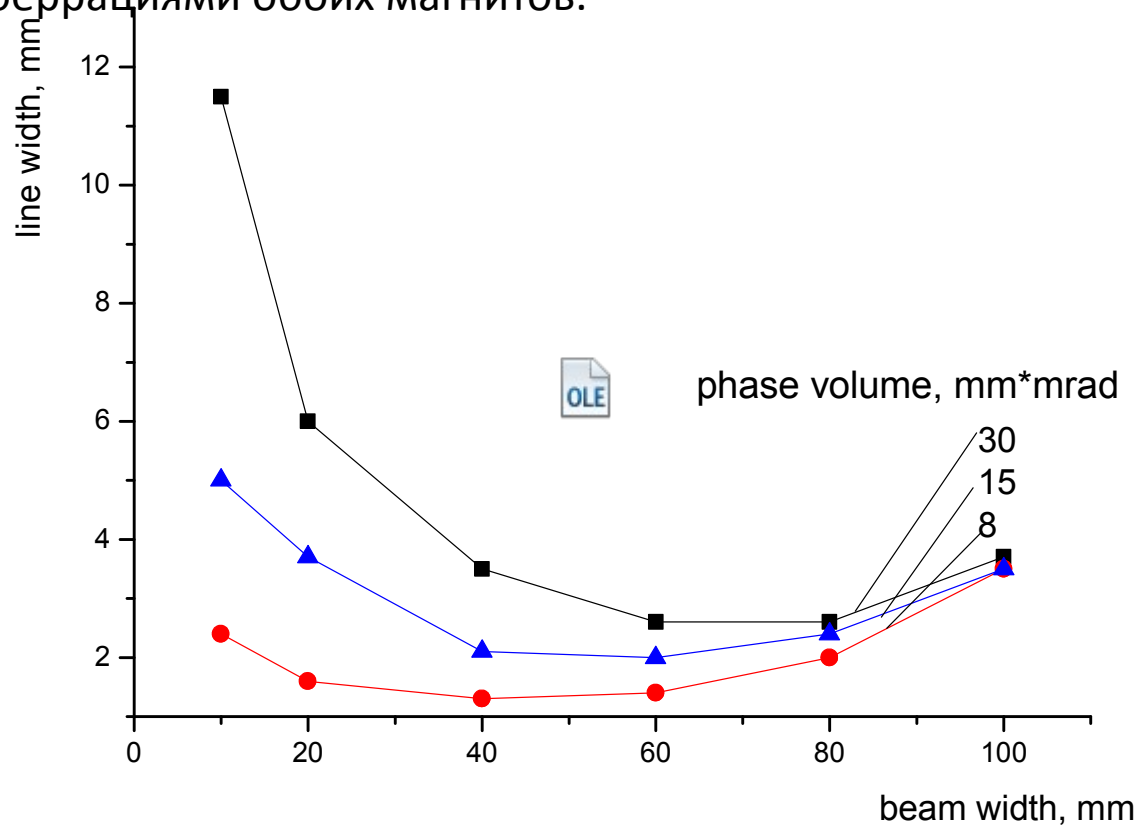
$$\vartheta = 90^{\circ}$$

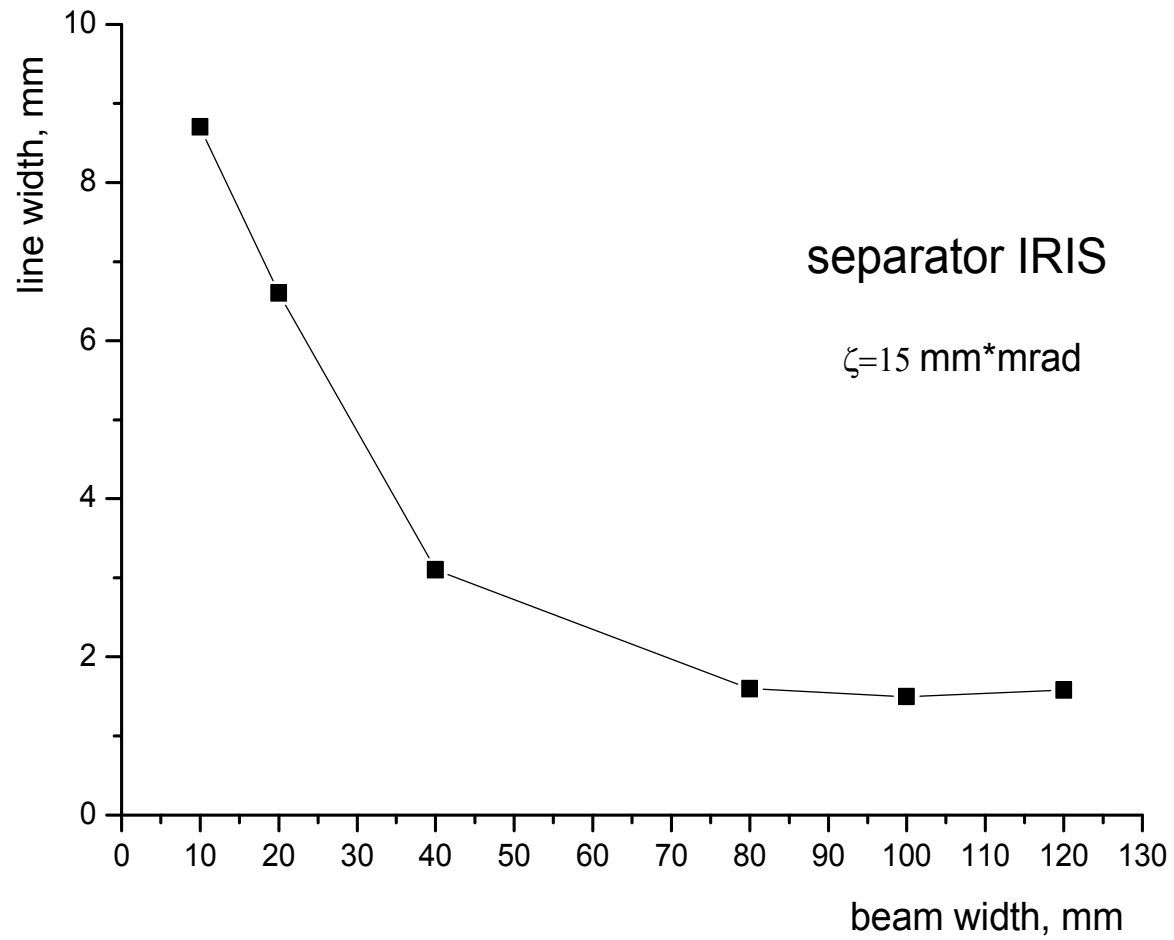




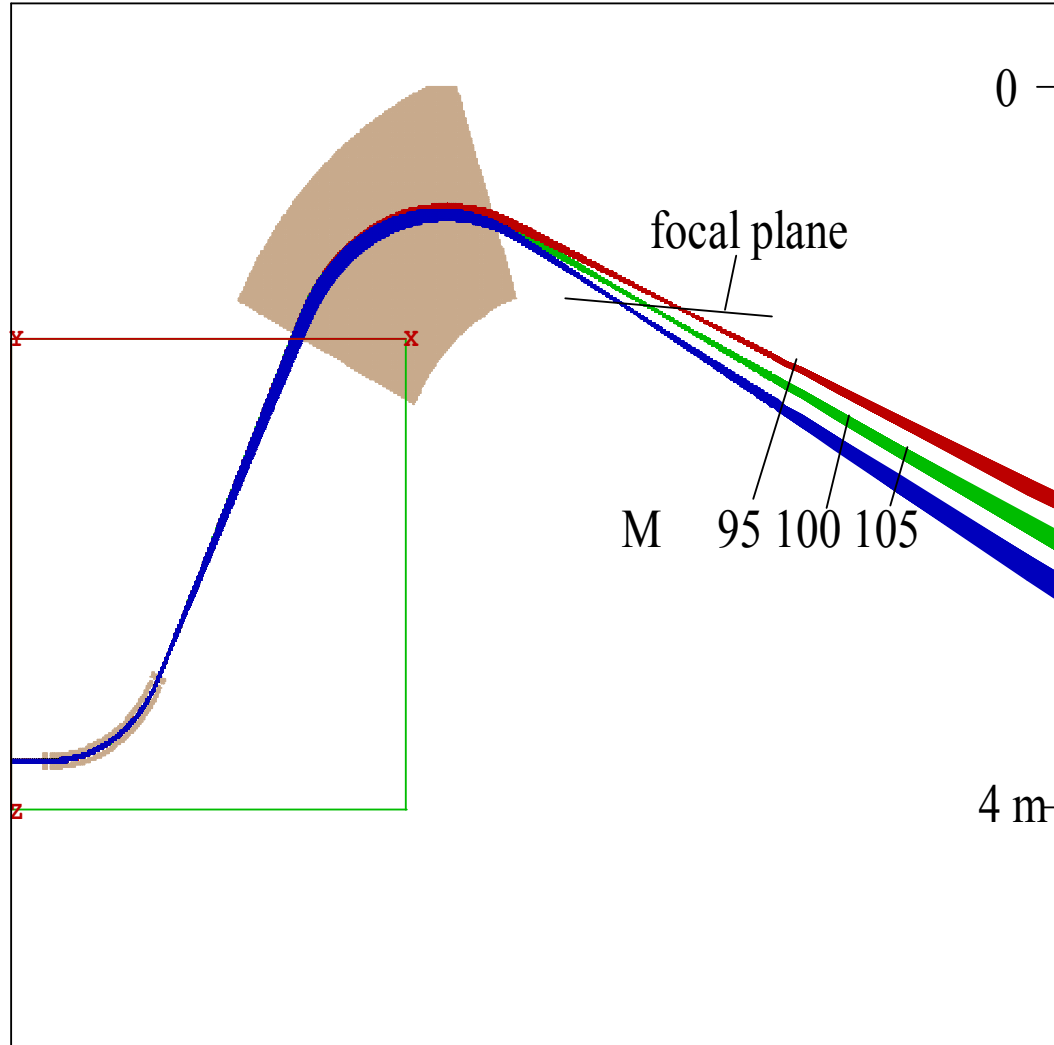
Дисперсия этого сепаратора 32 мм на один процент изменения массы  
Для (шведского) сепаратора ИРИС эта величина равна 13 мм.

Ионные источники известных масс сепараторов создают пучки с эммитансами в пределах 10 – 40 мм\*мрад. Для таких пучков с помощью моделирования проанализирована зависимость разрешающей способности от ширины входного пучка для двух магнитного сепаратора(1-45 градусов, 2-90, 45). В этом случае разрешающая способность ограничивается квадратичными aberrациями обоих магнитов.





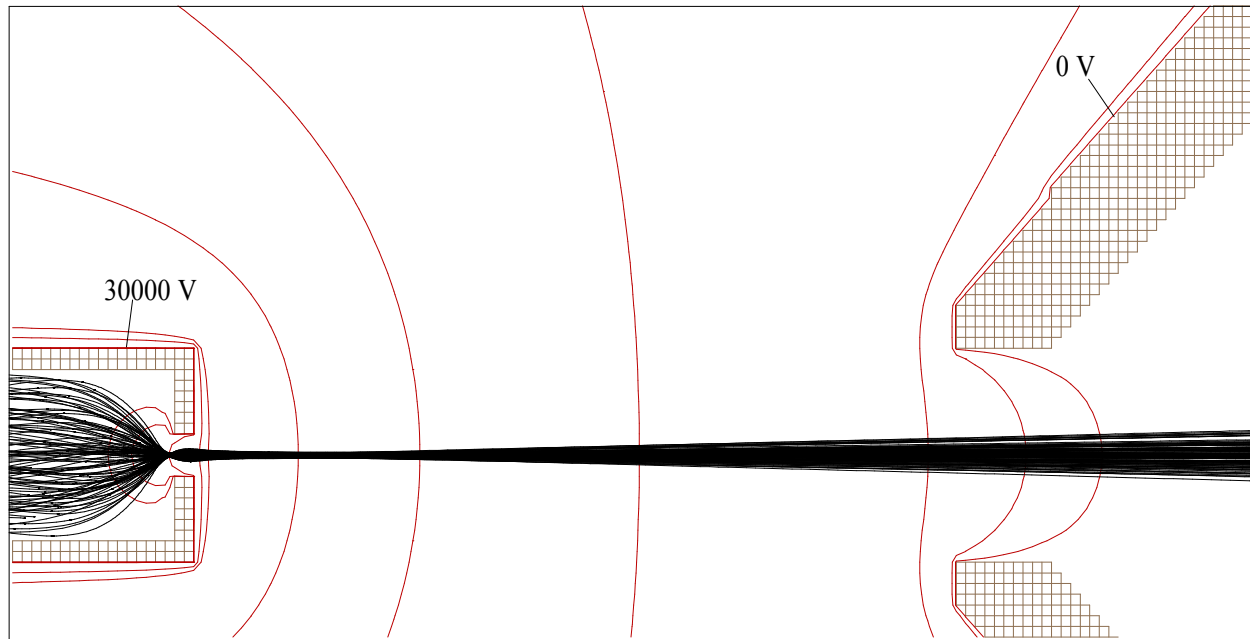


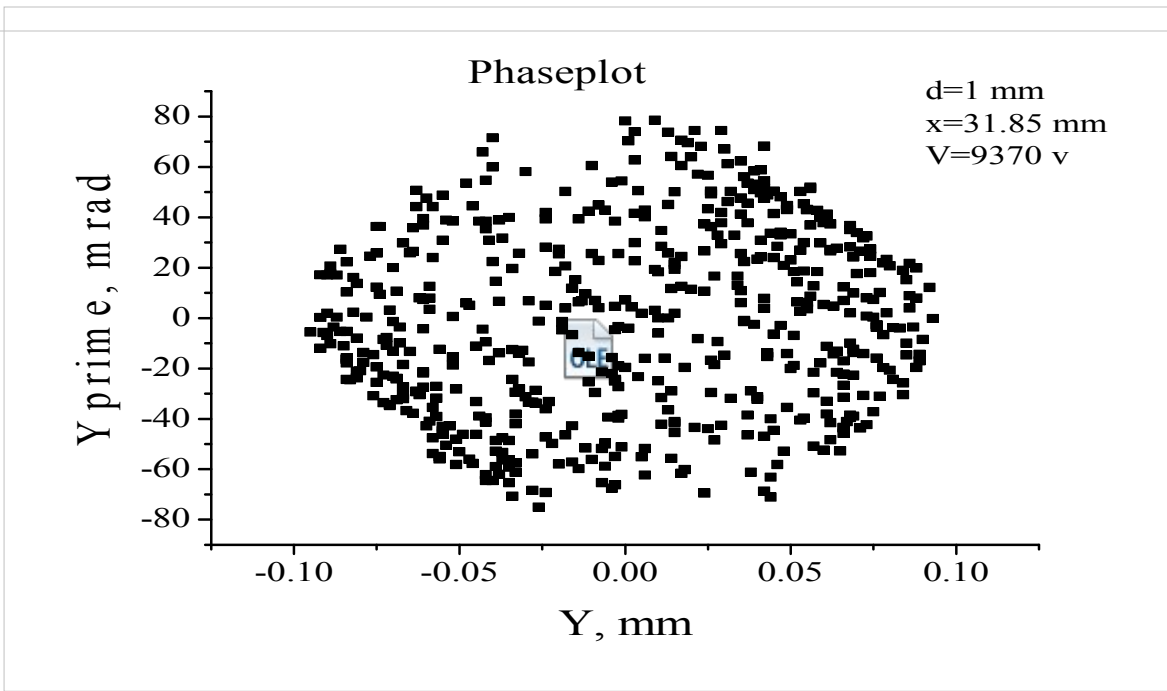
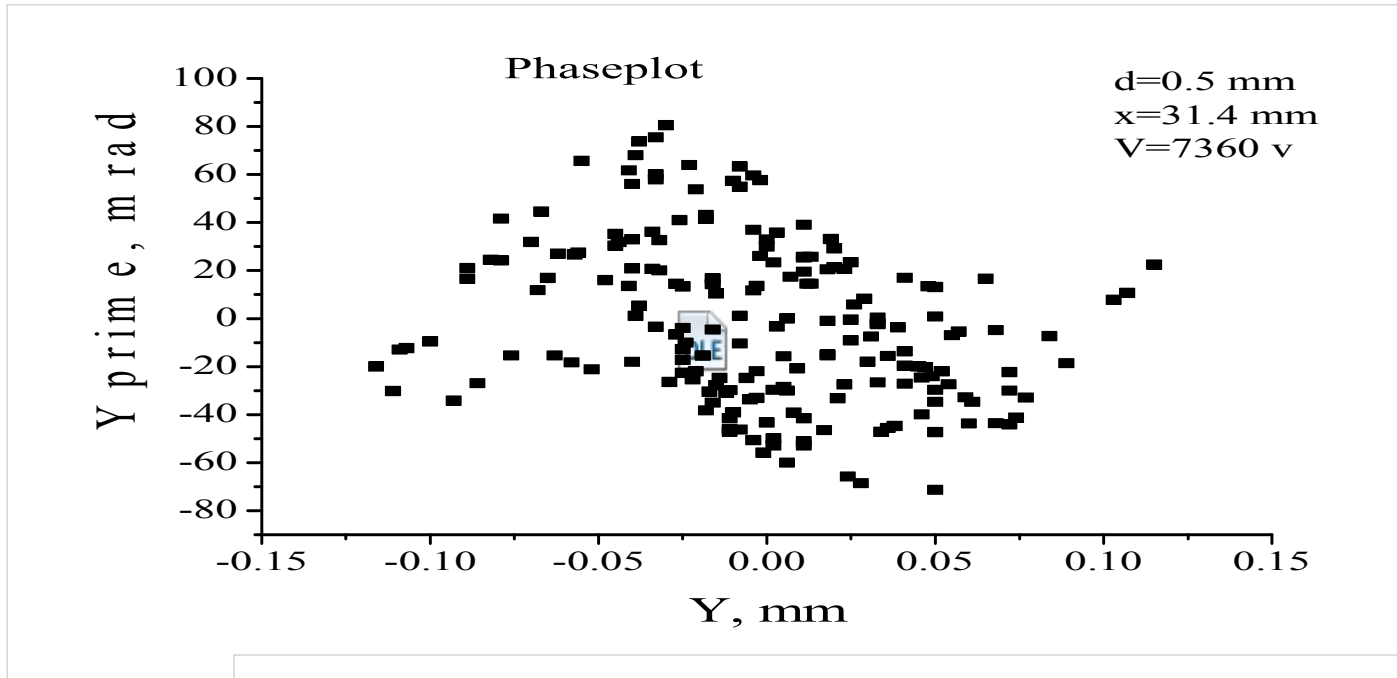


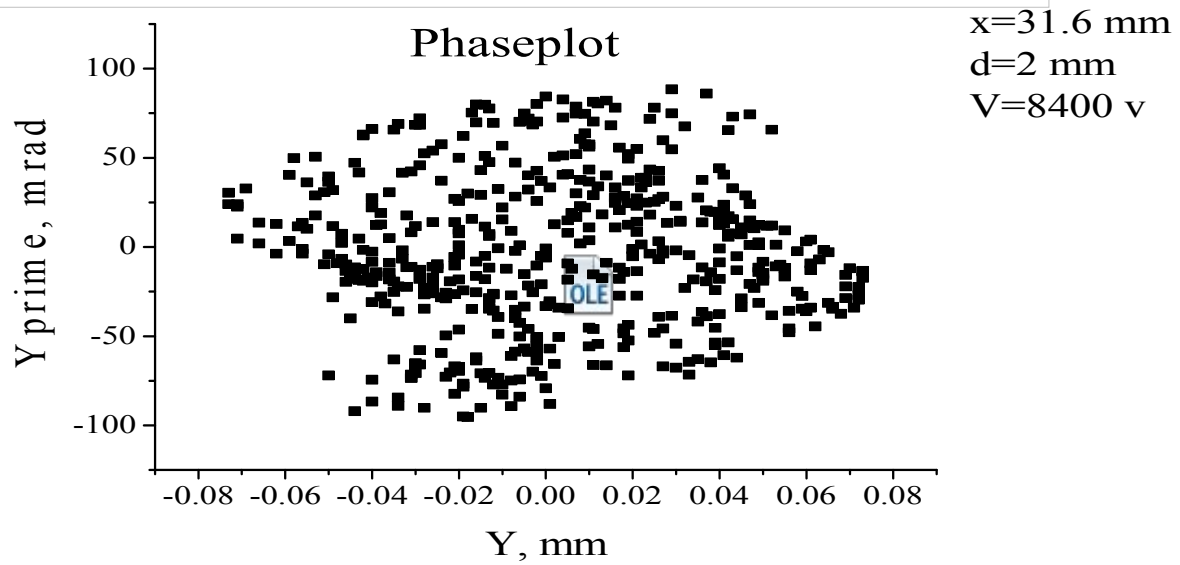
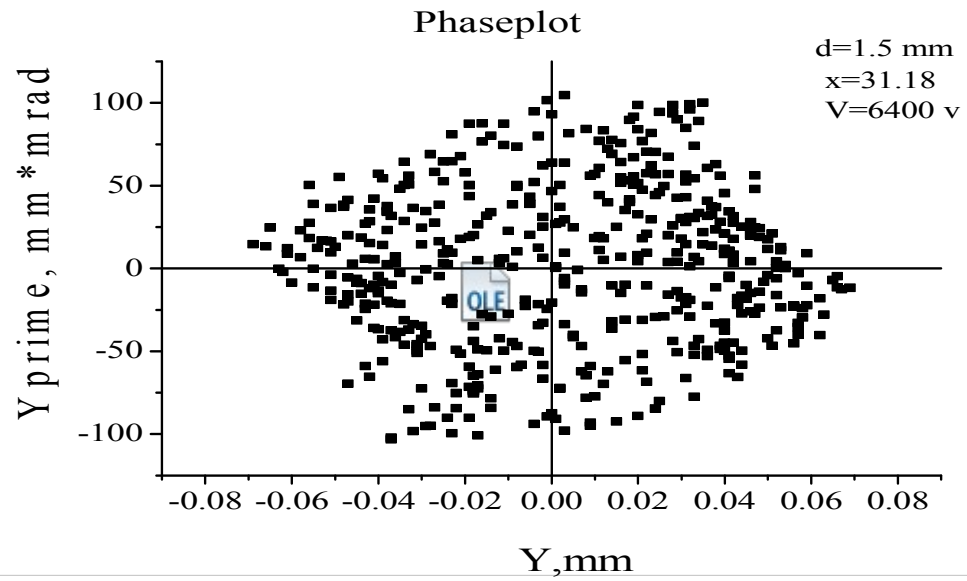
Конденсатор поворачивает пучок на 63.8 градусов

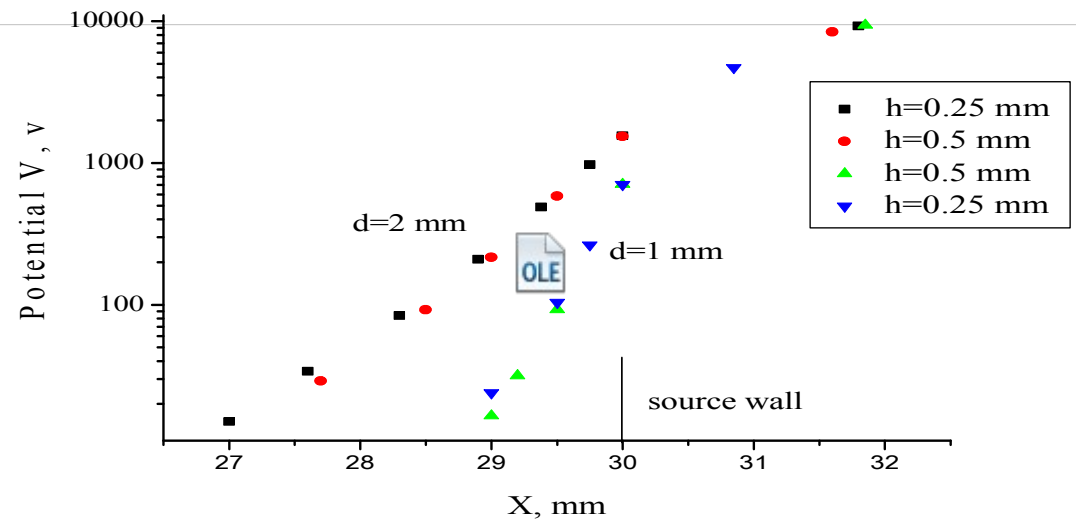
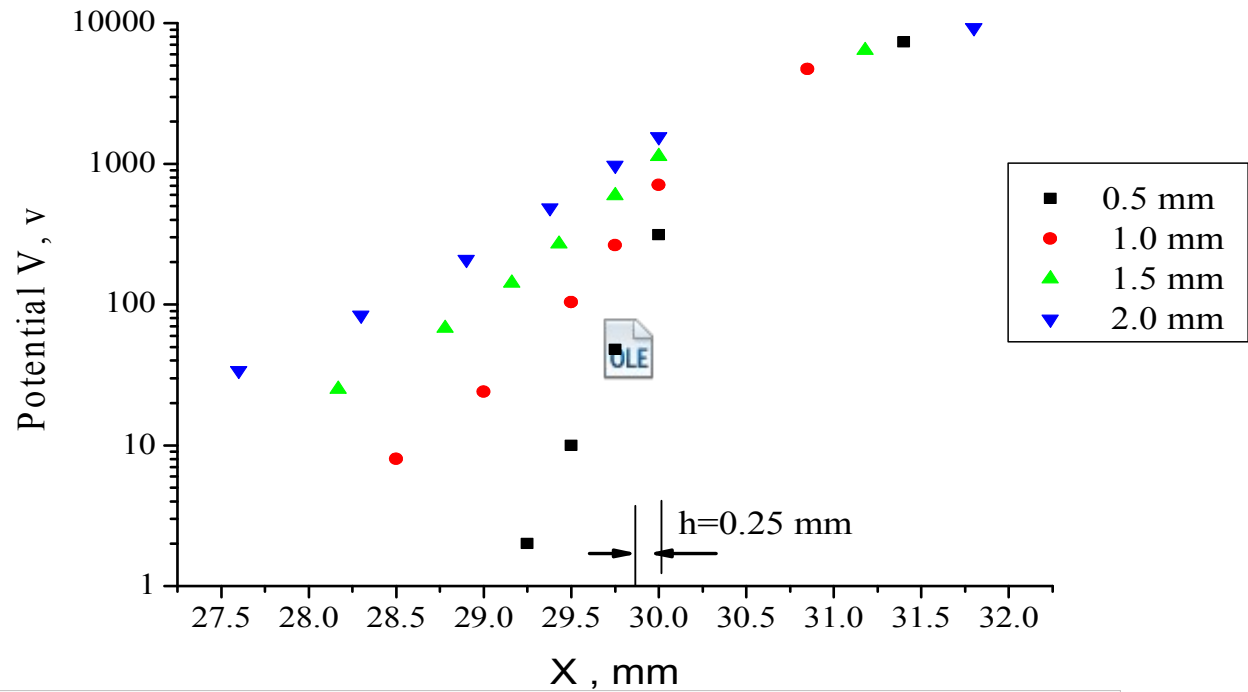
# Электростатическая система

Ионный источник вытягивающий электрод

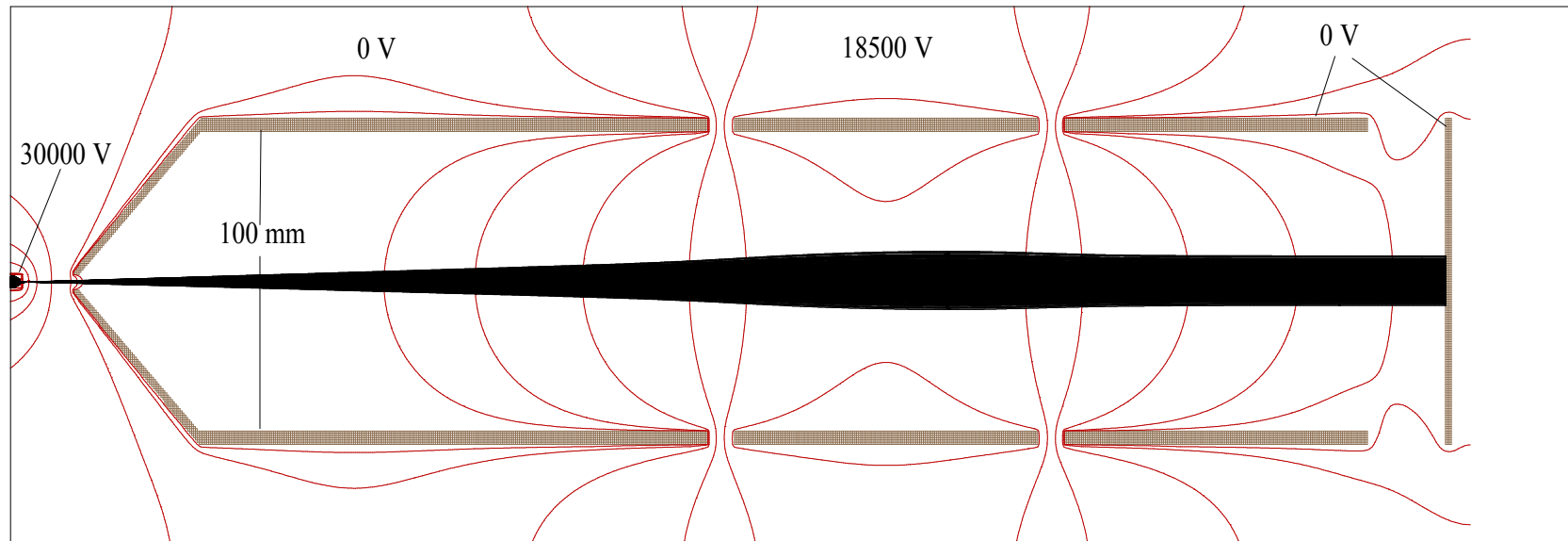


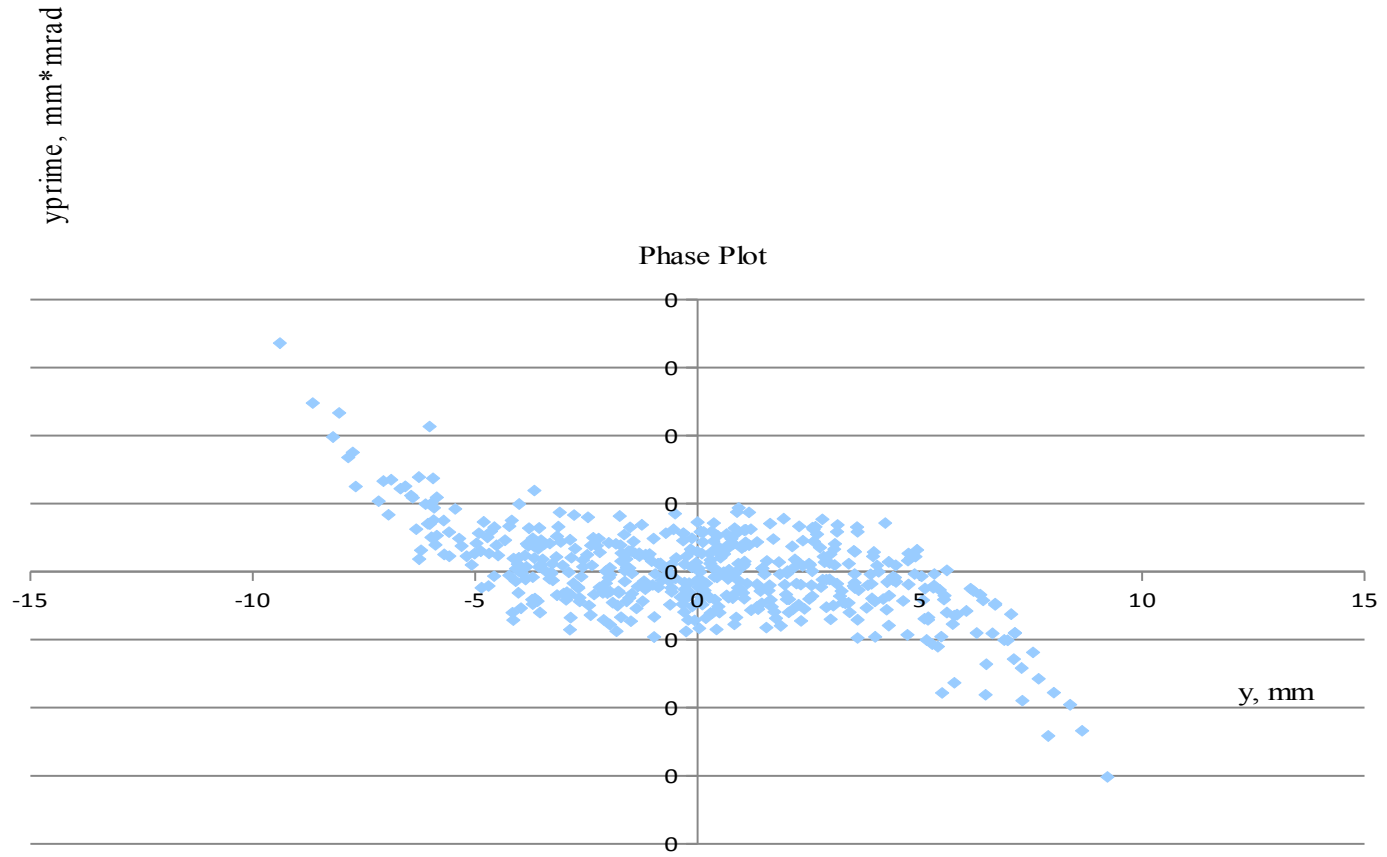


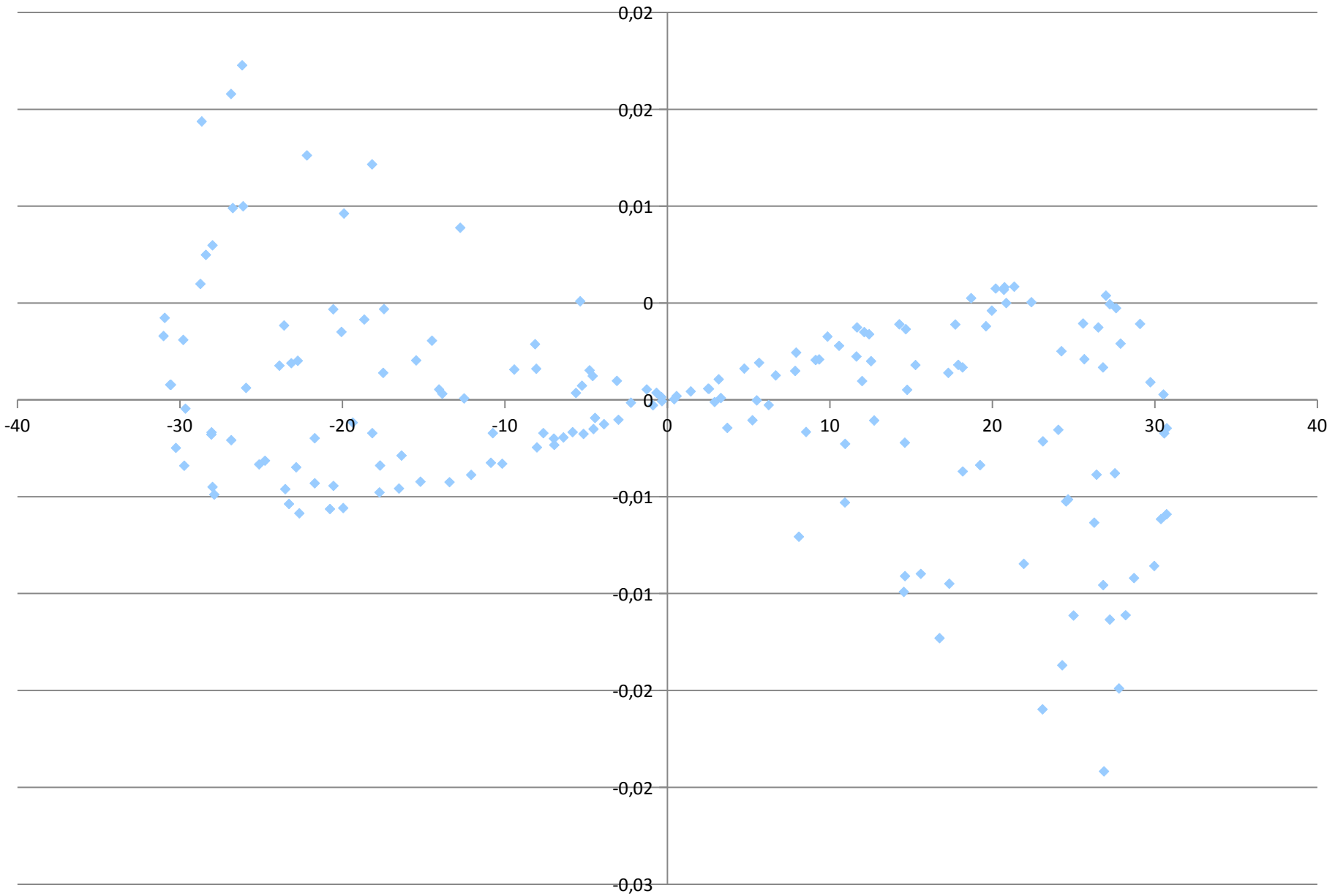




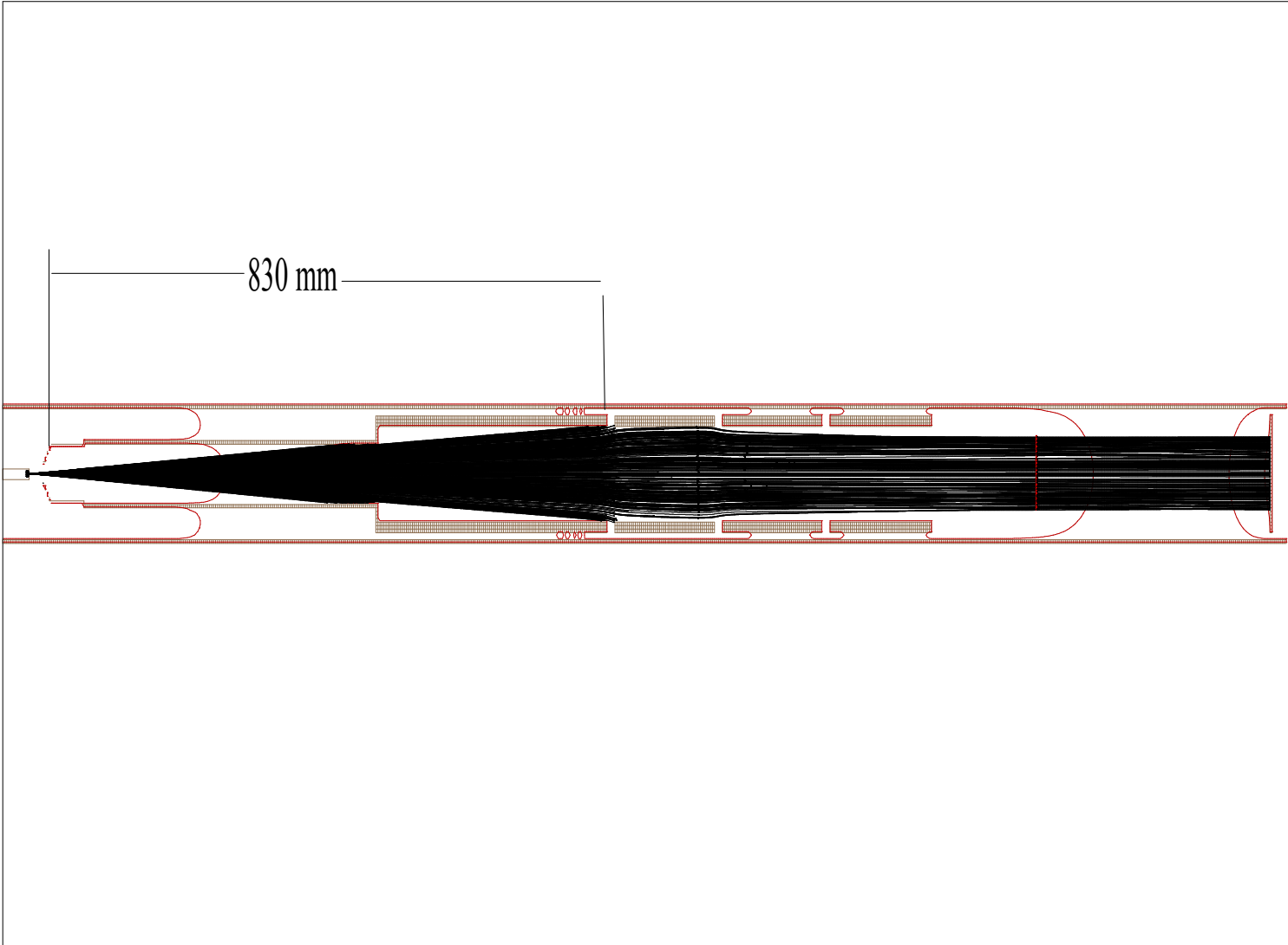
# Аксиально симметричная линза

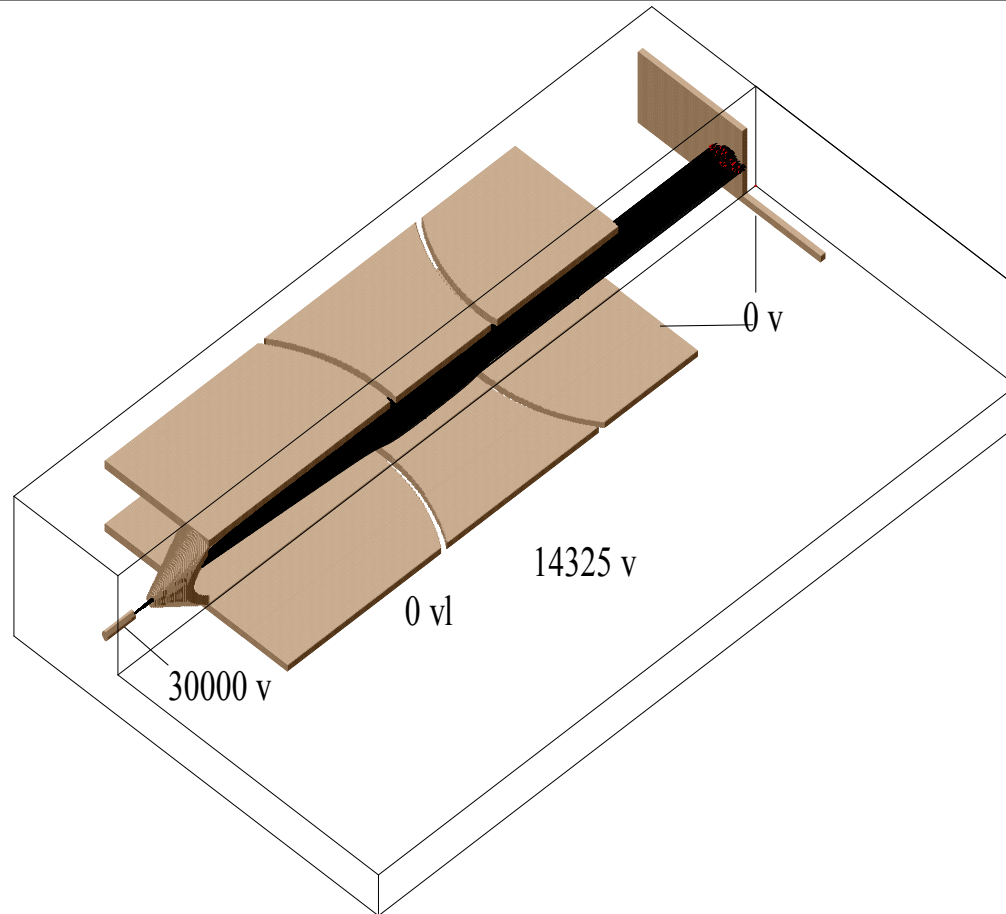






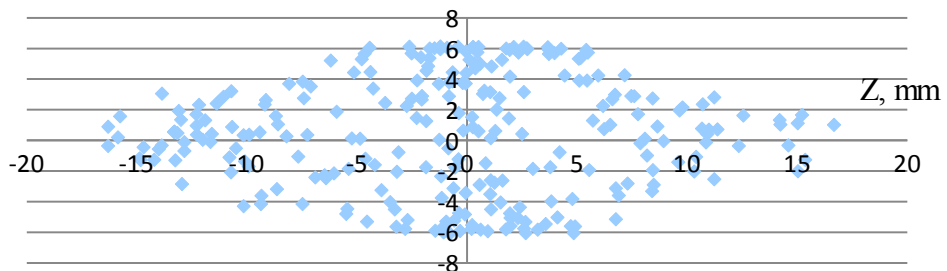






Y, mm

Сечение пучка в точке детектора





В данной работе развита компьютерная технология вычисления свойств электростатических линз и фокусирующих свойств магнитных систем.

Показано, что использование (не описанного ранее) магнита с сектором в  $45^\circ$  и углом поворота траектории на  $90^\circ$  позволяет достичь более высокой разрешающей способности масс – сепаратора, чем использование традиционного магнита сепаратора ИРИС.

Также показано, что фазовый объем пучка формируется электрическим полем в системе источник – вытягивающий электрод и форма пучка слабо зависит от таких факторов, как толщина торцевой стенки источника, диаметра его выходного отверстия и расстояния до вытягивающего электрода.

Из результатов моделирования следует, что применение трансаксиальных линз, позволяющих формировать широкие ленточные линзы по сравнению с аксиальными линзами, более предпочтительно для достижения высокого качества масс – сепаратора.

В заключение отметим, что используемый вычислительный аппарат может быть применен для расчета и конструирования любой фокусирующей электростатической системы и любого типа магнита.