



Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Кафедра “Экспериментальные методы ядерной физики”
№11

Отчет на тему:

Моделирование характеристик ядер отдачи в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами методом Монте-Карло.

Научный руководитель:

Пятков Ю. В.

Работа

аспиранта 2-ого курса

Данилкина Владислава

Дмитриевича

ИЯФит

г. Москва 2026

Введение и актуальность

Проблема: Синтез и исследование нейтронообогащённых тяжелых и сверхтяжёлых ядер

Ключевые факты:

- Реакции **многоуклонных передач (МНП/МНТ)** — перспективный метод получения ядер с большим нейтронным избытком
- Продукты МНТ испускаются в **широком угловом диапазоне** (вблизи угла грейзинга)
- Традиционные сепараторы (нулевой угол, малая апертура) регистрируют лишь **малую долю** образующихся ядер

Решение: Проектирование нового сепаратора **STAR** (Separator for TransActinide Research) в ОИЯИ

Для обоснования конструктивных решений и настройки ионно-оптической схемы потребовалась расчётная программа, способная моделировать полный цикл прохождения тяжелых ионов через сепаратор.

Цели и задачи

Цель работы: Создание программного комплекса для моделирования ионно-оптических систем сепараторов тяжёлых ионов

Основные задачи:

Моделирование процессов в мишени и стриппере:

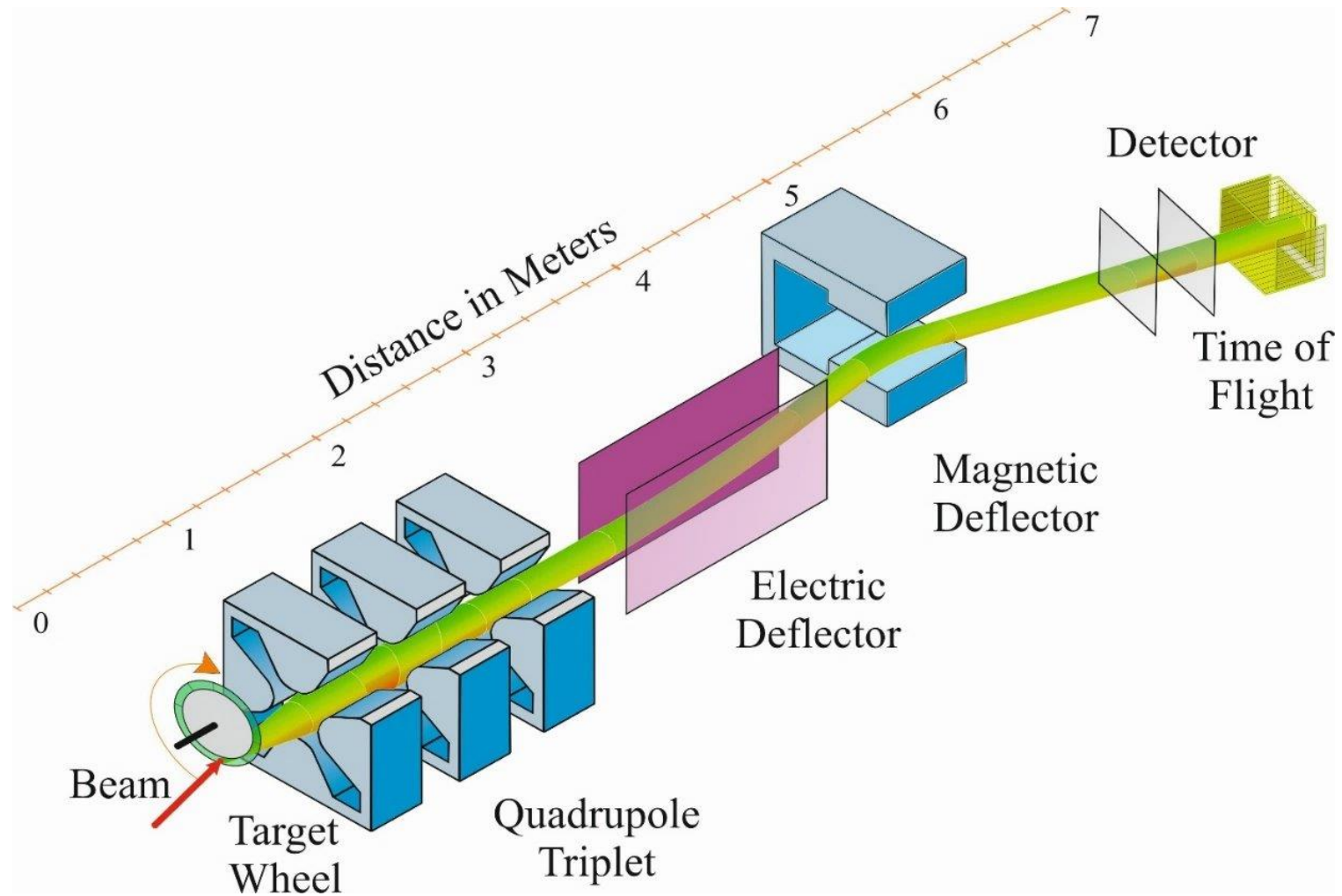
- Многократное рассеяние
- Потери энергии
- Перезарядка

Расчёт транспорта ионов через элементы сепаратора:

- Дрейфы
- Квадрупольные линзы
- Магнитные диполи с краевыми полями
- Электростатические дефлекторы

- Визуализация траекторий и распределений параметров
- Загрузка и обработка экспериментальных данных
- Оптимизация параметров сепаратора

Концептуальная схема сепаратора STAR



Моделирование прохождения через мишень

- Генерация компаунд-ядра — координаты, энергия, углы
 - Испарение частиц (n , p) — изменение A , Z , энергии
 - Многократное рассеяние в мишени — угловое и энергетическое уширение
 - Расчёт заряда после стриппера (модель Николаева–Дмитриева)
 - Потери энергии и рассеяние в стриппере (формула Бете–Блоха)
- Все расчёты — для каждой частицы методом Монте-Карло.

Теоретические основы: элементы ионной оптики

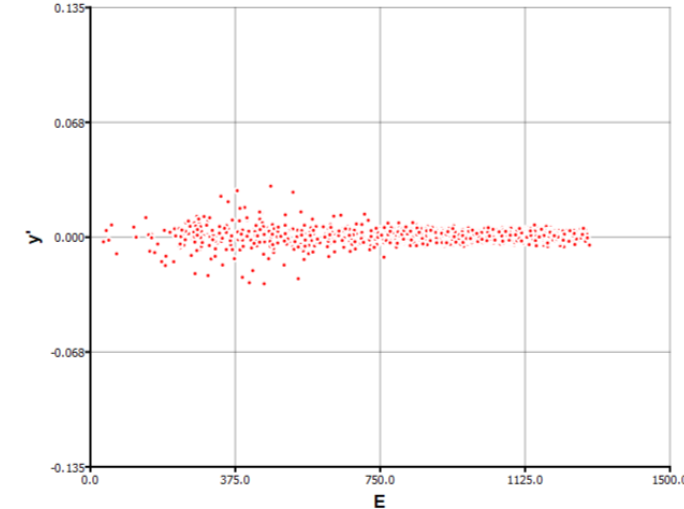
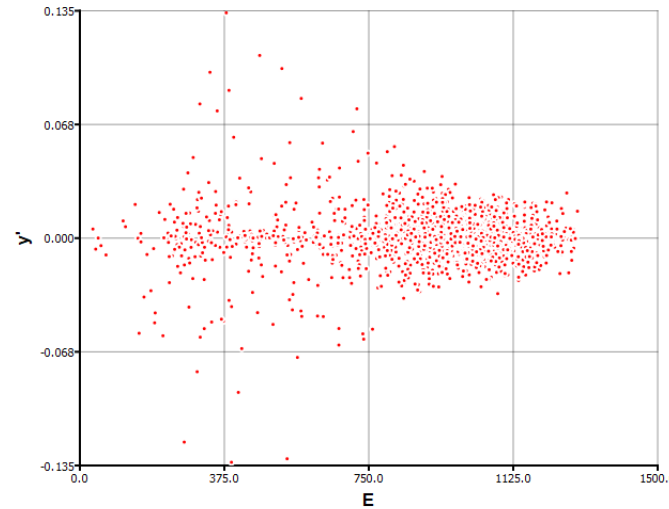
Транспорт частиц через сепаратор описывается матричным методом в приближении малых углов. Каждый элемент преобразует координаты и наклоны траекторий с помощью своей матрицы, расчёт ведётся независимо по горизонтали и вертикали.

- **Дрейф** — свободный пролёт: координата меняется пропорционально длине и углу, апертура круглая.
- **Квадруполь** — фокусирует пучок в одной плоскости и дефокусирует в другой, сила зависит от заряда, массы, энергии и градиента поля.
- **Диполь** — отклоняет пучок по дуге окружности в горизонтальной плоскости, радиус определяется магнитной жёсткостью; краевые поля добавляют фокусировку.
- **Электростатический дефлектор** — отклоняет электрическим полем, при нулевом напряжении работает как дрейф.

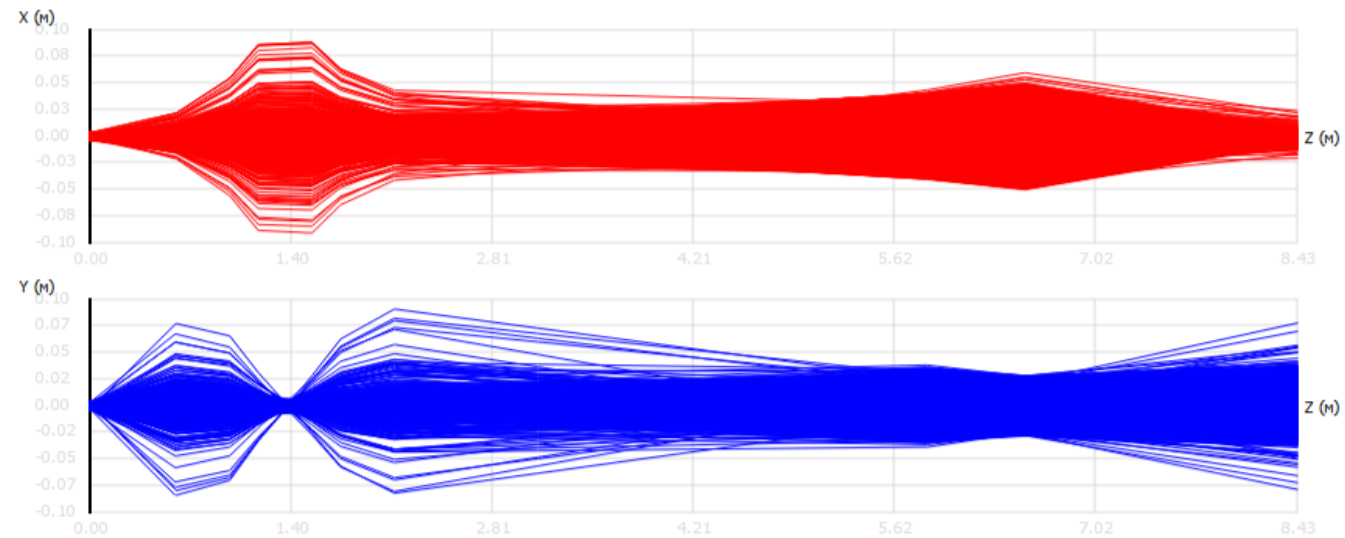
После каждого элемента проверяется апертура: частица, вышедшая за пределы, считается потерянной.

Визуализация

- Траектории в плоскостях XZ и YZ
- Фазовые пространства (любые параметры: x , y , x' , y' , E , Q , BR)
- Гистограммы распределений параметров
- Трансмиссия (доля частиц достигших детекторов)



Отображение угловых отклонений и энергий частиц после стриппера и в конце ион оптической системы (дрифт перед мишенным узлом) сепаратора STAR



Визуализация траекторий прохождения ^{270}Db через ион оптическую систему сепаратора STAR

Верификация с GICOSY

Конфигурация: Q-Q-Q-E10-D37

Референсный пучок: E=490 МэВ, M=298 а.е.м., Q=54

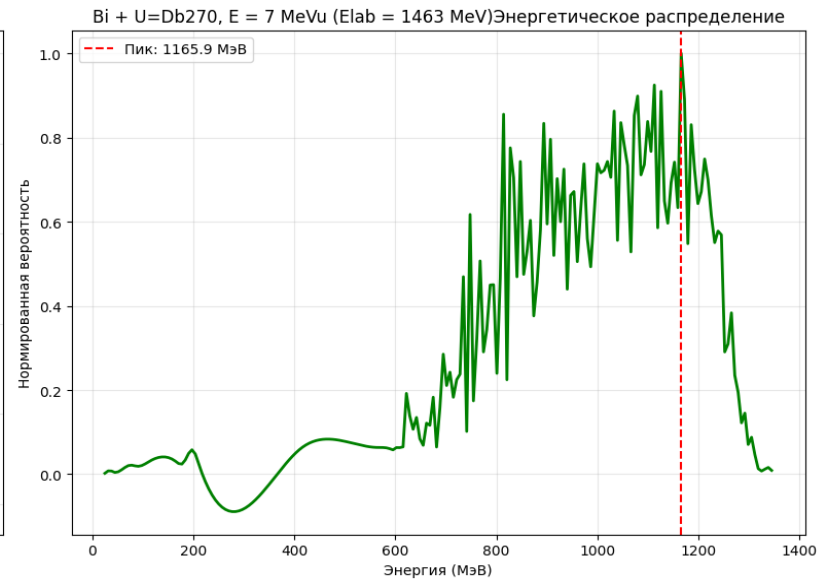
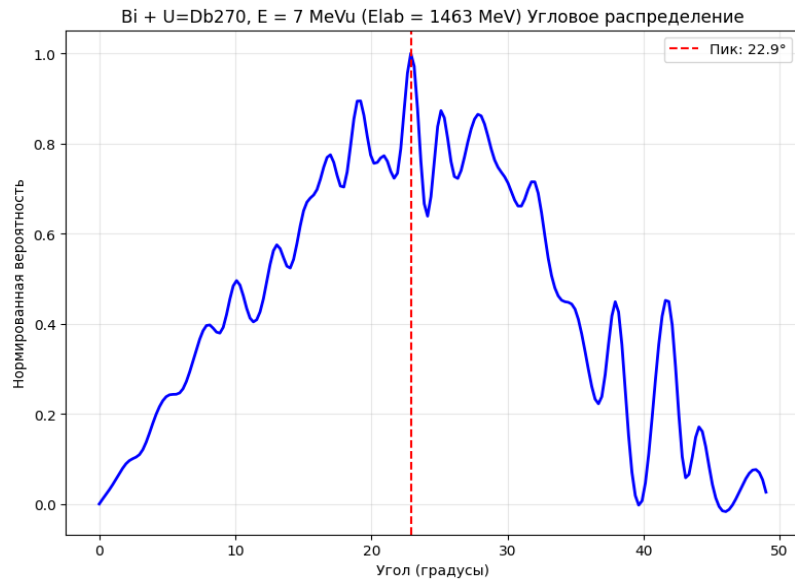
| Параметр | GICOSY | SHEMAT | Расхождение |
|-----------------------|---------|---------|-------------|
| RMS X на детекторе, м | 0.00233 | 0.00250 | 7 % |
| RMS Y на детекторе, м | 0.00491 | 0.00465 | 5 % |
| Трансмиссия, % | ≈100 | 90.9 | 9 % |

Моделирование реакции $^{209}\text{Bi}+^{238}\text{U}=\text{}^{270}\text{Db}$

Реакция: $^{209}\text{Bi}+^{238}\text{U}\rightarrow^{270}\text{Db}$, $E=7$ МэВ/нуклон

- Энергия: 7 МэВ/нуклон
- Генерация пучка: $\sim 100\,000$ событий по сечениям пакета моделирования GRAZING
- Угол сепаратора: 22.9° (угол грейзинга)

Результат: трансмиссия ^{270}Db — **$\sim 60\%$**



Распределения сгенерированных параметров угла и энергии Db270

Заключение

Разработана программа SHEMAT:

Объединяет моделирование ядерной стадии и ионно-оптический транспорт

Поддерживает гибкую конфигурацию, визуализацию, оптимизацию

Верифицирована по GICOSY (расхождение $\leq 10\%$)

Трансмиссия реакции $^{209}\text{Bi} + ^{238}\text{U} = ^{270}\text{Db} - \sim 60\%$

Перспективы: расширение библиотеки элементов, увеличение порядка точности вычислений, дополнительная верификация с экспериментом и оценка фона.

Спасибо за внимание!