

Газонаполненные сепараторы в экспериментах по синтезу и исследованию СТЭ

Соловьев Д.И.

План

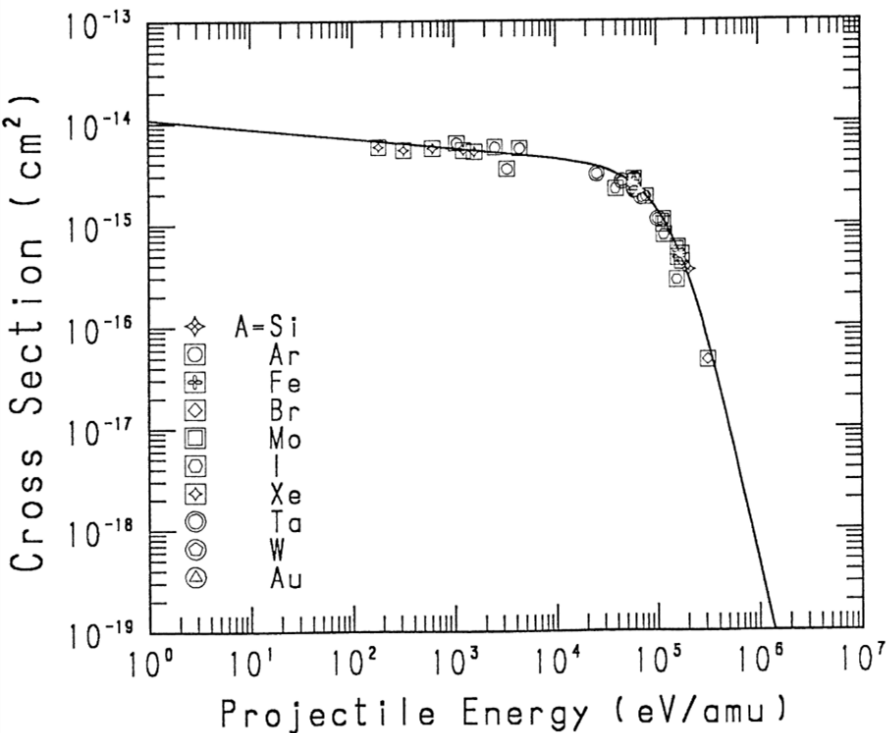
ГНС-2:

- Газонаполненный сепаратор дипольно-квадрупольной конфигурации
- Первая установка Фабрики СТЭ
- Тестовые эксперименты: 2019-2020
- Эксперименты по синтезу 115, 114, 112 и 110 элементов: 2020-2022 – доклад Ибадуллаева Д.

GASSOL:

- Газонаполненный сепаратор на основе соленоидального сверхпроводящего магнита
- Завершено проектирование, идет поиск поставщиков
- Основная предполагаемая область применения - опыты по изучению химических свойств СТЭ

Принцип работы газонаполненных сепараторов в экспериментах по изучению СТЭ



Сечение захвата электрона для ионов с зарядом 8+ в H₂

5-6 МэВ/amu ⁴⁸Ca + Актиноид → 0.1-0.2 МэВ/amu ОИ + xn

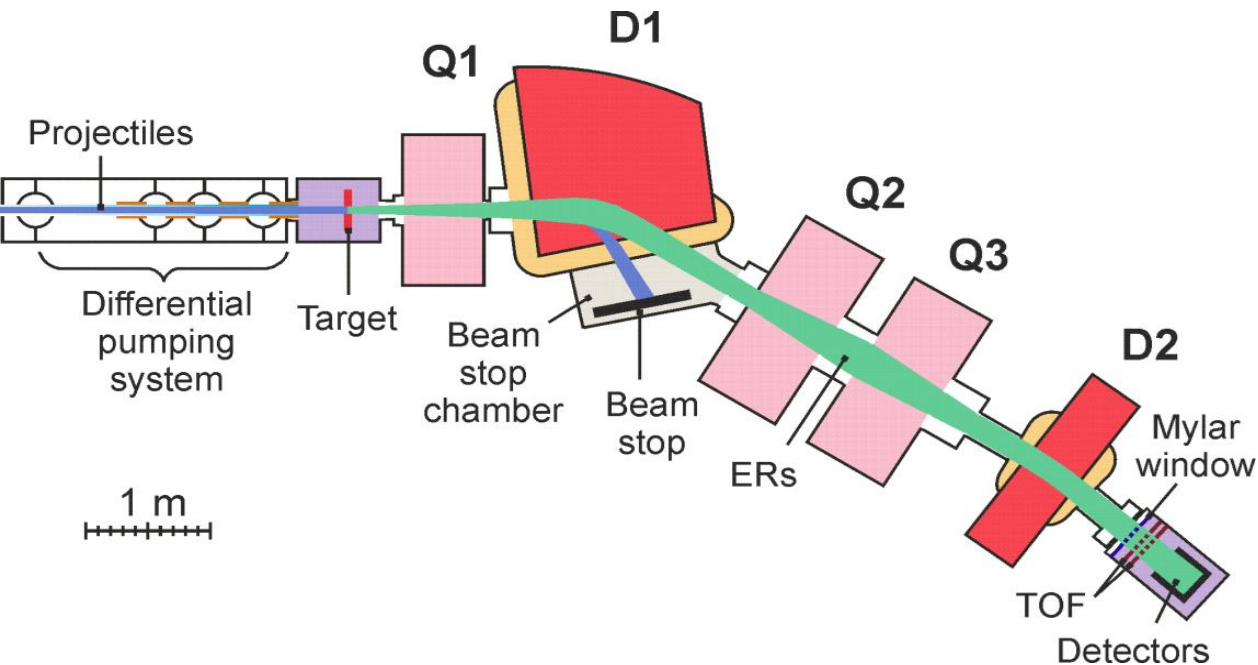
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

$$\sigma_{\text{capture}} \text{ ОИ} \approx 10^{-16} \text{ см}^2$$

$$\sigma_{\text{capture}} \text{ }^{48}\text{Ca} \approx 10^{-19} \text{ см}^2$$

	⁴⁸ Ca	ОИ
На выходе из мишени	≈ 17+	≈ 20+
В водороде	≈ 17+	≈ 6+

ГНС-2, принцип работы



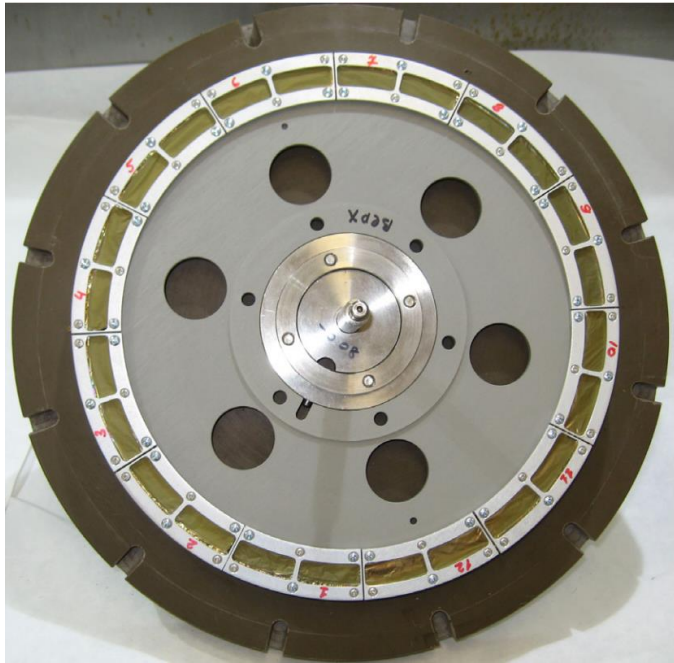
$$B\rho = \frac{mv}{q}$$

$$Q_{ER} \approx 6+$$

$$Q_{beam} \approx 17+$$

Конфигурация	Углы поворота	$B^*\rho_{max}, T^*m$	Дисперсия D1, мм/% $B\rho$	Длина, м
$Q_v D_h Q_h Q_v D$	$31.5^\circ/10^\circ$	3.35	32.8	7.41

ГНС-2, мишень и система диф. откачки



Мишень радиусом 24 см из ^{242}Pu с 12 двойными секторами. Площадь одного сектора 5.8 cm^2

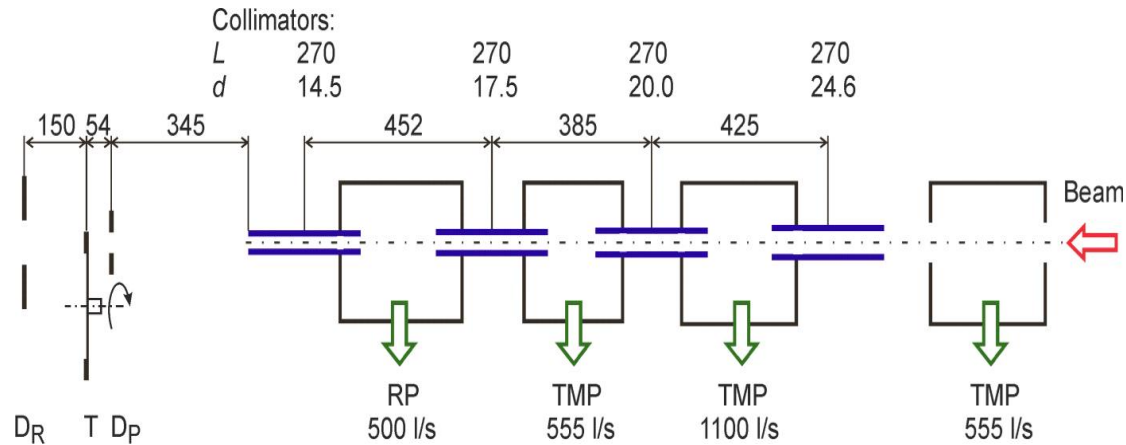


Схема дифференциальной насосной системы. Слева направо: диафрагма для ER (D_R), вращающаяся мишень (T), диафрагма для пучка (D_p), четырехступенчатая система откачки. Сверху показаны длины (L) и диаметры (d) коллиматоров. Размеры даны в миллиметрах. Внизу указана скорость откачки насосов

ГНС-2, детекторная система

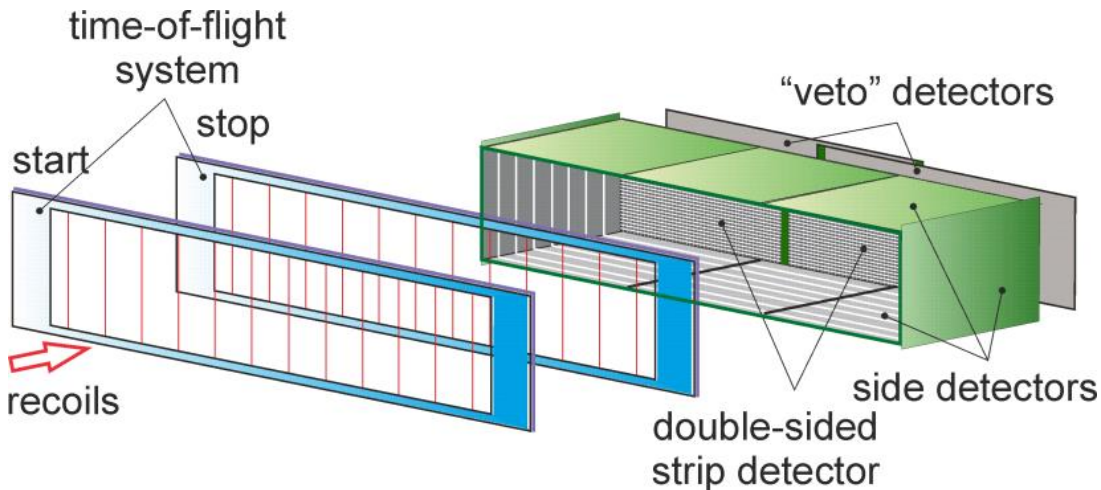
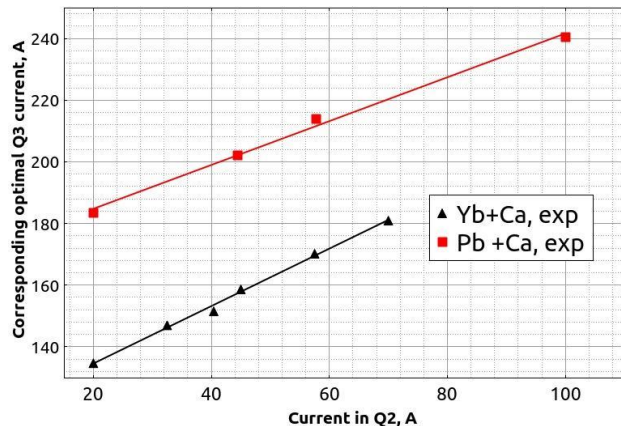


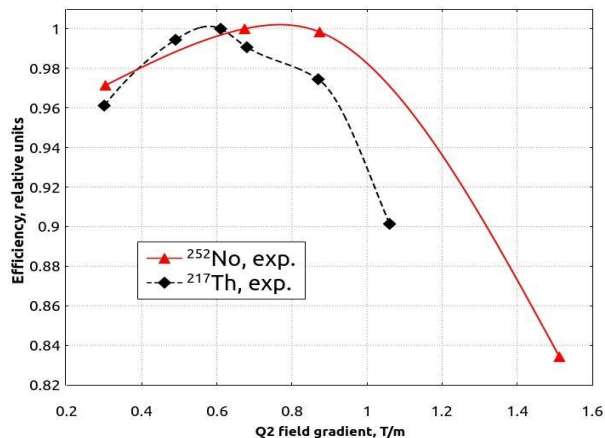
Схема детекторной системы DGFRS-2

- Площадь двусторонних стриповых кремниевых детекторов в фокальной плоскости $220 \times 48 \text{ мм}^2$
- 110 вертикальных стрипа толщиной 2 мм, 48 горизонтальных стрипов толщиной 1 мм
- Энергетическое разрешение вертикальных стрипов (стандартное отклонение пика одной альфа линии) $\approx 20 \text{ кэВ}$
- 8 стриповых боковых детекторов $60 \times 120 \text{ мм}^2$, стрипы толщиной 15 мм
- Эффективность регистрации полной энергии альфа частицы $\approx 80\%$

Ионно-оптические особенности сепаратора ГНС-2



Взаимосвязь между оптимальными токами в Q2 и Q3

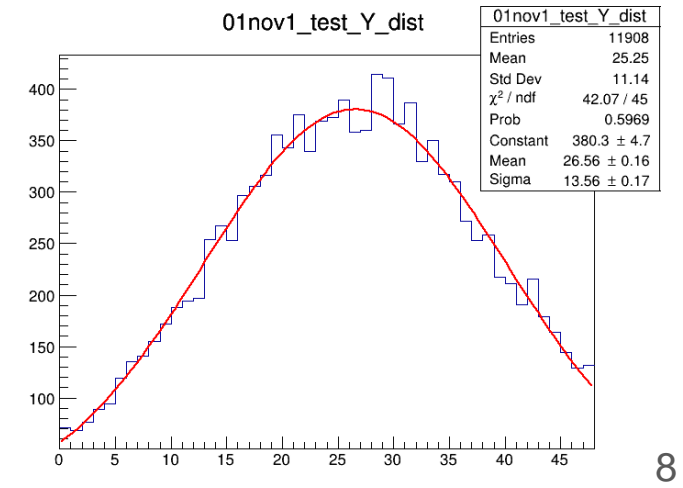
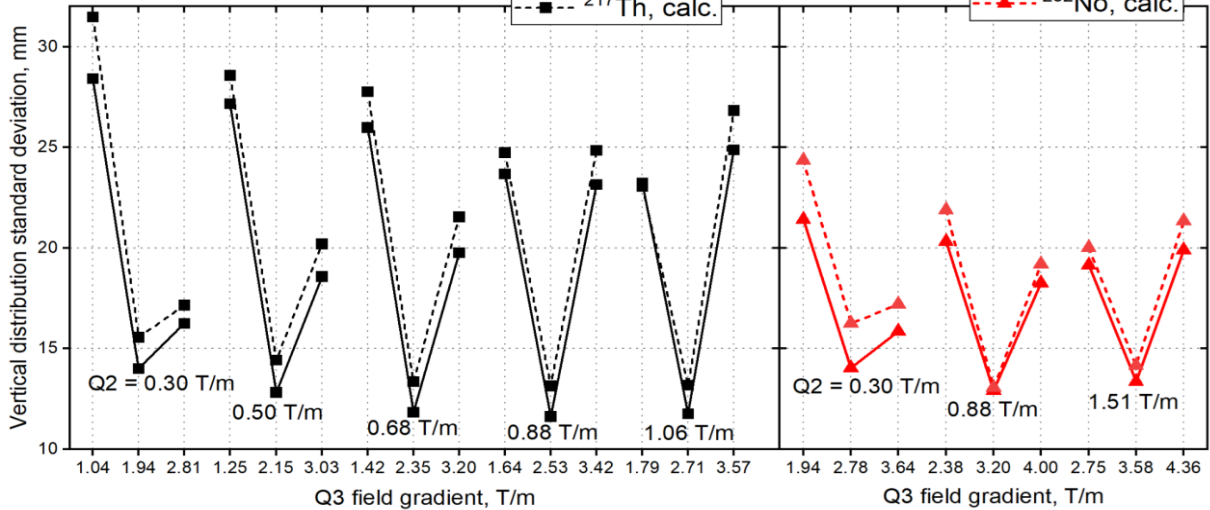
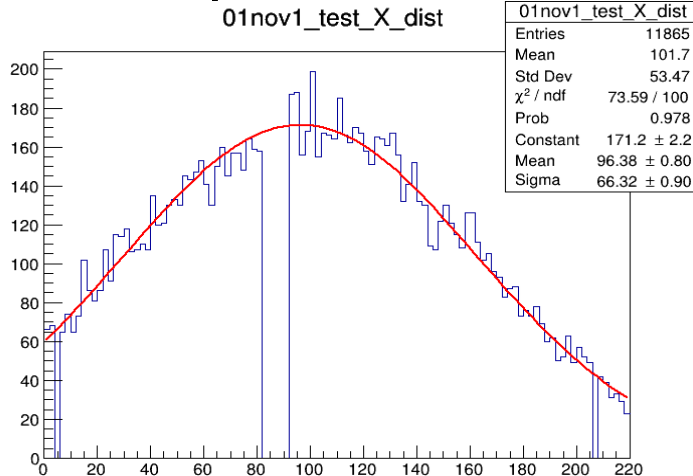
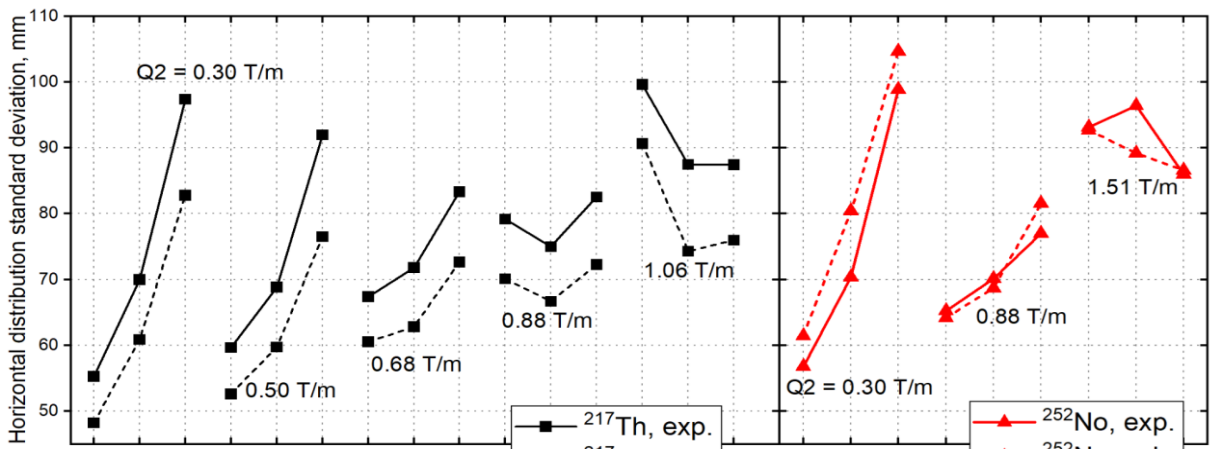


Эффективность в локальных оптимумах по Q2 и Q3.

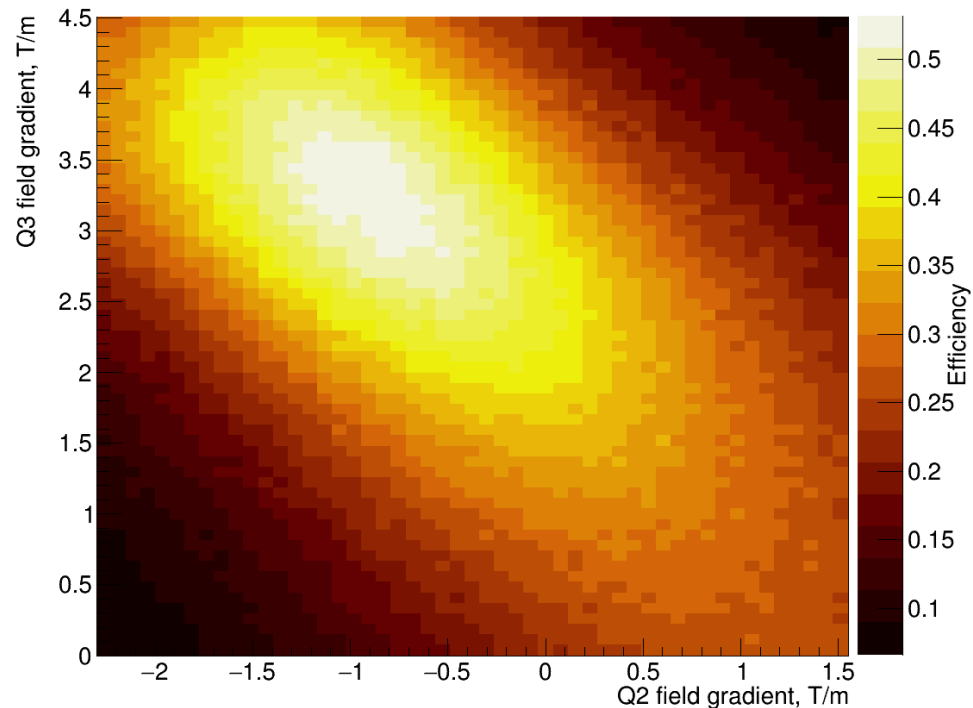
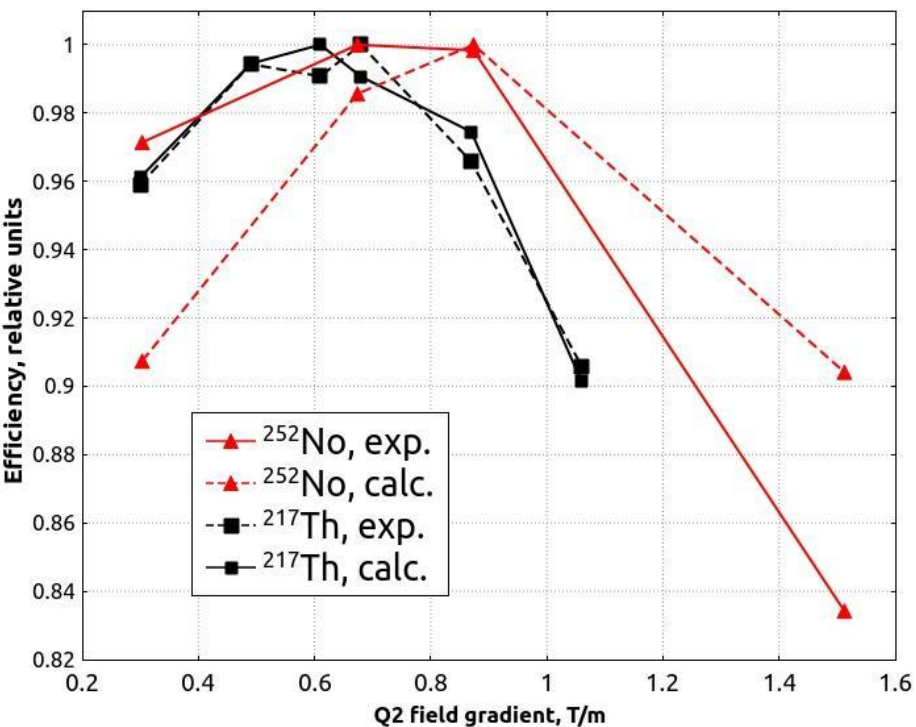
Тестовые реакции: $^{170}\text{Er}(^{48}\text{Ca},4n)^{214}\text{Ra}$, $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},5n)^{217}\text{Th}$, $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$

- Значение тока в Q1 влияет только на эффективность транспортировки ядер и не влияет на размер изображения в фокальной плоскости.
- Для каждого значения тока в Q2 существует определенный локальный оптимум тока в Q3, при котором трансмиссия максимальна (локальный максимум трансмиссии).
- Если экспериментально определить несколько подобных оптимальных пар токов в Q2 и Q3, то обнаруживается линейная взаимосвязь между ними.
- Максимальная трансмиссия сепаратора достигается при таком соотношении токов в Q2 и Q3, которые находятся на данной линейной зависимости, и определяется как максимальная величина из набора локальных максимумов.

Сравнение результатов измерений и моделирования

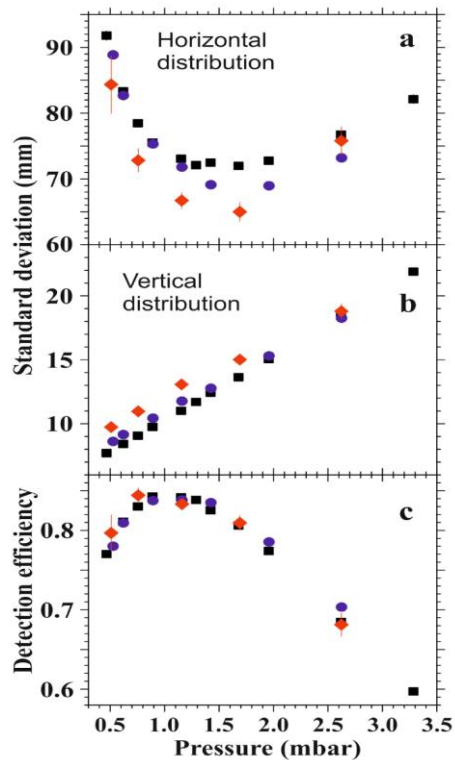


Сравнение результатов измерений и моделирования

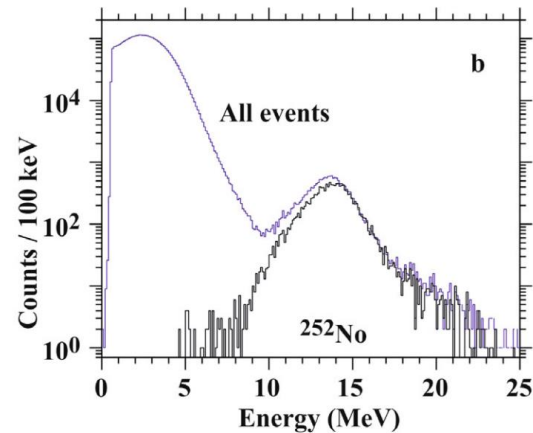
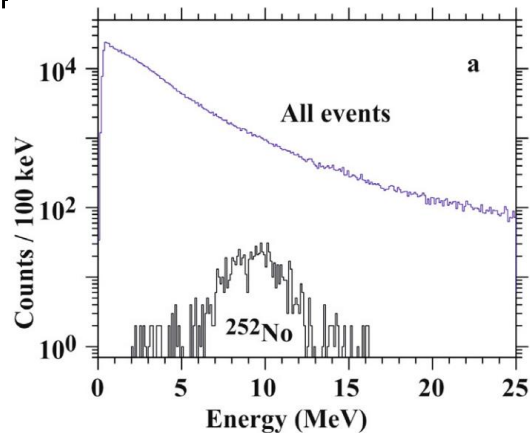


Сканирование Q2-Q3 для реакции $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$ для детекторов $220 \times 48 \text{ мм}^2$, отрицательный градиент – фокусировка по горизонтали, положительный – по вертикали 9

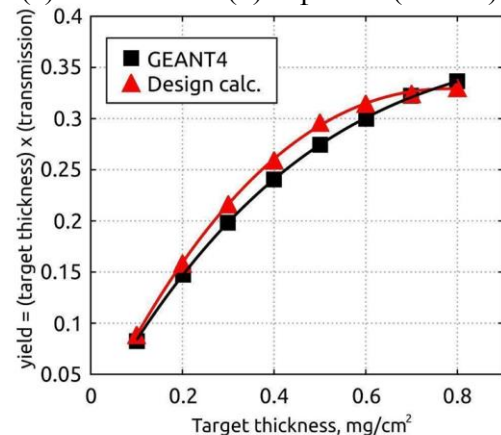
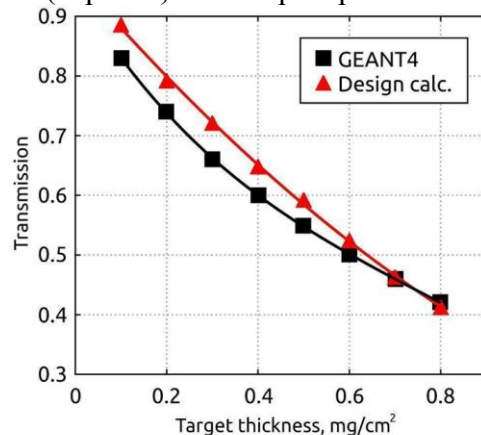
Характеристики сепаратора ГНС-2



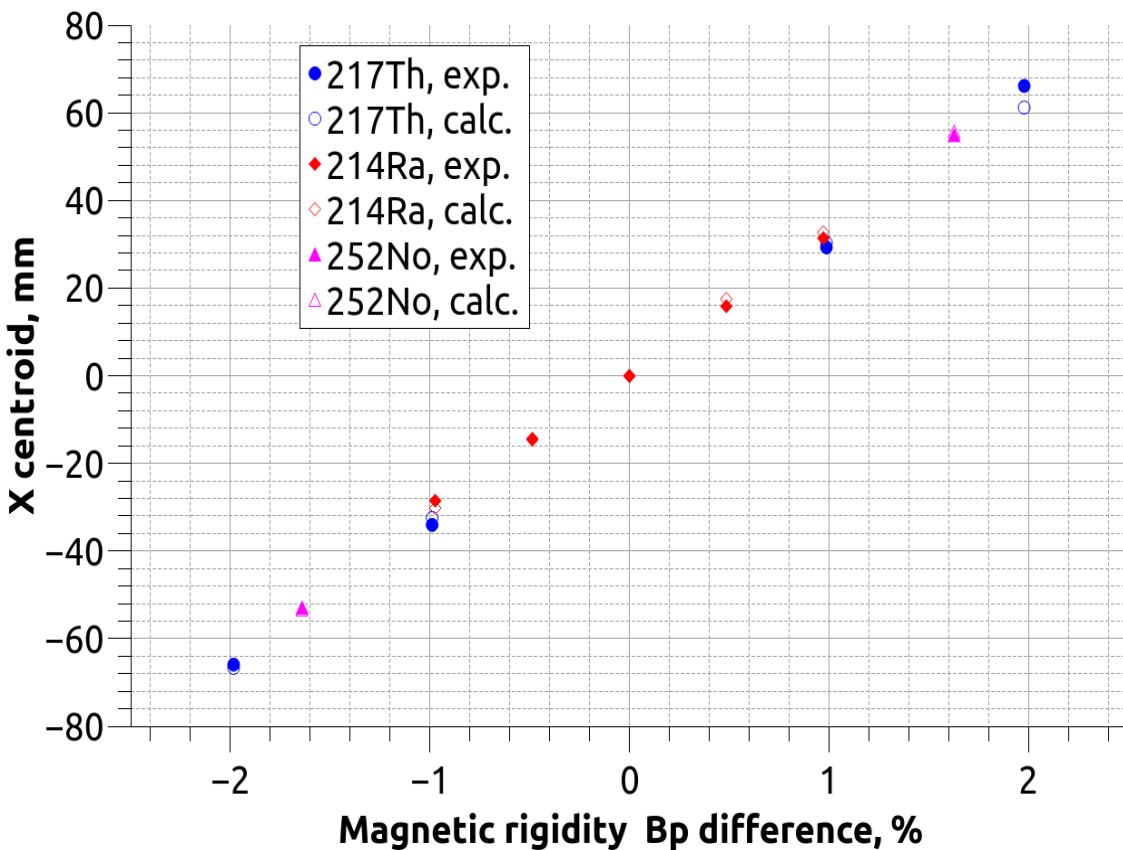
Зависимость от давления: а) ширины горизонтального распределения; б) ширины вертикального распределения; в) эффективности сбора ОИ детектором размерами 220x48 мм².



Сравнение спектров в совпадении с МПК реакции ²⁰⁶Pb(⁴⁸Ca,2n)²⁵²No (черным) на сепараторах DGFRS-1 (а) и DGFRS-2 (б) с фоном (синим)



Дисперсия, трансмиссия



Дисперсия D1:

экспериментальная 32.8 ± 0.3 mm/%Bp
расчетная 33.1 ± 0.4 mm/%Bp

Трансмиссия:

$0,43$ мг/см² ²⁰⁶Pb(⁴⁸Ca,2n)²⁵²No
экспериментальная $59 \pm 7\%$
расчетная 61%

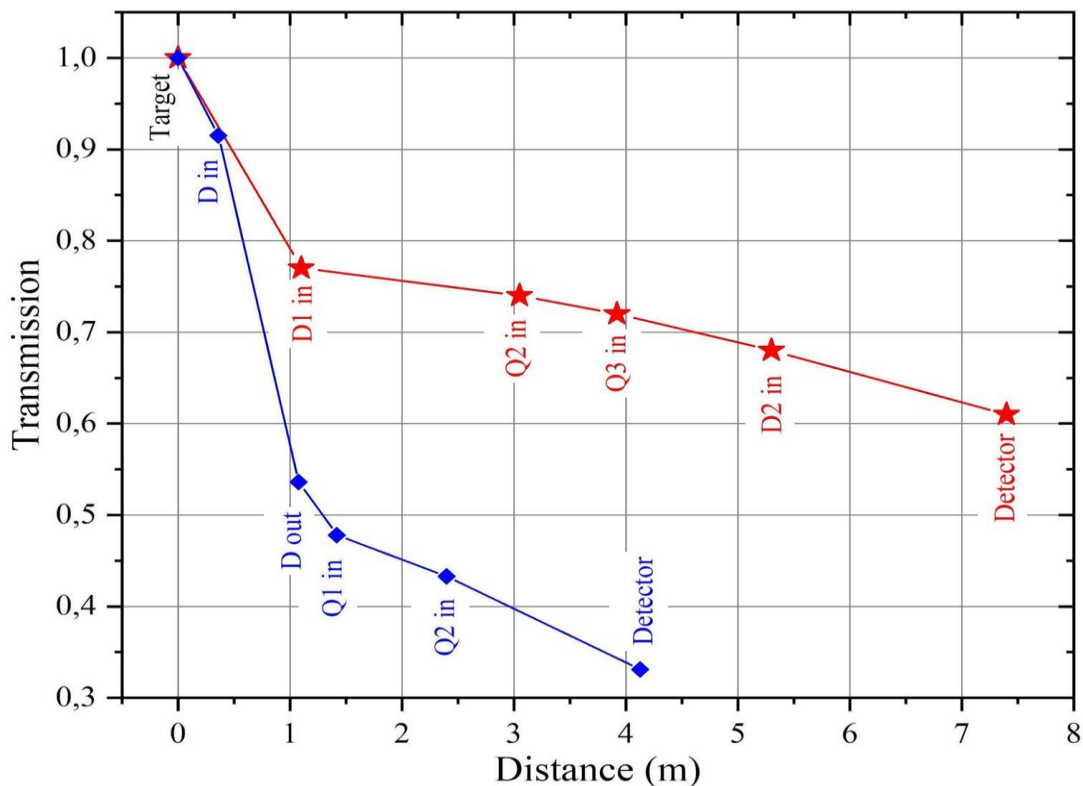
Характеристики сепаратора ГНС-2

Реакция: $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 2-3n)^{288-289}\text{Mc}$

	DGFRS-1	DGFRS-2
Толщина мишени, мг/см ²	0,37	0,36
Энергия ^{48}Ca , МэВ	243,4	243,9
Доза пучка, 10^{18}	3,3	8,0
Число распадов ^{288}Mc	6	30
Число распадов ^{289}Mc	0	5
Фактор увеличения эффективности	<u>1</u>	<u>2,3 ± 0,2</u>

Выход выше в два раза!

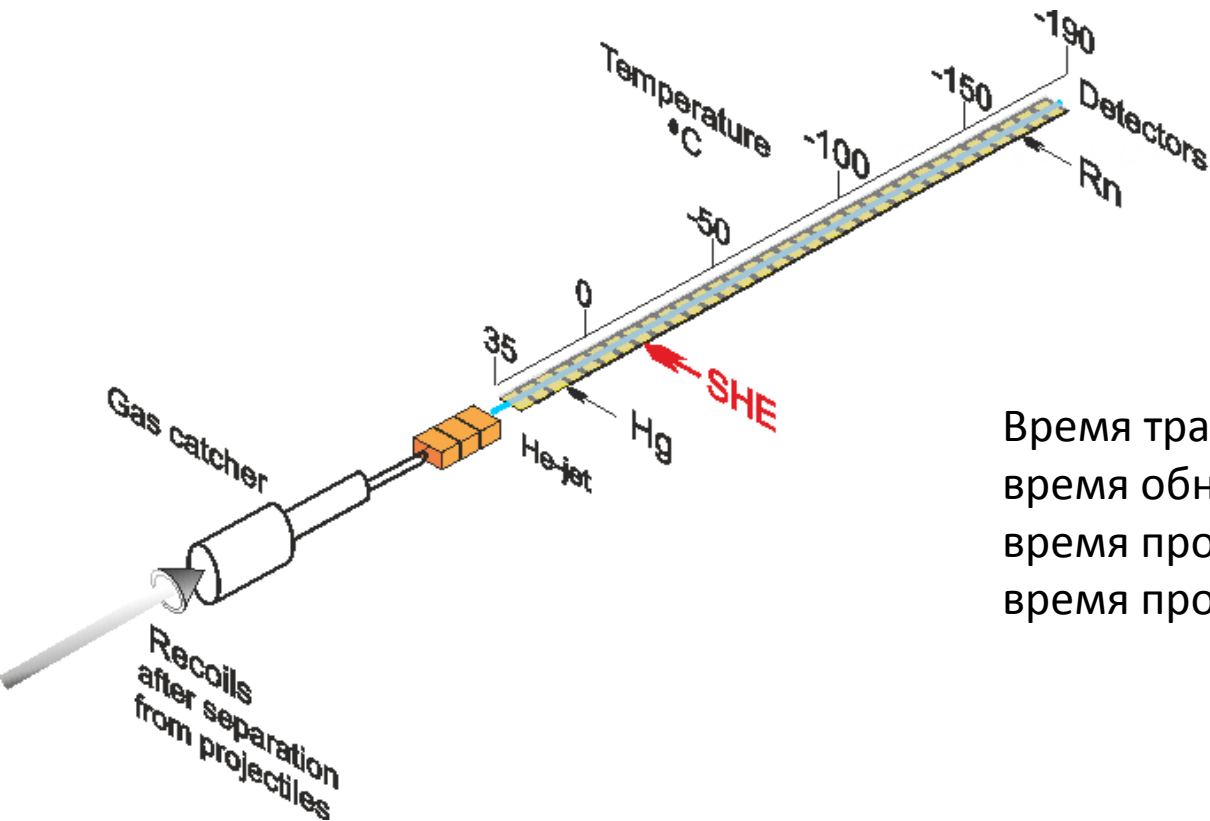
Потери рекойлов по длине сепаратора



Наибольший вклад в увеличение трансмиссии – добавление Q1

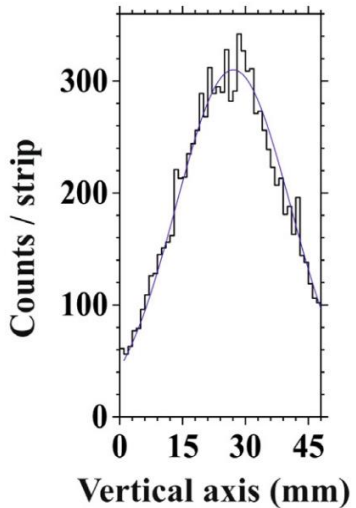
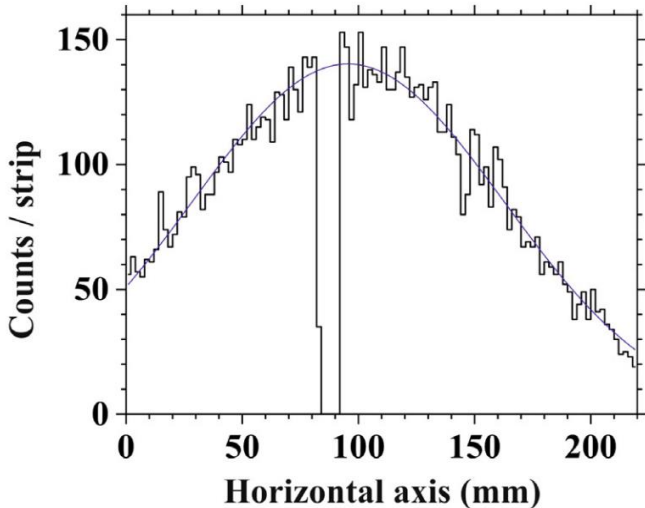
Сравнение потерь ОИ по длине сепаратора DGFRS-1 (синие ромбы) и DGFRS-2 (красные звезды) для реакции $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},4n)^{288}\text{Fl}$.

Схема установки для изучения химических свойств сверхтяжелых элементов



Время транспортировки до детекторов =
время обновления объема камеры +
время пролета через капилляр +
время пролета через детекторную сборку

Размеры изображения ОИ в фокальной плоскости ГНС-2

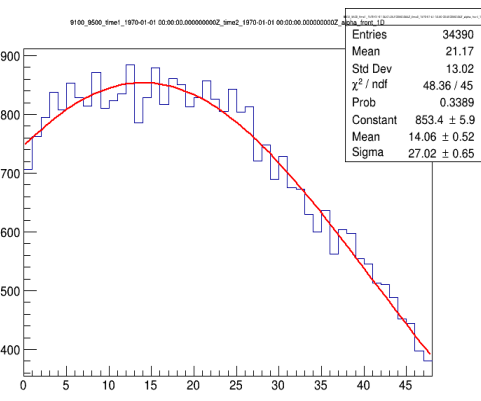
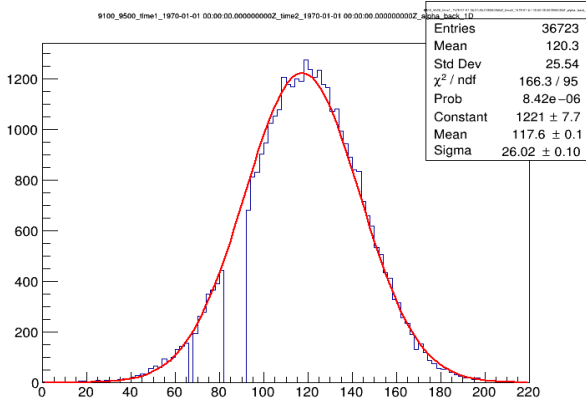


Реакция: $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$

Конфигурация: $Q_v D_h Q_h Q_v D$

Трансмиссия: $\approx 60\%$ для мишени 0.4 мг/см^2

$\sigma_x = 70.1 \text{ мм}$ $\sigma_y = 12.9 \text{ мм}$



Реакция: $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{217}\text{Th}$

Конфигурация: $Q_v D_h Q_v Q_h D$

Трансмиссия: $\approx 40\%$ для мишени 0.4 мг/см^2

$\sigma_x = 26.0 \text{ мм}$ $\sigma_y = 27.0 \text{ мм}$

Размер изображения на ГНС-2

- Сигмы изображения 27 мм по X и по Y
- Трансмиссия 40%
- Мишень 0.4 мг/см²
- Пучок 1 мкА-частиц
- Камера: цилиндр длиной 1 см
- Поток газа 1.8 л/мин

Изотоп	Сечение образования, пб	Период полураспада, мс
²⁸⁷ F1	10	330
²⁸⁸ Mc	17	193
²⁹³ Lv	3.4	57
²⁹⁴ Ts	1.1	51

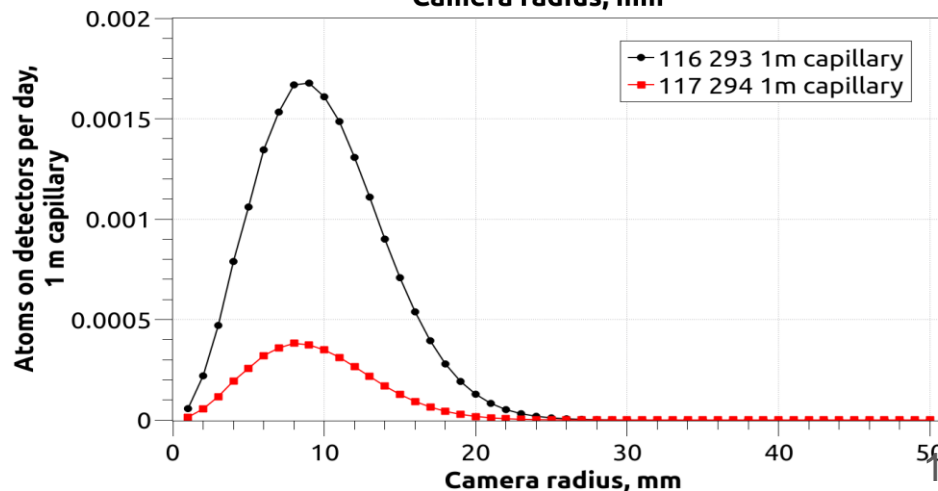
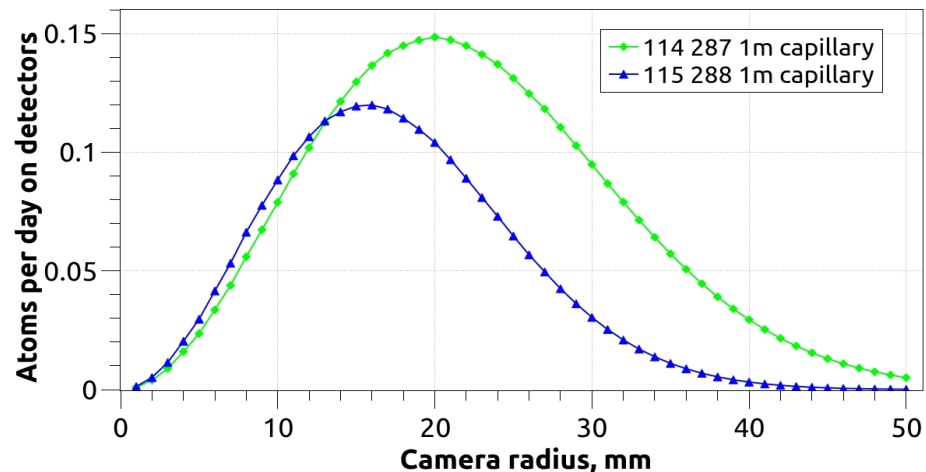
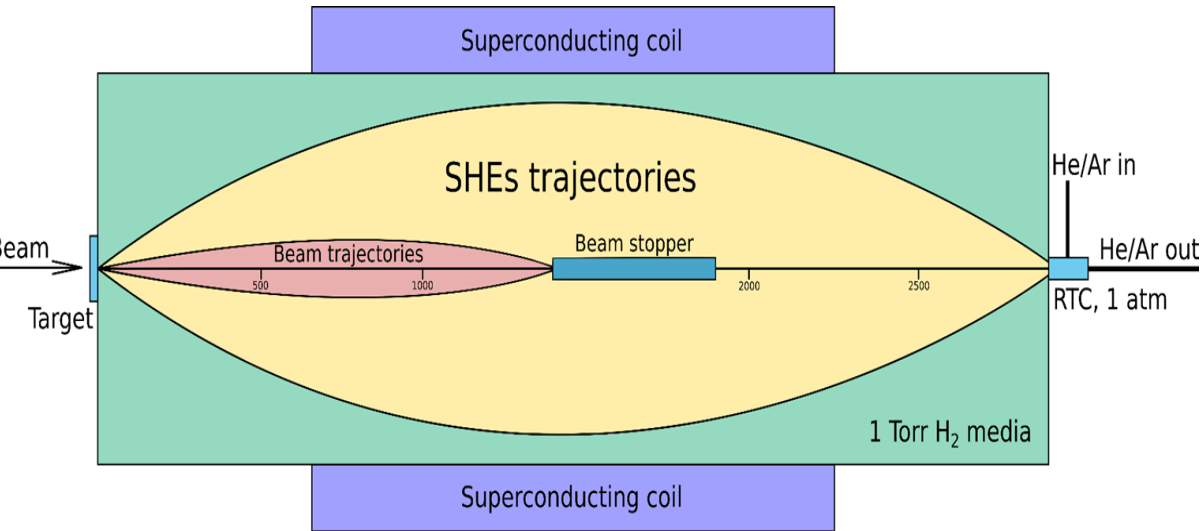


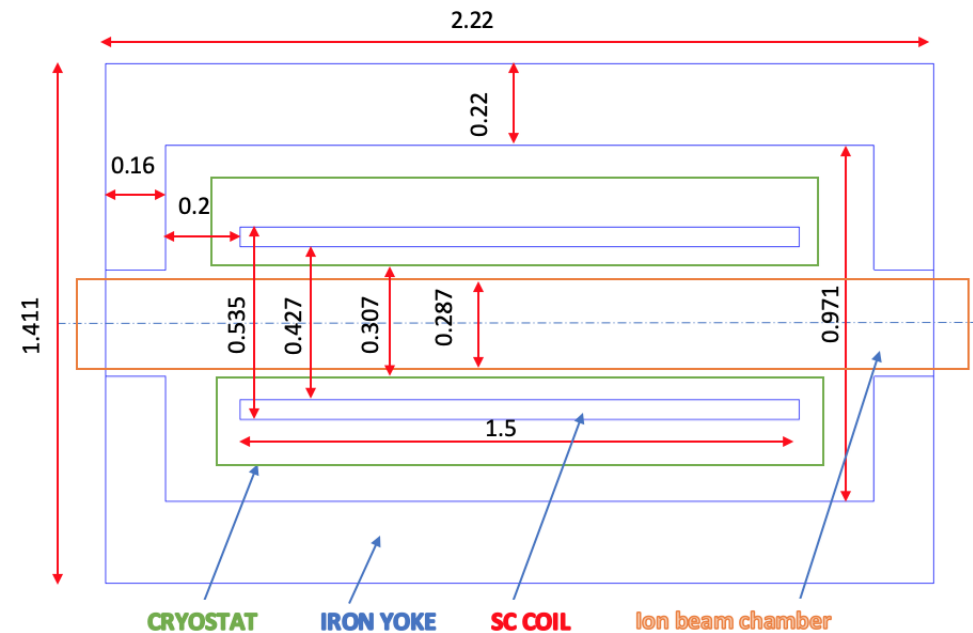
Схема работы установки GASSOL



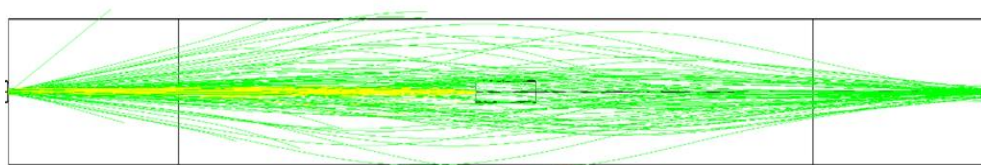
$$f \approx 4 \frac{p^2}{q^2 L \overline{B_z^2}}$$

- Импульс пучка и рекойлов одинаков
- Заряд пучка в газе примерно в 3 раза выше
- Фокусное расстояние для пучка ближе – ставим туда стоппер!

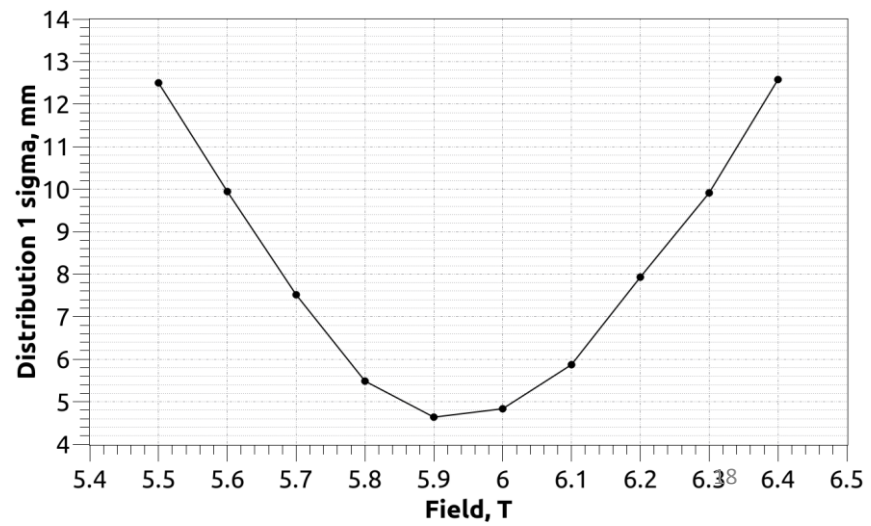
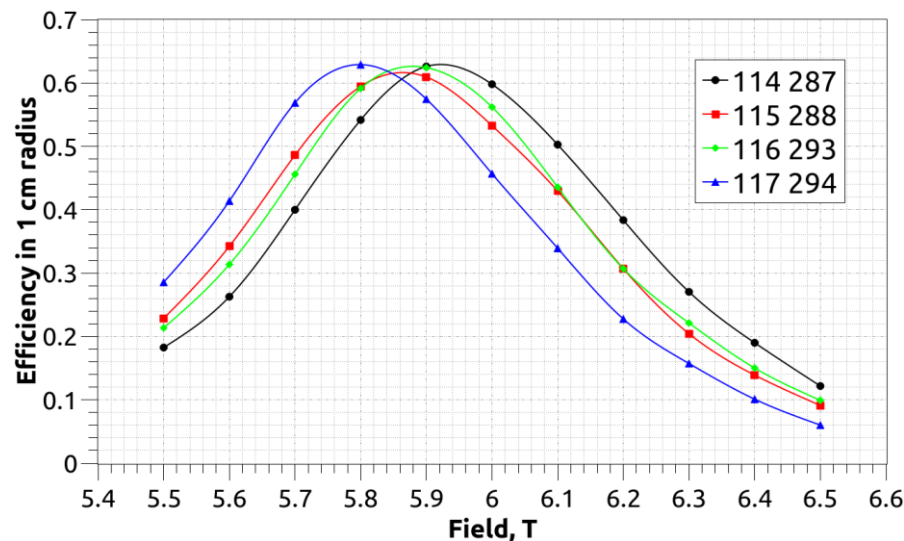
Расчетная модель



Эскиз GASSOL



Расчетная модель GASSOL в Geant4



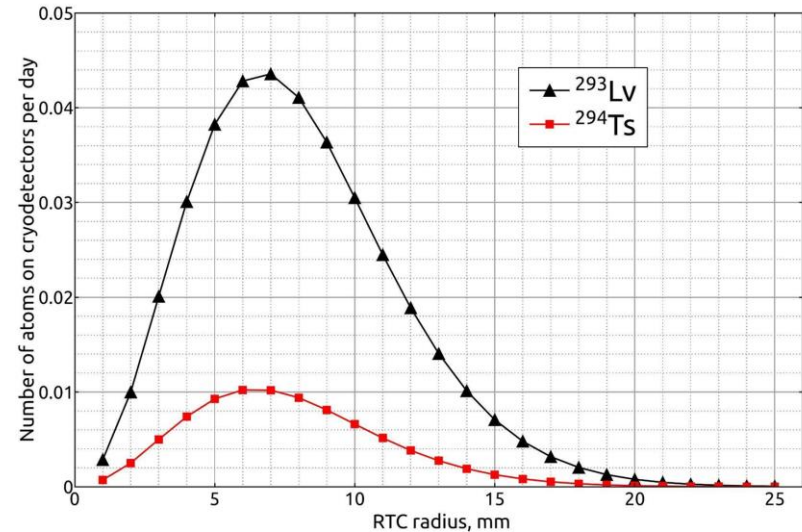
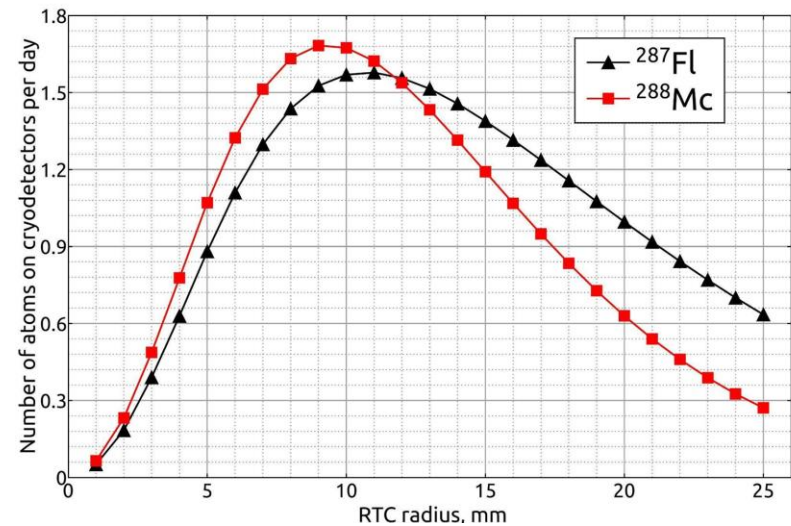
Результаты расчета

Начальные условия:

- Мишень 0.4 мг/см^2
- Пучок 1 мкА -частиц
- Камера: цилиндр длиной 1 см
- Поток газа 1.8 л/мин

Результаты:

- Трансмиссия установки $\approx 70\%$ до фокальной плоскости
- Изображение в оптимуме 1 сигма $\approx 4.6 \text{ мм}$
- Количество атомов в день на детекторах порядок выше, чем на ГНС-2



Результаты расчета

Изотоп СТЭ	^{287}Fl	^{288}Mc	^{293}Lv	^{294}Ts
Оптимальный радиус камеры, см	1.1	0.9	0.7	0.6
Эффективность для данного радиуса	0.52	0.47	0.37	0.31
Объем камеры, см ³	3.8	2.5	1.5	1.1
Время обновления объема камеры, с	0.127	0.08	<u>0.051</u>	<u>0.038</u>
Время транспортировки через капилляр, с	0.063	0.063	0.063	0.063
Время пролета через детектор, с	0.11	0.11	0.11	0.11
Полное время транспортировки, с	0.299	0.257	<u>0.224</u>	<u>0.21</u>
Период полураспада, с	0.360	0.193	<u>0.057</u>	<u>0.051</u>
Число атомов в день в камере	2.81	4.24	0.66	0.18
Число атомов в день на детекторах	1.58	1.68	0.044	0.010

Мишень 0.4 мг/см²
 Пучок 1 мкА-частиц
 Камера: цилиндр длиной 1 см
 Поток газа 1.8 л/мин

Наибольшие затраты времени – капилляр и детекторы!
 Термохроматографический детектор малых размеров?
GSI: miniCOMPACT, 8 см в длину

Необходима высокая интенсивность пучка – нужна мишень большой площади!

Проблема очистки

Пучок:

Большая часть пучка останавливается в стоппере.

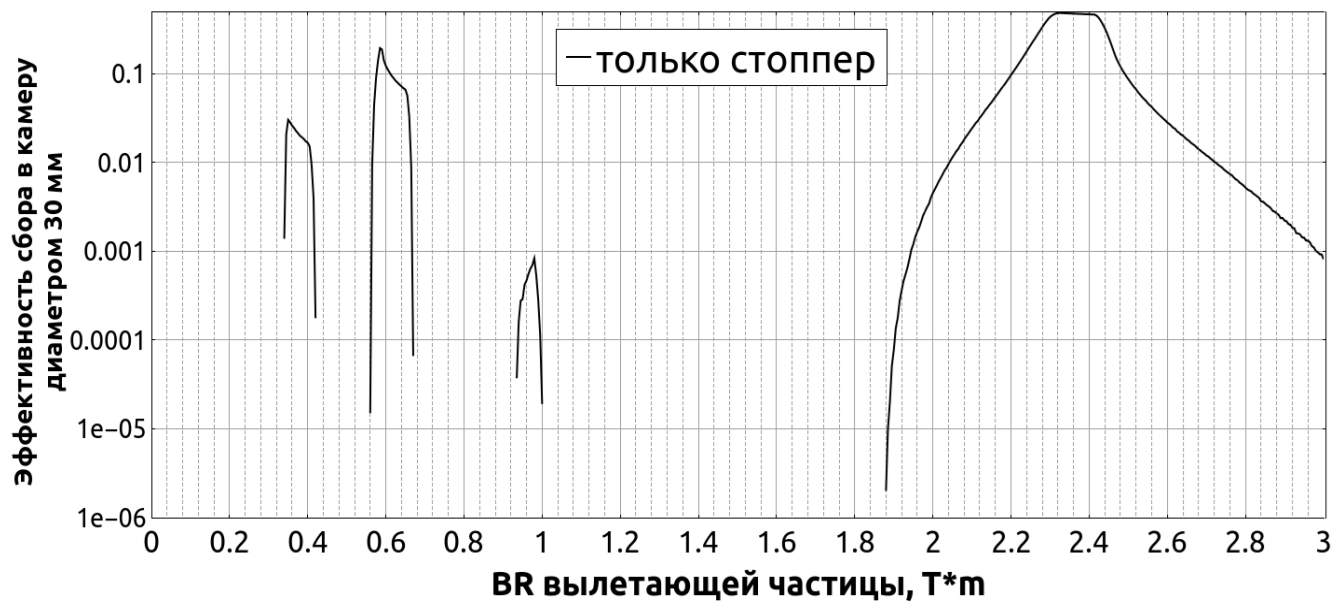
Соленоид SOLITAIRE (Австралия): в реакции $^{30}\text{Si}+^{186}\text{W}$ в 1 см при пучке 10^8 ионов/с счет был 100 ионов/с, исходя из этого, очистка на SOLITAIRE примерно 6 порядков. На GASSOL, таким образом, **при пучке в $6 \cdot 10^{13}$ ионов/с (~ 10 мкА-частиц)** стоит ожидать **не менее, чем $6 \cdot 10^7$ ионов/с** в камере радиусом 1 см. Основной источник фона - **рассеянные ионы пучка**.

Продукты передач:

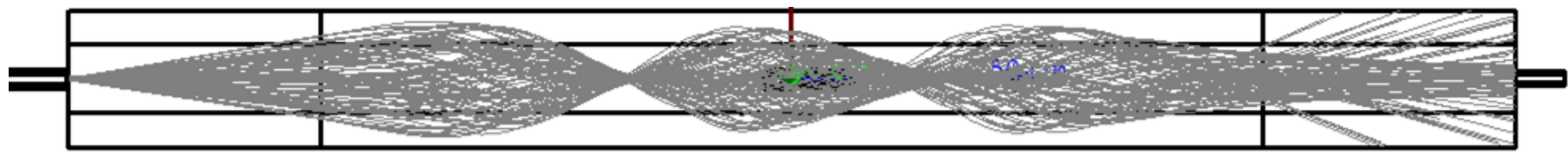
Дают фон альфа-частиц и деления на криодетекторах - могут помешать идентификации сверхтяжелых элементов

Проблема очистки

Поле: 5,9 Тесла
Меняется магнитная жесткость (BR) частицы от 0.005 до 3 Т*м: ХОТИМ понять, с какими BR прилетят в камеру в хим. опытах



Эффективность сбора в зависимости от BR частицы

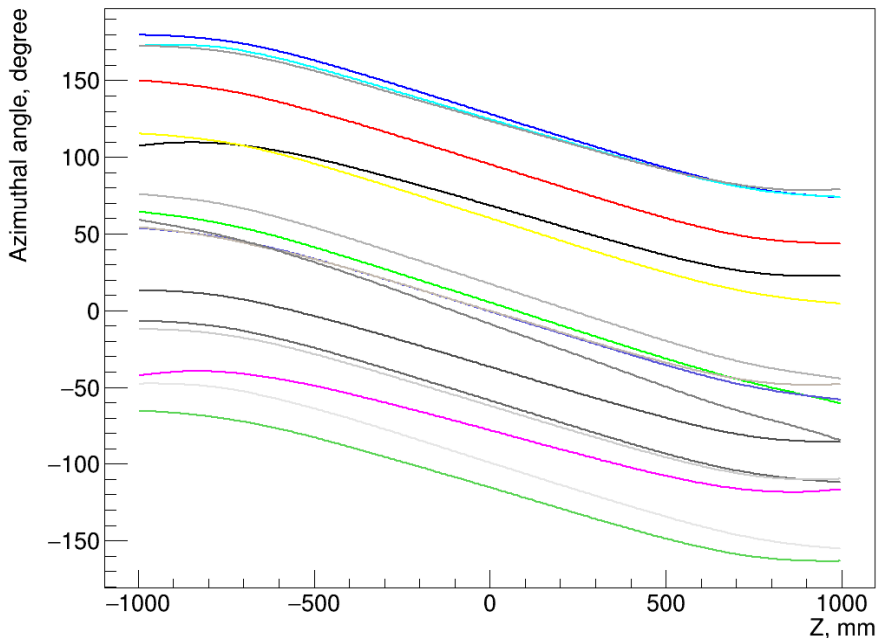


Моделирование 100 траекторий для BR = 0.6 Т*м

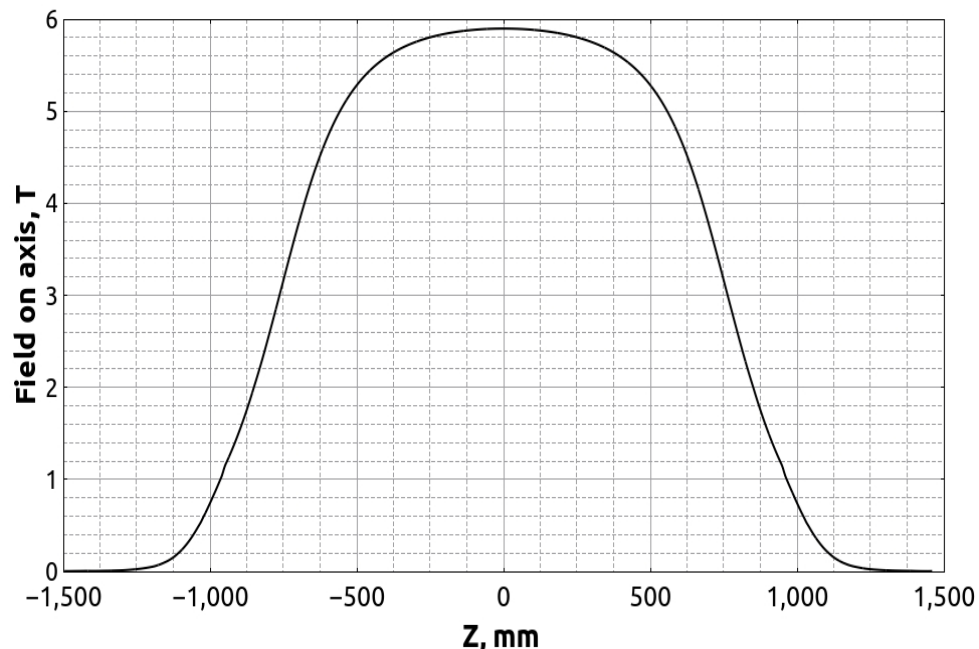
Принцип очистки

$$\omega = \frac{qB}{m}$$
$$\varphi = \frac{qBt}{m} \approx \frac{qBL}{mv}$$

Частицы внутри соленоида поворачиваются за некоторую заданную длину на угол, обратно пропорциональный магнитной жесткости



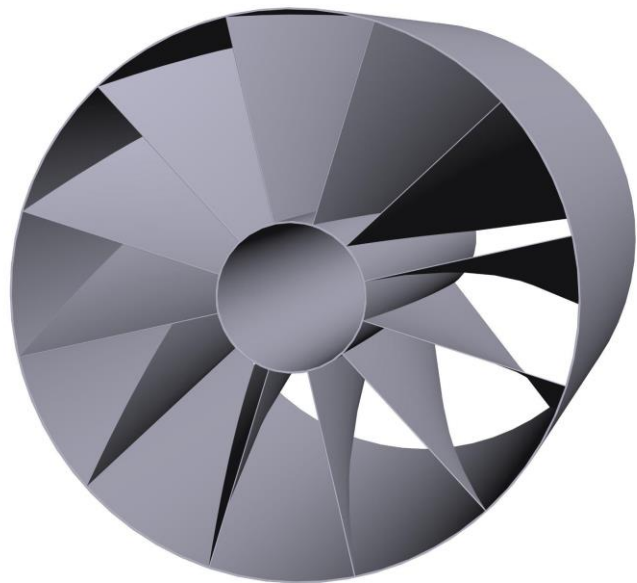
Угловые траектории ^{287}Fl



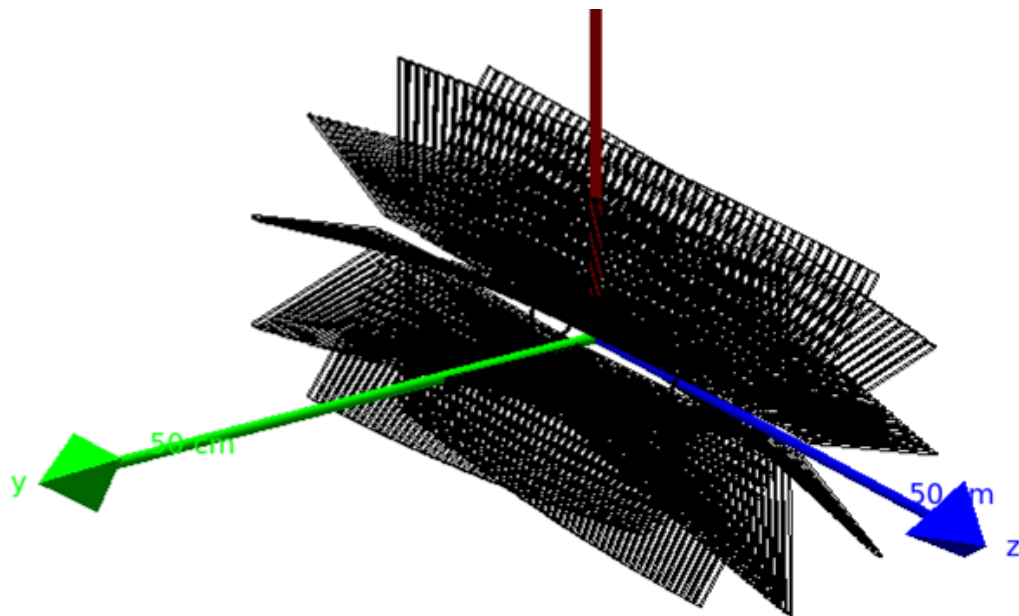
Поле соленоида на оси в зависимости от Z 23

Спиральный стоппер

Длина стоппера 500 мм, полный угол поворота одной лопасти 37°

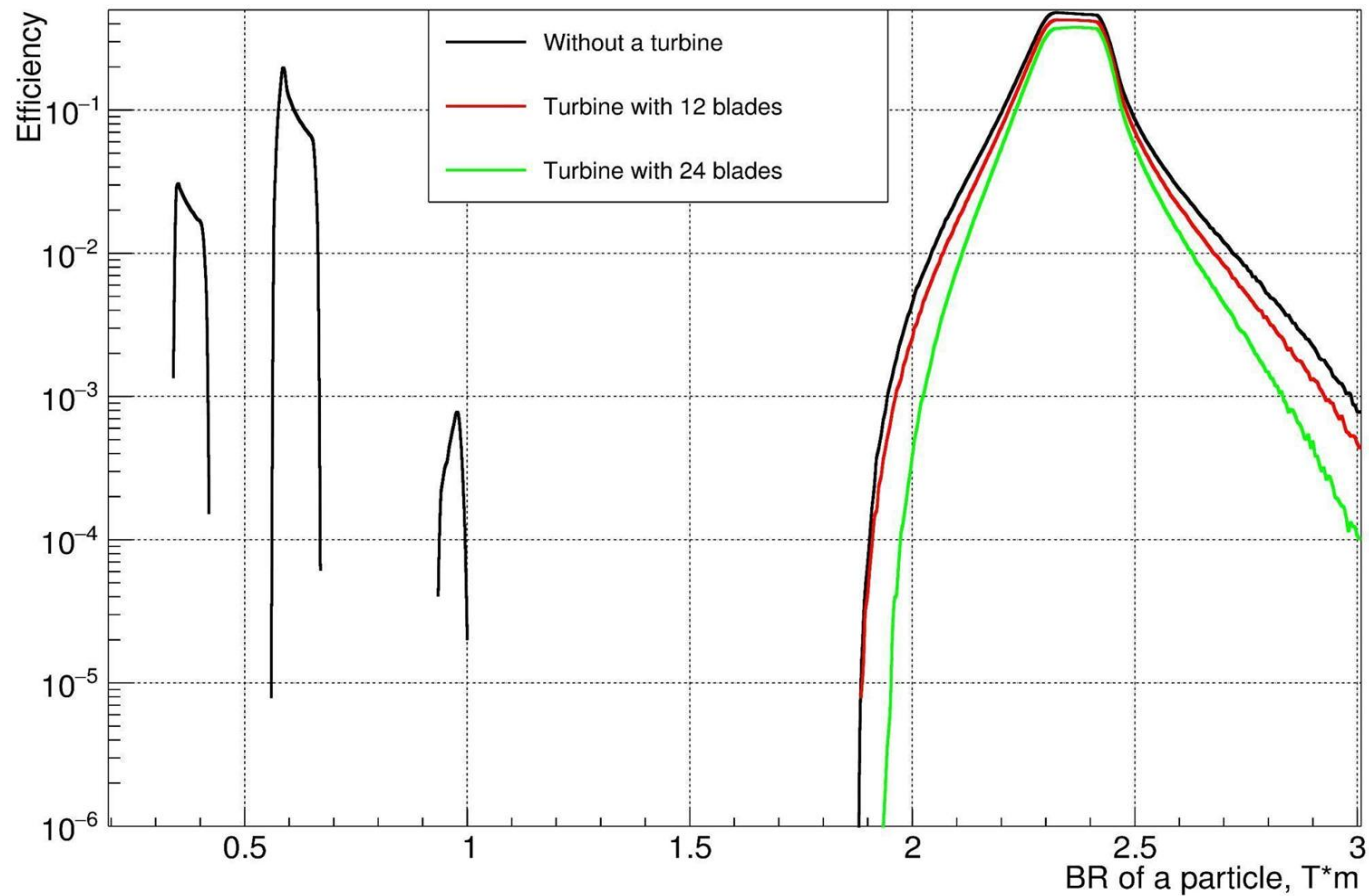


Эскиз стоппера



Спиральный стоппер в расчетной модели 24

Результаты расчета



Турбина

- Дополнительный фактор подавления в 10^6 для камеры радиусом 15 мм для частиц с магнитной жесткостью в диапазоне от 0.005 до 1.8 Т*м
- Полоса пропускания от 2 до 3 Т*м всё еще довольно широка

Число лопастей	Длина, мм	Полный угол поворота турбины, град	Потери ОИ при несмещенных отн. магнитопровода катушках	Потери ОИ при смещенных отн. магнитопровода на ± 5 мм катушках
10	300	20.88	0.0947	0.1132
10	500	34.8	0.1075	0.1457
10	700	48.72	0.1285	0.1977
10	900	62.64	0.1657	0.2728
15	300	20.88	0.143	0.1669
15	500	34.8	0.1631	0.2183
15	700	48.72	0.1927	0.2945
20	300	20.88	0.1891	0.2226
20	500	34.8	0.2184	0.2926

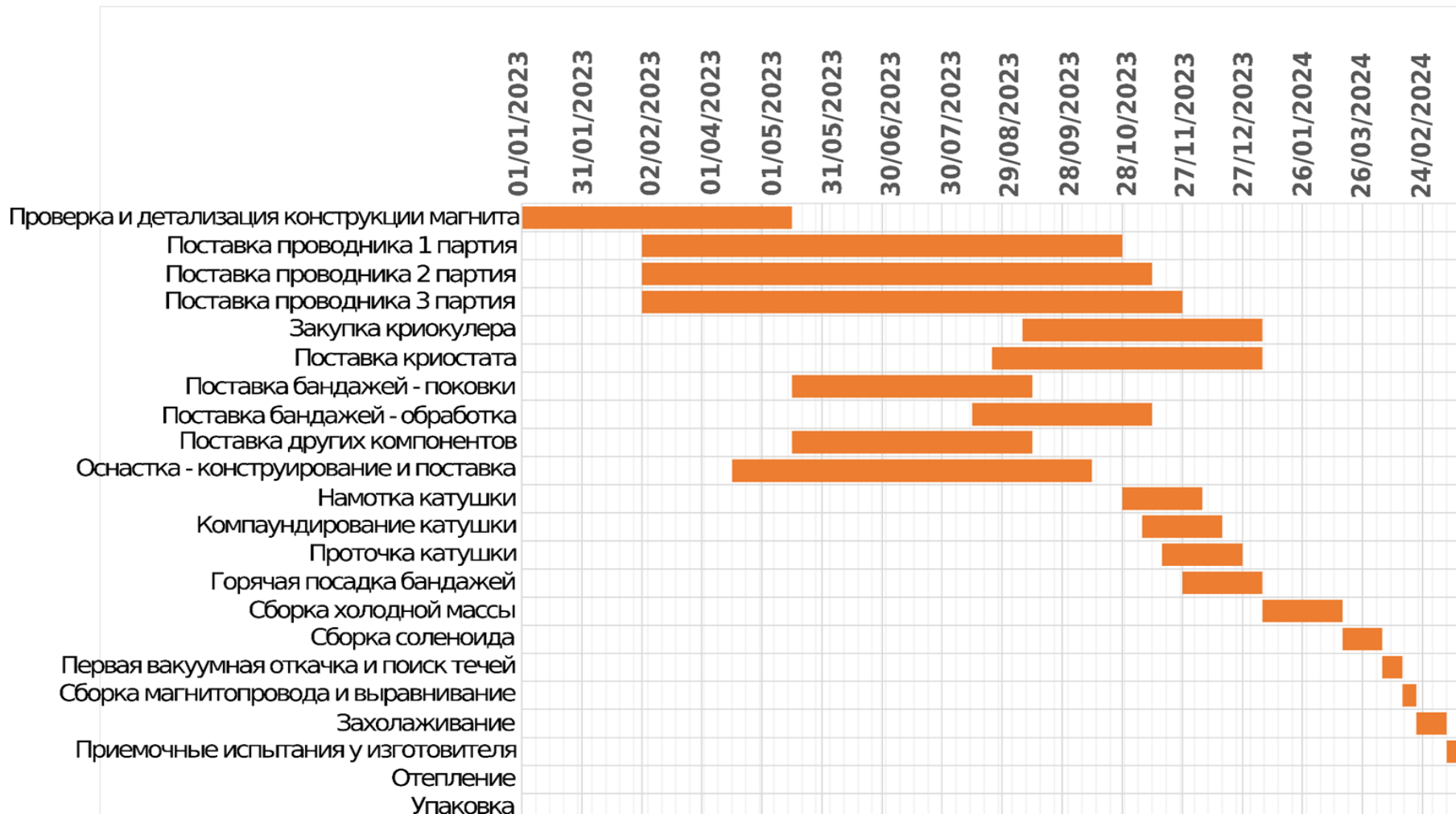
DGFRS-2:

- Трансмиссия выше приблизительно в два раза в сравнении с DGFRS-1
- Степень подавления фона выше в 200 раз в сравнении с DGFRS-1
- В сочетании с интенсивностями пучка, достигаемыми на ускорителе DC-280, позволяет изучать реакции слияния в фемтобарновом диапазоне
- Размеры изображения в фокальной плоскости делают невозможным изучение химических свойств СТЭ с $Z > 115$

GASSOL:

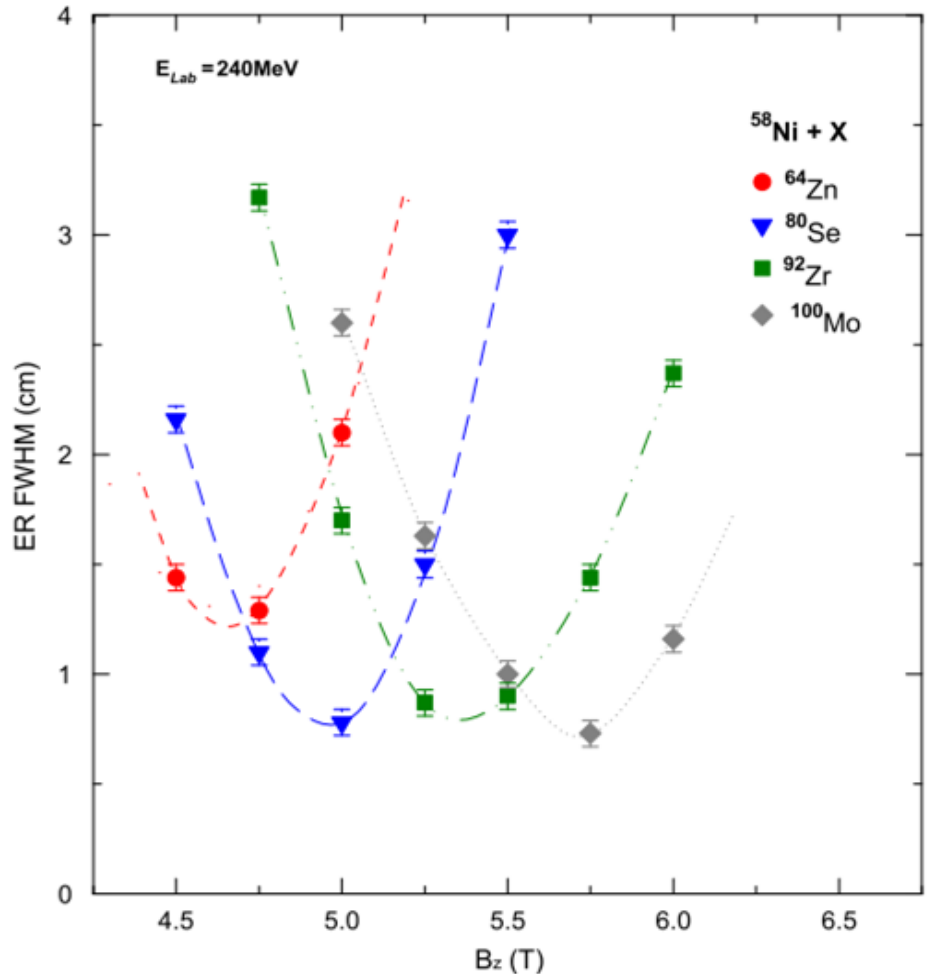
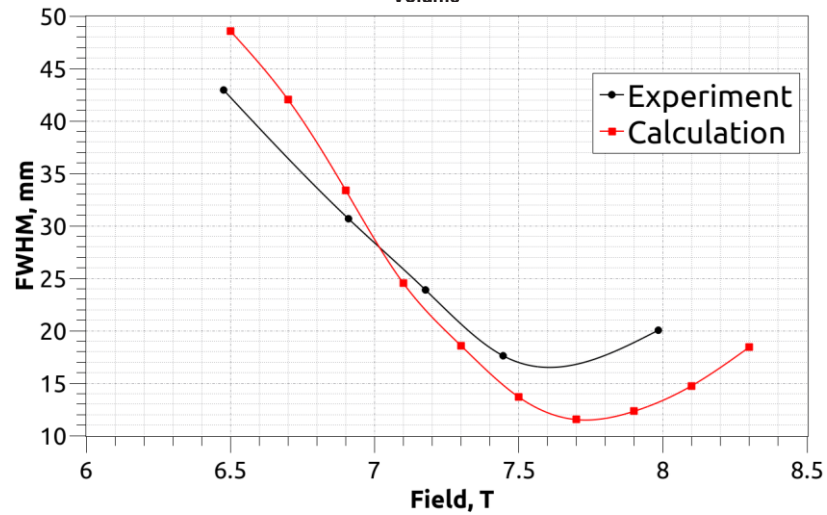
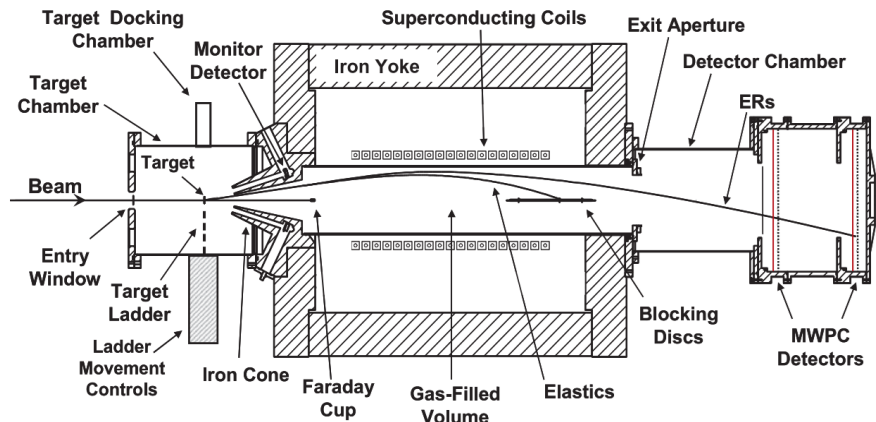
- Высокая расчетная трансмиссия
- Малые расчетные размеры изображения
- Возможно изучение хим. свойств 116 и 117 методами газовой термохроматографии, если будут созданы устойчивые мишени и малая детекторная система
- Уровень подавления фоновых частиц - неясен, может быть измерен только экспериментально
- Возможности по использованию для изучения многонуклонных передач – будущие расчеты

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПЛАН ИЗГОТОВЛЕНИЯ GASSOL



Спасибо за внимание!

Верификация расчета: соленоиды SOLITAIRE



Методы расчета. Сечения перезарядки.

Алгоритм основан на двух принципах:

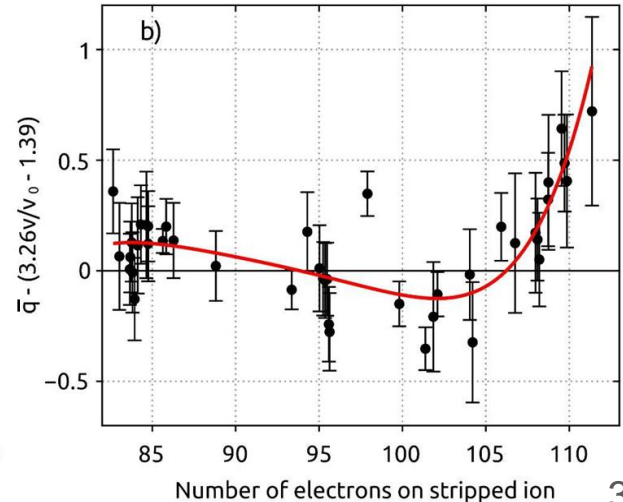
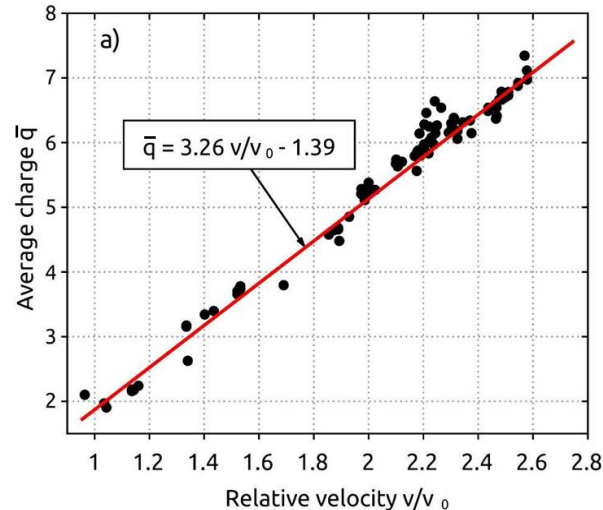
1. Распределение зарядовых состояний в равновесном состоянии распределено по гауссу
2. Сечение захвата и потери электрона увеличиваются и убывают при удалении зарядового состояния от равновесного по экспоненте. Многоэлектронной перезарядкой пренебрежено

$$\sigma_{fit} = 8.77 \bar{q} * \exp\left(-0.0614 * \frac{E}{\bar{q}^7}\right) - \text{фит экспериментально полученных сечений}$$

Для равновесного заряда сечение захвата электрона равно сечению потери – иначе заряд не был бы равновесным

$$\sigma_{q,q-1} = \sigma_{fit} \exp(0.12(q - \bar{q}))$$

$$\sigma_{q,q+1} = \sigma_{fit} \exp(0.12(\bar{q} - q))$$



Методы расчета. Сечения перезарядки.

$$\bar{q} = 3.26 * v / v_0 - 1.39$$

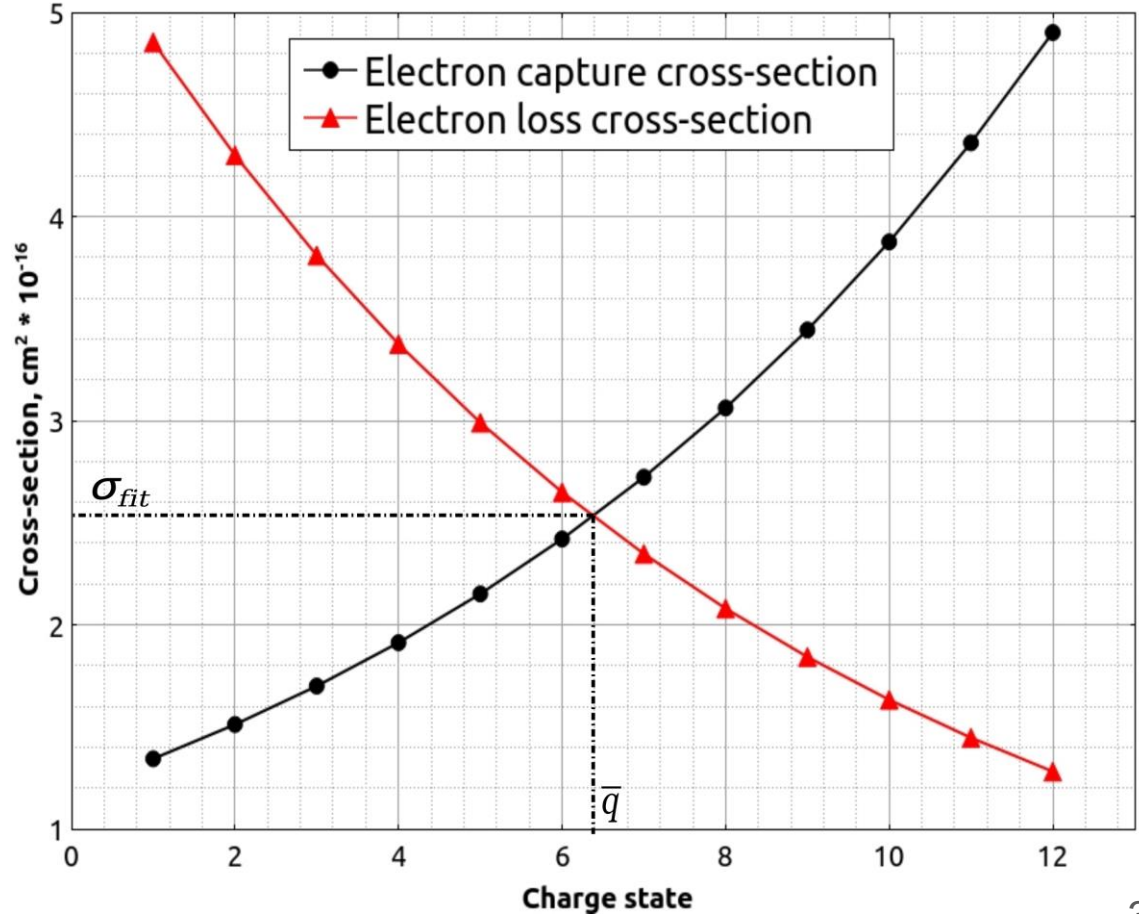
$$v_0 = 2.19 * 10^6 \text{ м/с}$$

$$\sigma_{fit} = 8.77 \bar{q} * \exp\left(-0.0614 * \frac{E}{\bar{q}^7}\right)$$

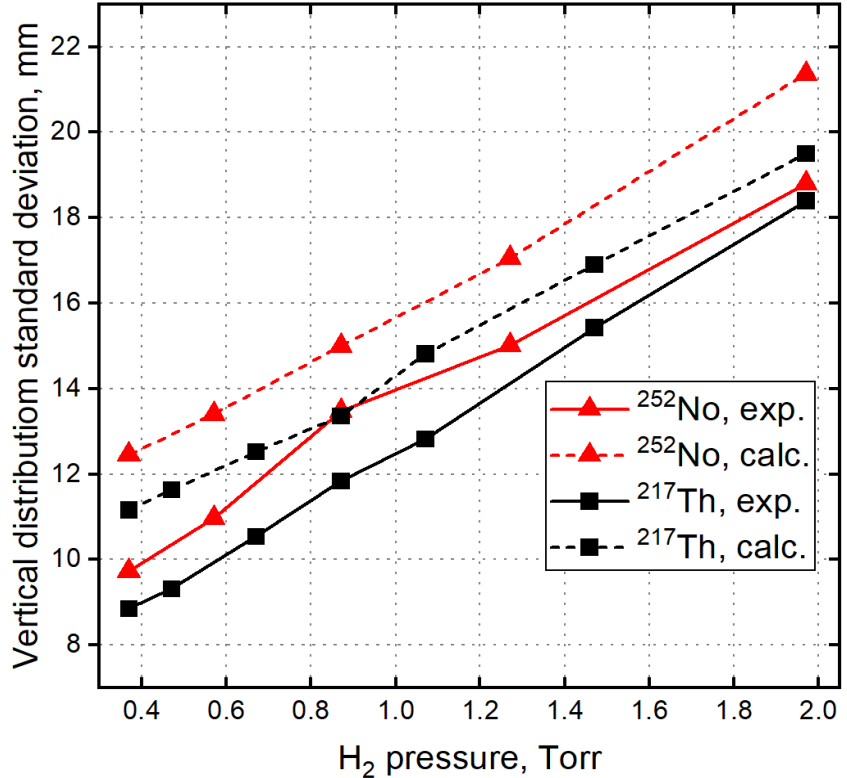
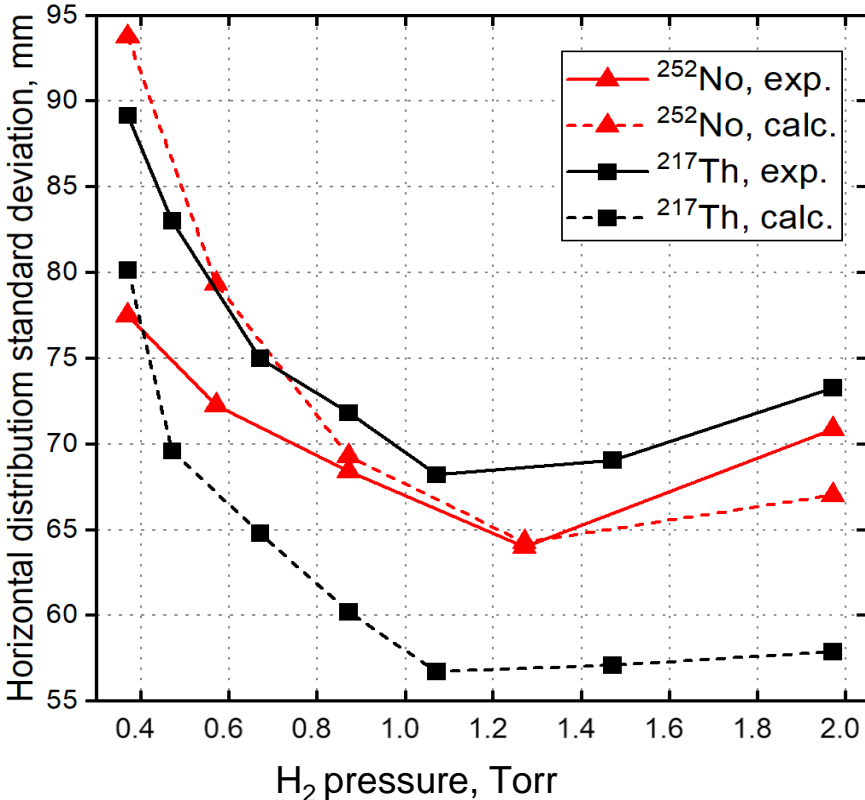
Для равновесного заряда сечение захвата электрона равно сечению потери – иначе заряд не был бы равновесным

$$\sigma_{q,q-1} = \sigma_{fit} \exp(0.12(q - \bar{q}))$$

$$\sigma_{q,q+1} = \sigma_{fit} \exp(0.12(\bar{q} - q))$$



Сравнение результатов измерений и моделирования



Моделирование траекторий ионов

Модели должна содержать в себе:

1. Моделирование образования составного ядра в слое мишени.
2. Оценка изменения энергии и направления импульса рекойлов за счет испарения нейтронов.
3. Расчет многократного рассеяния рекойла в мишени, объеме сепаратора, заполненного газом, входном майларовом окне и пентане, заполняющем камеру детекторов.
4. Расчет энергетических потерь в мишени и узлах сепаратора.
5. Моделирование перезарядки рекойла.
6. Расчет движения рекойла в магнитных полях установки.

Методы расчета. Распределение пучка

Моделирование начинается с разыгрывания параметров иона пучка:

- $Z = 1$ мм до мишени
- $X, Y \sim$ гауссиан с сигмой 2.5 мм и средним 0
- $E \sim$ гауссиан с сигмой 0.3% от заданной энергии
- Импульс направлен перпендикулярно мишени

Ион пучка проходит через подложку мишени, рассеиваясь и теряя энергию.

Методы расчета. Модель испарения.

Равномерно по толщине мишени разыгрывается точка образования составного ядра. Затем:

$$\vec{p}_{CN}^{lab} = \vec{p}_{proj}$$

$$E_{CN}^* = \frac{T_{proj} * A_{tar}}{A_{CN}} + \Delta_{proj} + \Delta_{tar} - \Delta_{CN}$$

Процесс испарения:

$$t = \sqrt{E_{CN}^*/10}$$

$$P(T_n) = \frac{1}{t^2} T_n e^{-T_n/t}$$

$$\Delta E_{CN}^* = T_n + E_n^{bind}$$

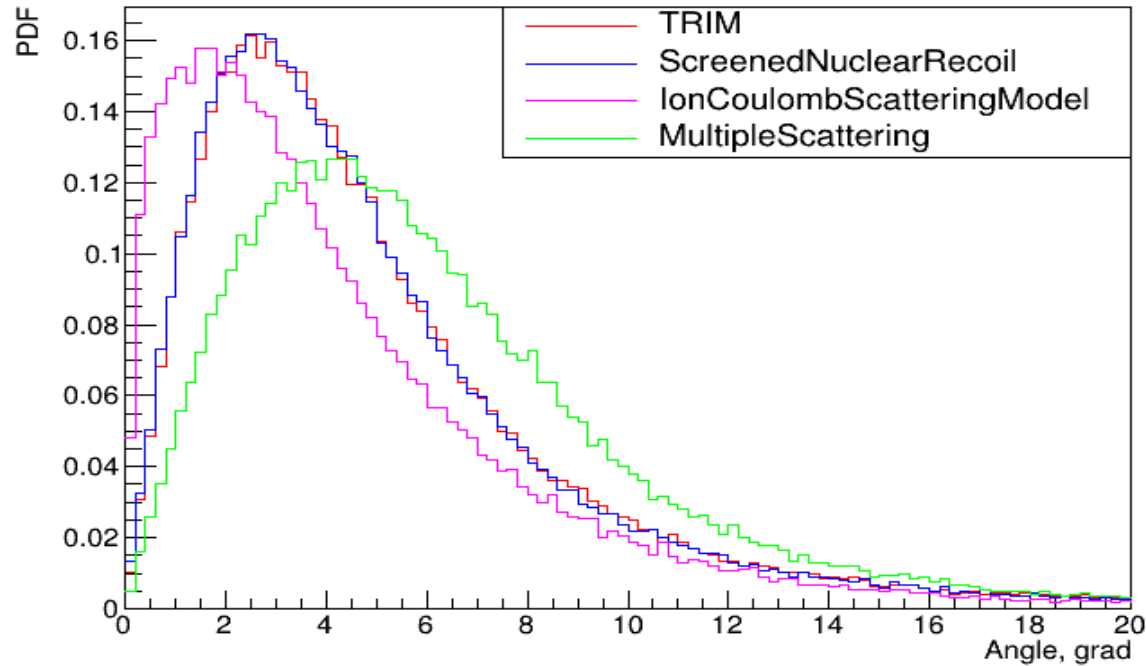
$$E_{CN}^* = E_{CN}^* - \Delta E_{CN}^*$$

$$\vec{p}_{CN}^{lab} = \vec{p}_{CN}^{lab} - (\vec{p}_n^{cm} + m_n * \vec{v}_{CN})$$

E_{CN}^*	Энергия возбуждения СЯ
Δ	Дефект масс
\vec{p}_{CN}^{lab}	Импульс СЯ в лаб. сист.
t	Температура ядра
T_n	Кин. энергия нейтрона
E_n^{bind}	Энергия связи нейтрона СЯ

Если $E_{CN}^* > E_n^{bind}$ - процесс испарения начинается заново, если $E_{CN}^* < E_n^{bind}$ - процесс испарения считается завершенным.

Методы расчета. Многократное рассеяние.



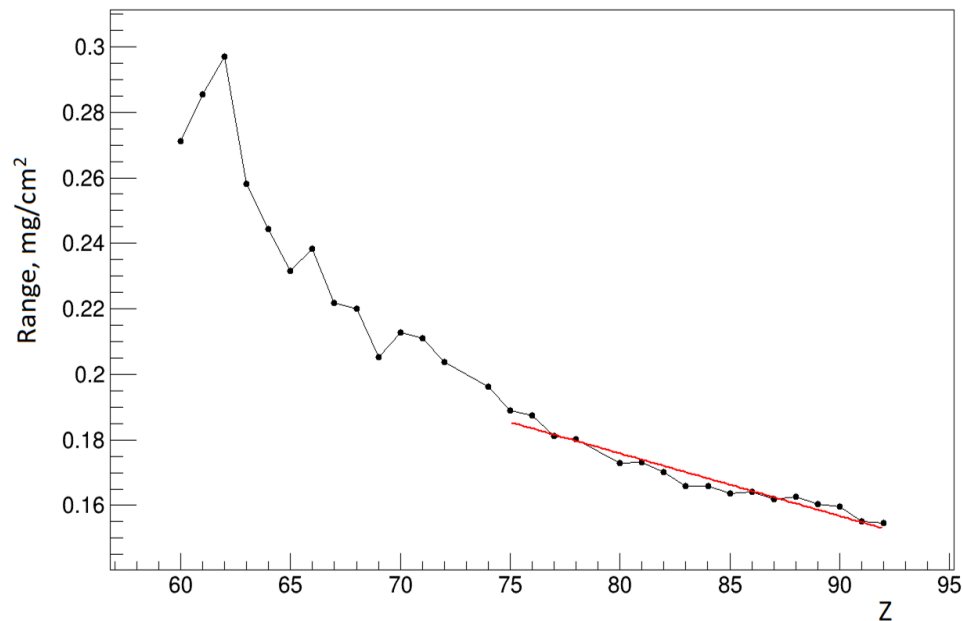
Распределение углов рассеяния ^{217}Th с
стартовой энергией 40 МэВ после прохождения

0,545 мкм Yb_2O_3

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \varphi\left(\frac{r}{a}\right),$$

где Z_1 и Z_2 - число протонов в ядрах рассеивающихся атомов
 e^2 - константа электромагнитного взаимодействия
 r - расстояние между ядрами
 φ - функция экранирования, используется функция Зиглера-Бирсака-Литтмарка (TRIM)

Методы расчета. Потери энергии.



Пример экстраполяции пробега по таблицам SRIM,
A = 287, E = 14 МэВ

$$\frac{dE}{dx} = 2\pi r_e^2 m c^2 n_{el} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{up}}{I^2} \right) - \beta^2 \left(1 + \frac{T_{up}}{T_{max}} \right) - \delta - \frac{2C_e}{Z} + S + F \right]$$

Используемая в Geant4 формула Бете-Блоха с различными поправками

Методы расчета. Траектории в магнитном поле

- Карты полей были рассчитаны инженерами Нева-Магнит
- Используются встроенные в GEANT4 методы численного интегрирования уравнений движения
- Выбрана одна из схем метода Рунге-Кутта – схема Дормунда-Принса
- GEANT4 позволяет настраивать точность интегрирования с помощью следующих параметров:

DeltaOneStep – примерная ошибка определения положения координаты частицы на шаге интегрирования

EpsilonMin – минимальная допустимая относительная ошибка интегрирования

EpsilonMax – максимальная допустимая относительная ошибка интегрирования

Сравнение результатов измерений и моделирования

Особенности настройки сепаратора DGFRS-2:

- Магнитная жесткость в обоих диполях должна быть выставлена одинаковой
- Первый квадруполь не влияет на размер изображения в фокальной плоскости, а только на эффективность
- Второй и третий квадруполь определяют размер изображения
- Соотношение оптимальных токов между двумя квадрупольями линейно

Для анализа экспериментальных данных написаны программы на основе фреймворка ROOT

