

Новый экспериментальный метод изучения кластерной структуры ядер с помощью активной мишени

НИЦ КИ - ПИЯФ, ОФВЭ, ЛБФ

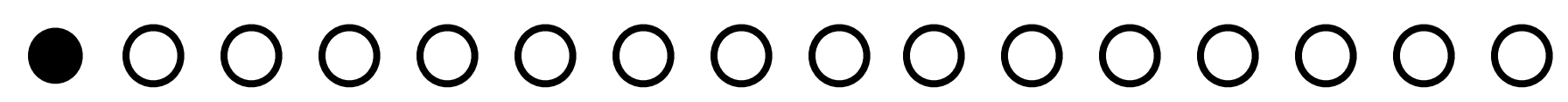
Арутюнова Анастасия

План доклада:

1. Подготовка эксперимента по комптоновскому рассеянию на водороде и дейтерии с использованием активной мишени (2024-2025 гг). Публикация ЭЧАЯ 2026. Тема диссертации была «Исследование комптоновского рассеяния на ядрах водорода и гелия с помощью активной мишени». (ИК COMPTON)
2. Исследование активной мишени (свойства газа, калибровка электроники, ...) (АСТАФ2 и АСТАМ)
3. Подготовка эксперимента по исследованию кластерной структуры ядер с помощью активной мишени (АСТАФ2 и АСТАМ). Предлагаемая тема диссертации: **«Исследование комптоновского рассеяния на ядрах водорода и дейтерия и кластерной структуры легких ядер с помощью активной мишени»**
4. Анализ данных тестового эксперимента в Майнце по рассеянию электронов с энергией 720 МэВ в газовой смеси He+4.3%N₂ (10 бар) с использованием активной мишени (прототип АСТАФ2)

Было 2 тестовых эксперимента с активной мишенью: 2017 год – рассеяние электронов на смеси He+4.3%N₂ (10 атм + 5 атм); 2019 год – рассеяние электронов на H₂ (1.25 атм)

5. Заключение, планы



Подготовка эксперимента по комптоновскому рассеянию с целью измерения поляризуемости нуклона

Поляризуемость — фундаментальная характеристика нуклона, характеризующая степень его деформации под действием внешнего электромагнитного поля.

Величины электрической (α) и магнитной (β) поляризуемостей могут быть определены с помощью измерения энергетической и угловой зависимостей дифференциального сечения комптоновского рассеяния фотонов на нуклоне.

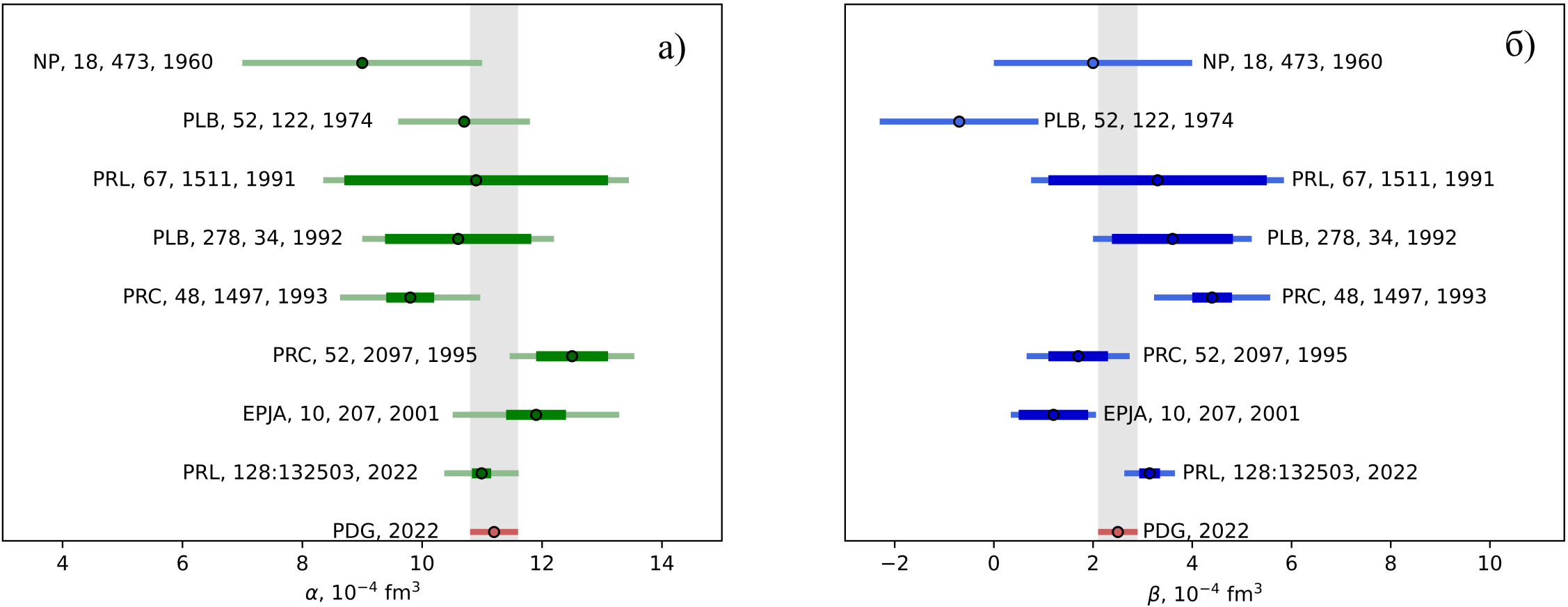


Рис. 1 а) Результаты экспериментов по измерению электрической поляризуемости протона; б) Результаты экспериментов по измерению магнитной поляризуемости протона. (Темным цветом показаны вклады статистических неопределенностей, а светлым полные — статистические и систематические ошибки).

Значения β последних (наиболее точных) экспериментов отличаются в 2-3 раза



Поляризуемость нуклона

Схема эксперимента:

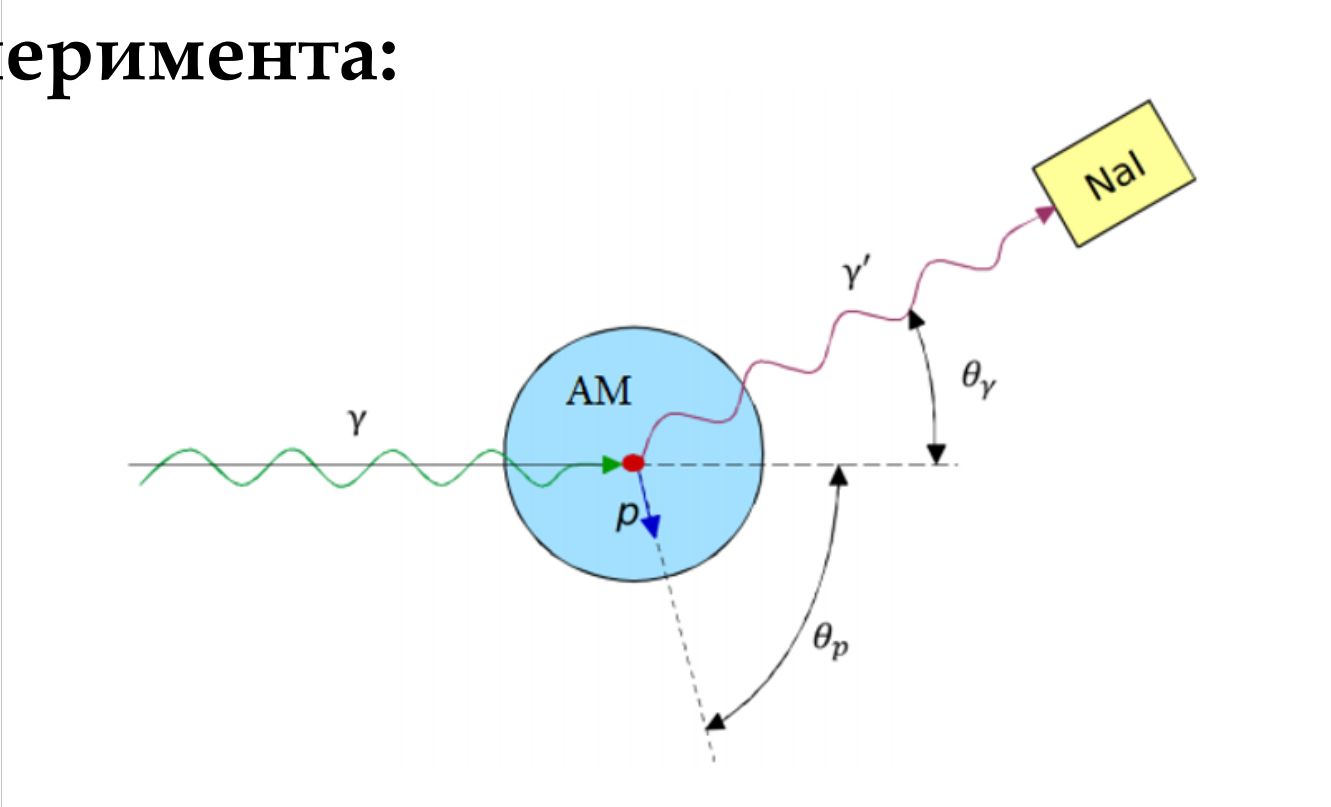


Рис. 2. Схема планируемого эксперимента по измерению поляризуемости нуклонов

Таблица 1. Статистические и систематические ошибки при измерении α и β .

	$\Delta\alpha \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$	$\Delta\beta \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$
Ошибка при статистике $8 \cdot 10^6$ событий	0.07	0.11
Отклонение при ошибке по углу 0.3°	0.05	0.11
Отклонение при ошибке по энергии 1.4 МэВ	0.07	0.07
Отклонение при ошибке в измерении энергии 2%	0.007	0.008

Mainz, 2022:

$\Delta\alpha = [0.16_{stat} \pm 0.60_{syst+mod}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

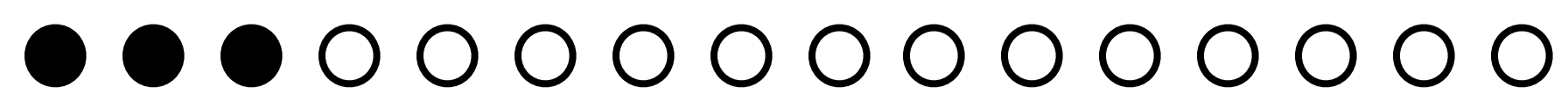
$\Delta\beta = [0.21_{stat} \pm 0.47_{syst+mod}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

Активная мишень:

$\Delta\alpha = [0.07_{stat} \pm 0.11_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

$\Delta\beta = [0.11_{stat} \pm 0.15_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

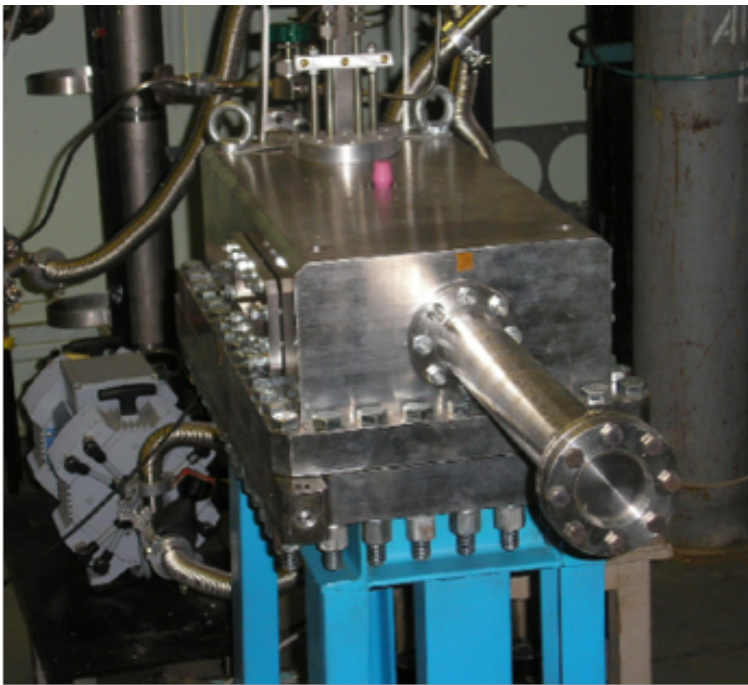
=> новый метод измерения поляризуемости протона показывает большую точность при проведении эксперимента



Моделирование камеры COMPTON

С помощью программы Geant4 смоделирован спектр тормозного излучения от электронов с энергией 100 МэВ, падающих на вольфрамовую мишень-радиатор, толщиной 1 мм.

А также построена компьютерная Монте-Карло модель ИК COMPTON, учитывающая физические процессы формирования сигнала частицей отдачи, а также сопутствующие шумы (электронический и шум, наведенный пучком фотонов).



ИК COMPTON

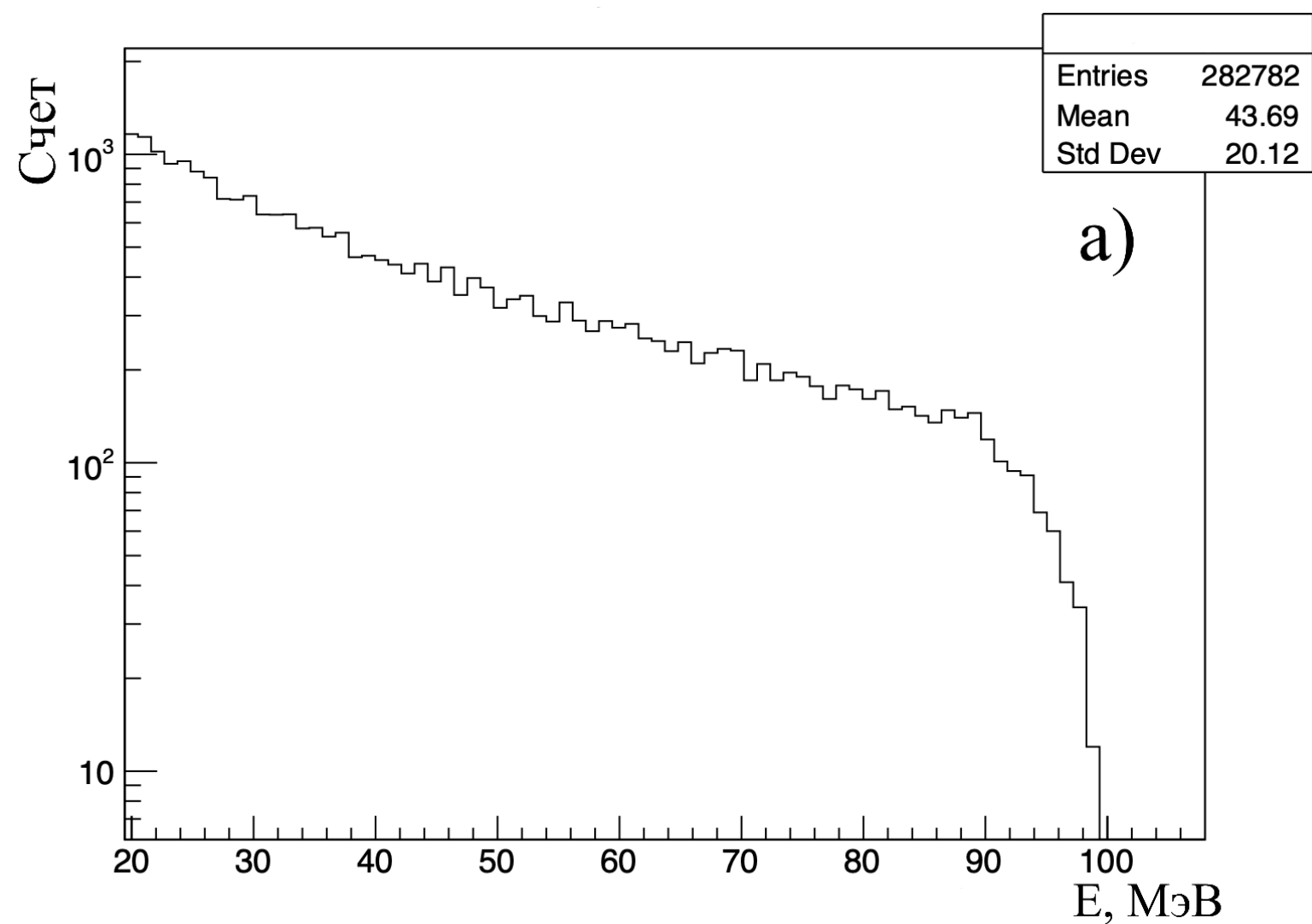


Рис. 3. Спектр тормозного излучения от пучка электронов с энергией 100 МэВ

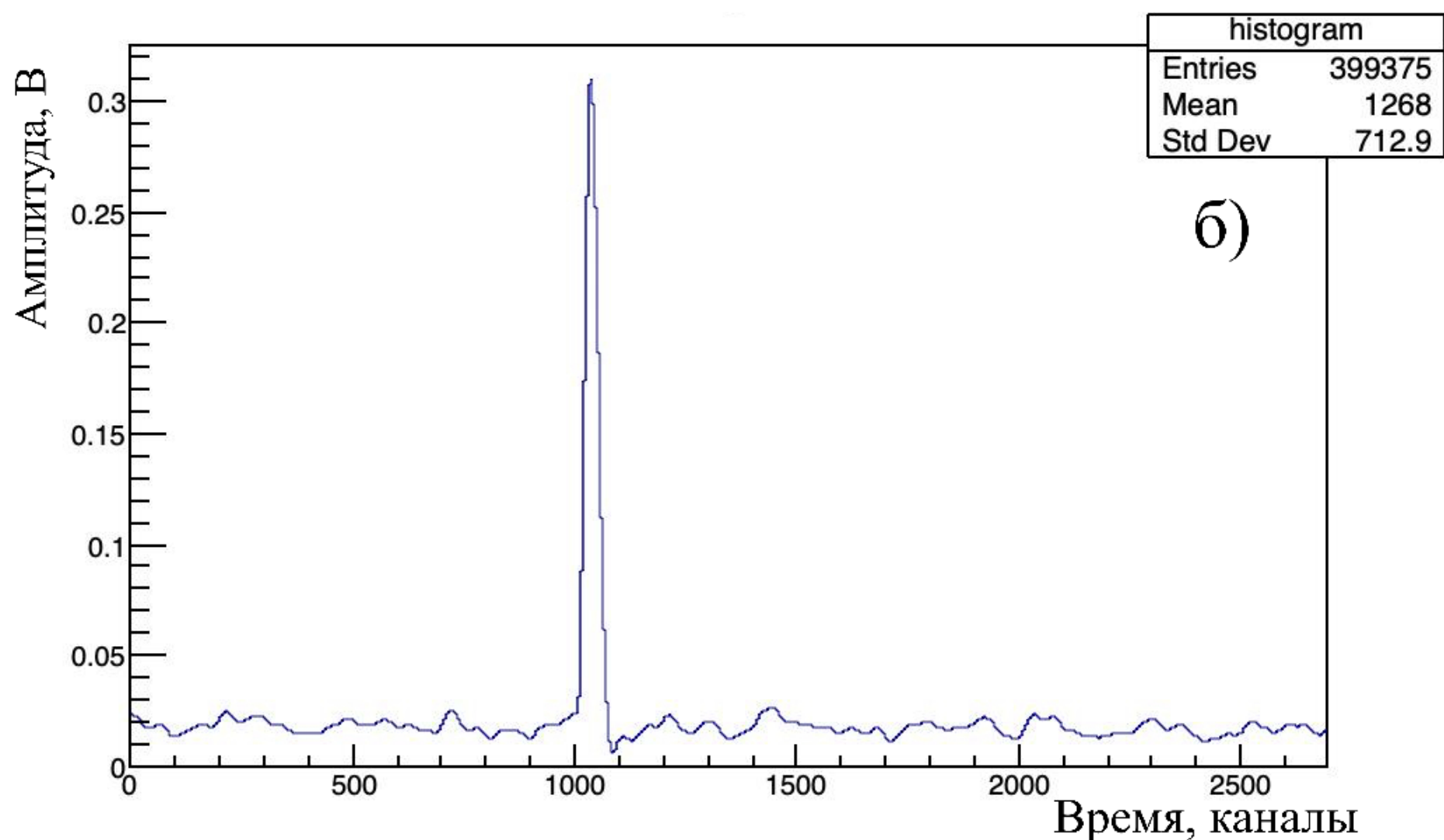
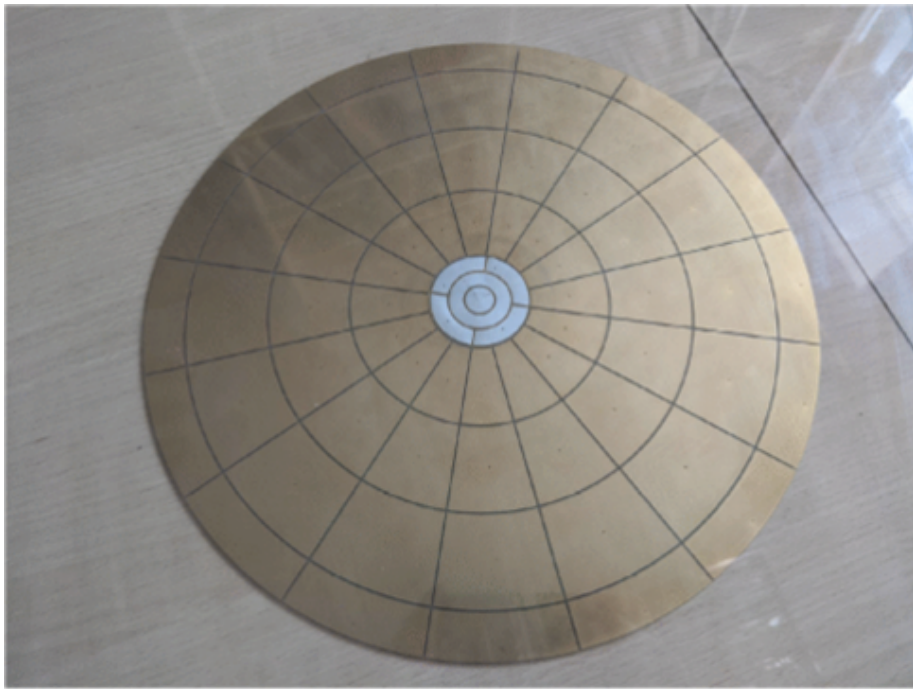


Рис. 4. Пример сигнала от протона отдачи с энергией 5 МэВ с шумами от электроники* и налетающего пучка (интенсивность — $2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$), временной канал — 4 нс

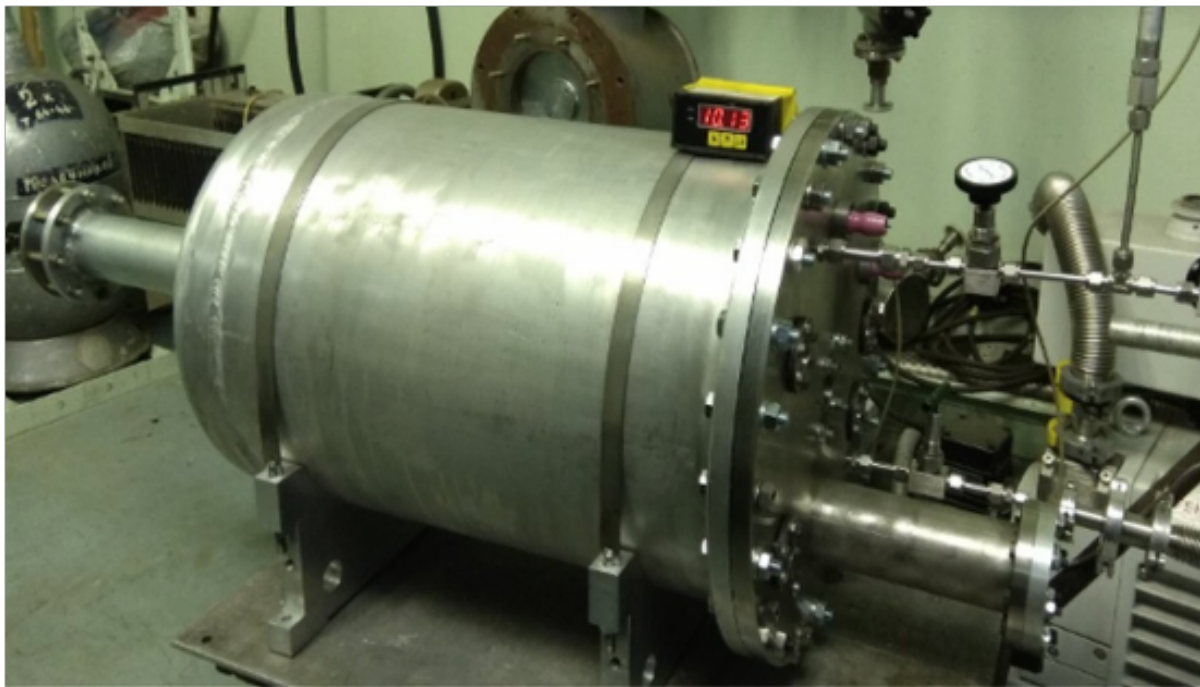
*шумы ИК АСТАФ из эксперимента по $e^- \text{He}$ -рассеянию ($E_e=720 \text{ МэВ}$)

Исследование активной мишени (свойства газа, калибровка электроники...)



Альфа-источник Am-241
Калибровка электроники
Были созданы считывающие и анализирующие программы
Чистота газа
Скорость дрейфа
Относительные энергии образования

Рис. 5. Альфа-источник расположен на катоде. Разность времен прихода сигналов на катоде и аноде позволяет измерить скорость дрейфа.



ИК АСТАФ2

В Ar при давлении 0.34 атм с течением времени из стенок камеры выделялся воздух (~3%) и наблюдалось значительное повышение скорости дрейфа электронов (в чистом аргоне при $E/p = 0.2$: $V = 0.28$ см/мкс). При высоком давлении значения совпадают. При давлении 1.2 атм и $E/p = 0.1$ скорость $V = 0.28$ см/мкс

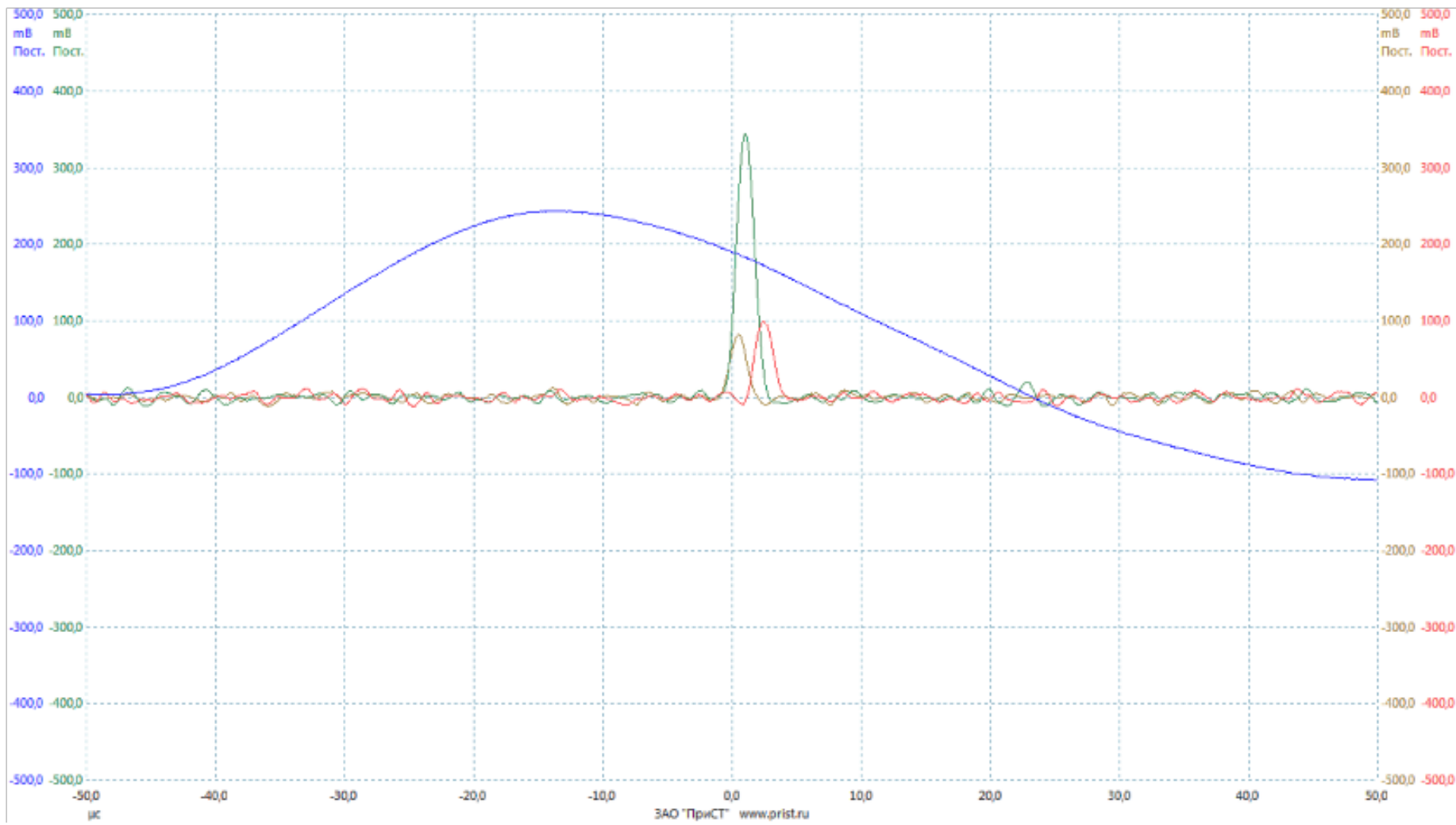


Рис. 6. Пример сигнала от альфа-частицы

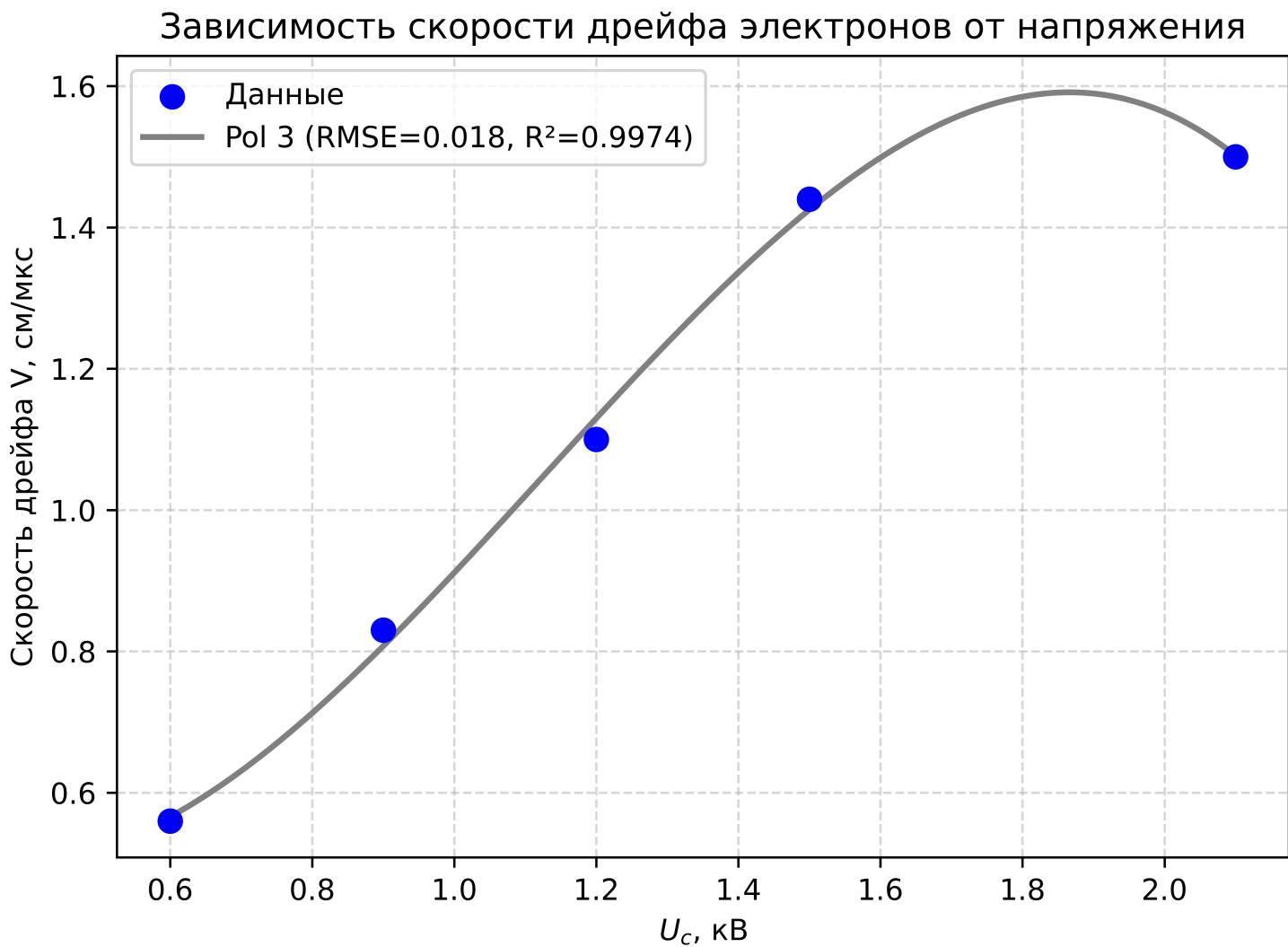


Рис. 7. Зависимость скорости дрейфа электронов от напряжения на катоде



Результаты

- Выполнено исследование систематических и статистических ошибок. Результат исследования показал преимущество эксперимента с использованием активной мишени в определении поляризуемости;
- Было выполнено исследование электроники с помощью генератора импульсов;
- Измерены скорости дрейфа электронов в Ar, He и He+5%N₂. В Ar обнаружен эффект увеличения скорости дрейфа (в 4 раза) при наличии 3% воздуха. В чистых аргоне и гелии результаты измерения совпадают с известными данными;
- Была проведена калибровка энергетической шкалы с помощью альфа-источника;
- Были измерены относительные энергии на образование электрон-ионных пар (w) в Ar и He+5%N₂: w = 27.7 эВ и w = 36 эВ, соответственно;
- Был исследован эффект прилипания к кислороду в различных газах.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА
2026. Т. 57, вып. 3. С. 396–405

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА АКТИВНОЙ МИШЕНИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЕЙ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

А. Ю. Арутюнова^{1,}, А. А. Дзюба^{1,2}, Е. М. Маев¹*

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199034, Россия

Исследование рассеяния фотонов (комптоновского рассеяния) на нуклонах позволяет определить одно из фундаментальных свойств нуклона — поляризуемость, которая имеет две составляющие: электрическую (α) и магнитную (β), характеризующие отклик нуклона на действие внешних электрических и магнитных полей. Поляризуемости протона и нейтрона можно определить при измерении дифференциальных сечений комптоновского рассеяния на водороде (дейтерии, гелии) в зависимости от энергии и угла рассеяния фотонов. В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ разработан новый метод исследования этого процесса с использованием активной мишени, которая одновременно является газовой мишенью и детектором частиц отдачи.

На основе полученных результатов была опубликована статья в ЭЧАЯ

Подготовка эксперимента по исследованию кластерной структуры ядер с помощью активной мишени

Предлагается провести цикл исследований и измерить дифференциальные сечения выбивания протонов и кластеров (cl) (дейтронов и ядер гелия) на различных газовых мишенях (He, CH₄, N₂, Ne, Ar, Kr, Xe) при разных энергиях протонного пучка.

Кластеры – это образование в ядре малонуклонных систем (в основном дейтронов и альфа-частиц). При неупругом взаимодействии частиц пучка с ядрами мишени возможен процесс выщипывания таких кластеров.

Возможный пучок e/p

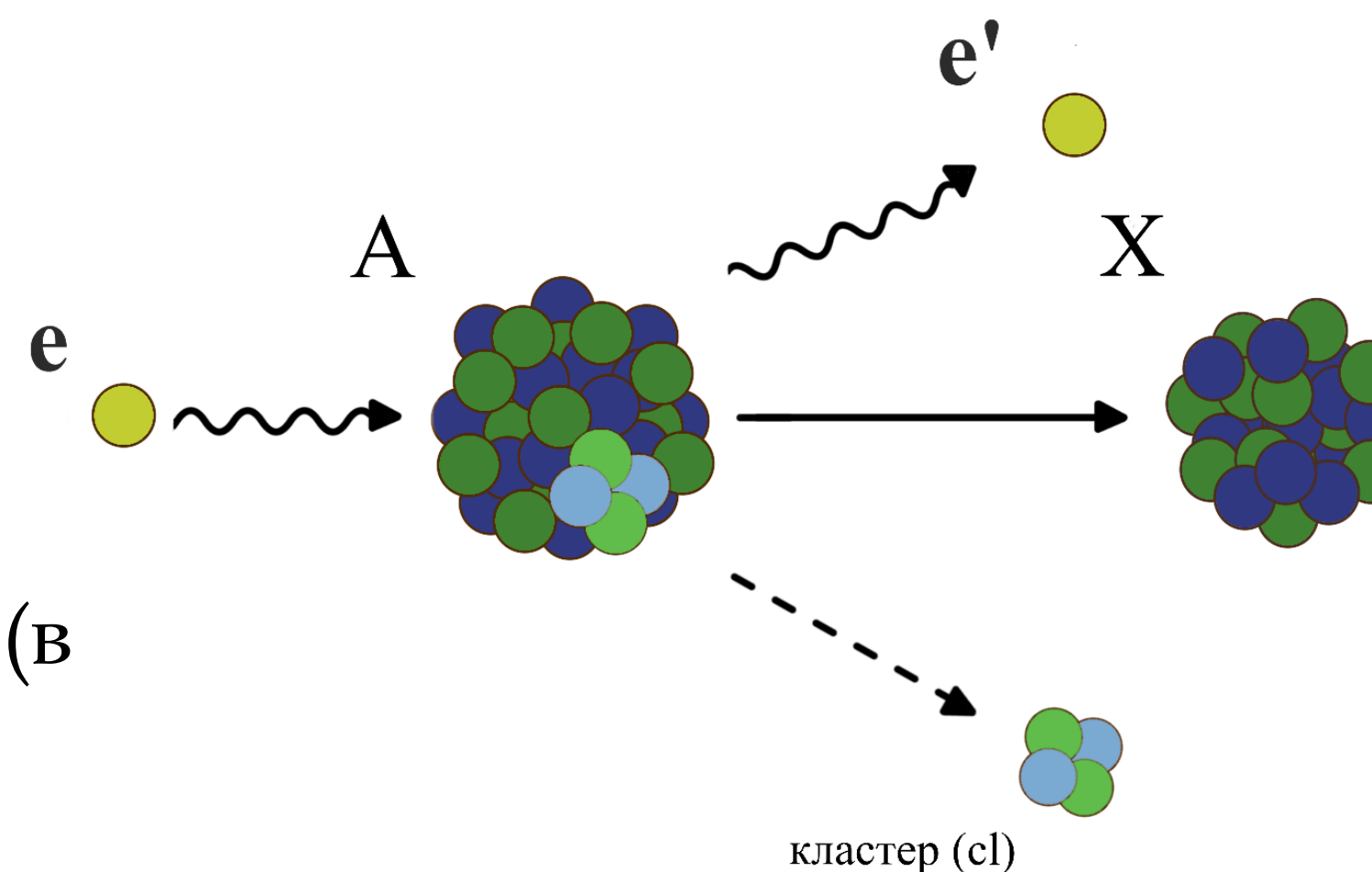


Рис. 8. Реакция кластеризации



Характеристики активной мишени

- Рабочий газ: H_2 , D_2 , He, CH_4 , N_2 , Ne, Ar, Cr, Xe;
- Давление: 0.1 – 25 бар;
- Высокая (~100%) эффективность регистрации с энергетическим разрешением 20–30 кэВ;
- Регистрация частиц отдачи в энергетическом диапазоне 0.5–20 МэВ и 4 π геометрии;
- Возможность регистрации и идентификации различных типов частиц отдачи: (p, d, 3H , 3He , 4He) и др. ядер отдачи;
- Измерение координаты точки взаимодействия с точностью 0.5 мм;
- Определение полярного угла частицы отдачи с точностью порядка 10 мрад;
- Определение азимутального угла с точностью 6°;
- Временное разрешение 40–60 нс.

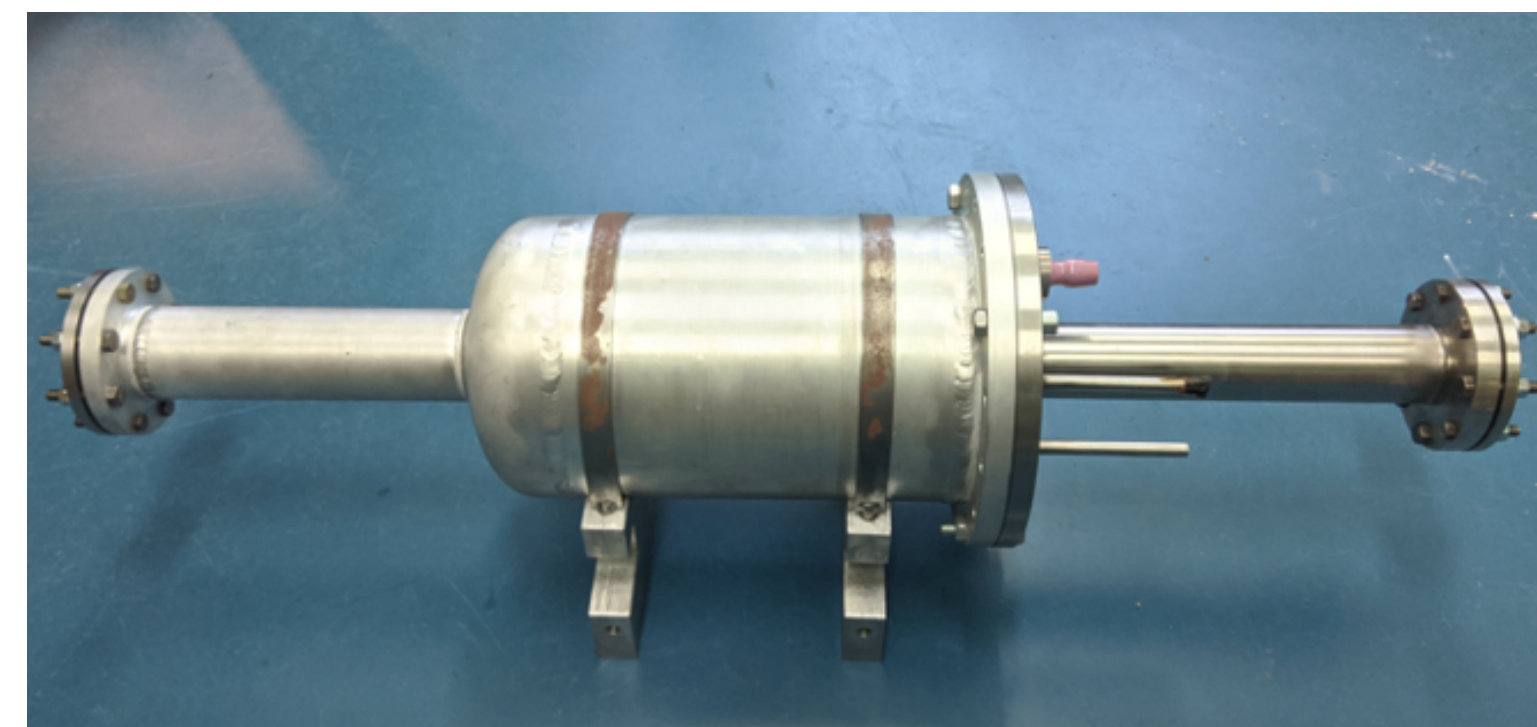


Рис. 9. Ионизационная камера АСТАМ

- Объем 10 л
- Рабочее давление 25 бар

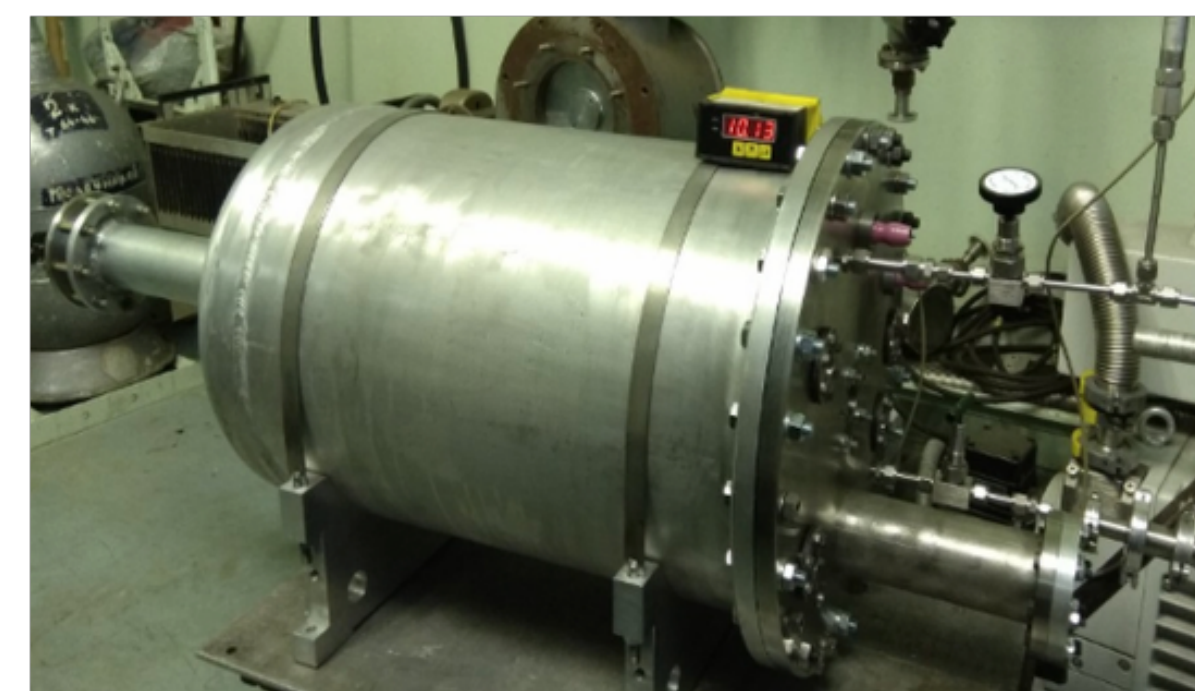


Рис. 10. Ионизационная камера АСТАФ2

- Объем 80 л
- Рабочее давление 10 бар

Подготовка эксперимента по исследованию кластерной структуры ядер с помощью активной мишени

Тестовый эксперимент по рассеянию электронов на гелии на прототипе АСТАФ (Майнц, Германия) в смеси He+4%N2 при давлении 10 и 5 атм на 720 МэВ электронном пучке ускорителя МАМІ в 2017 году.



Рис. 11. Установка прототипа АСТАФ2

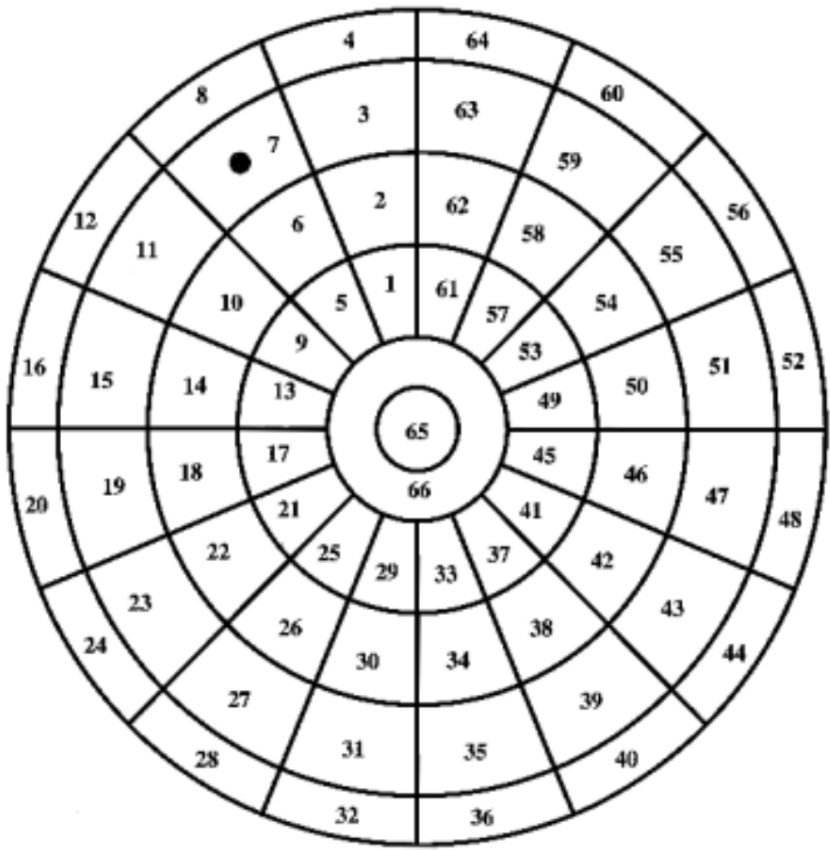


Рис. 12. Анодная плоскость прототипа АСТАФ2

R1	R2	R3	R4	R5	R6
11	23	45	67	89	100

R, mm

Сегментация анодных плоскостей позволит получить энергетические корреляции, которые в свою очередь позволят определить типы частиц отдачи

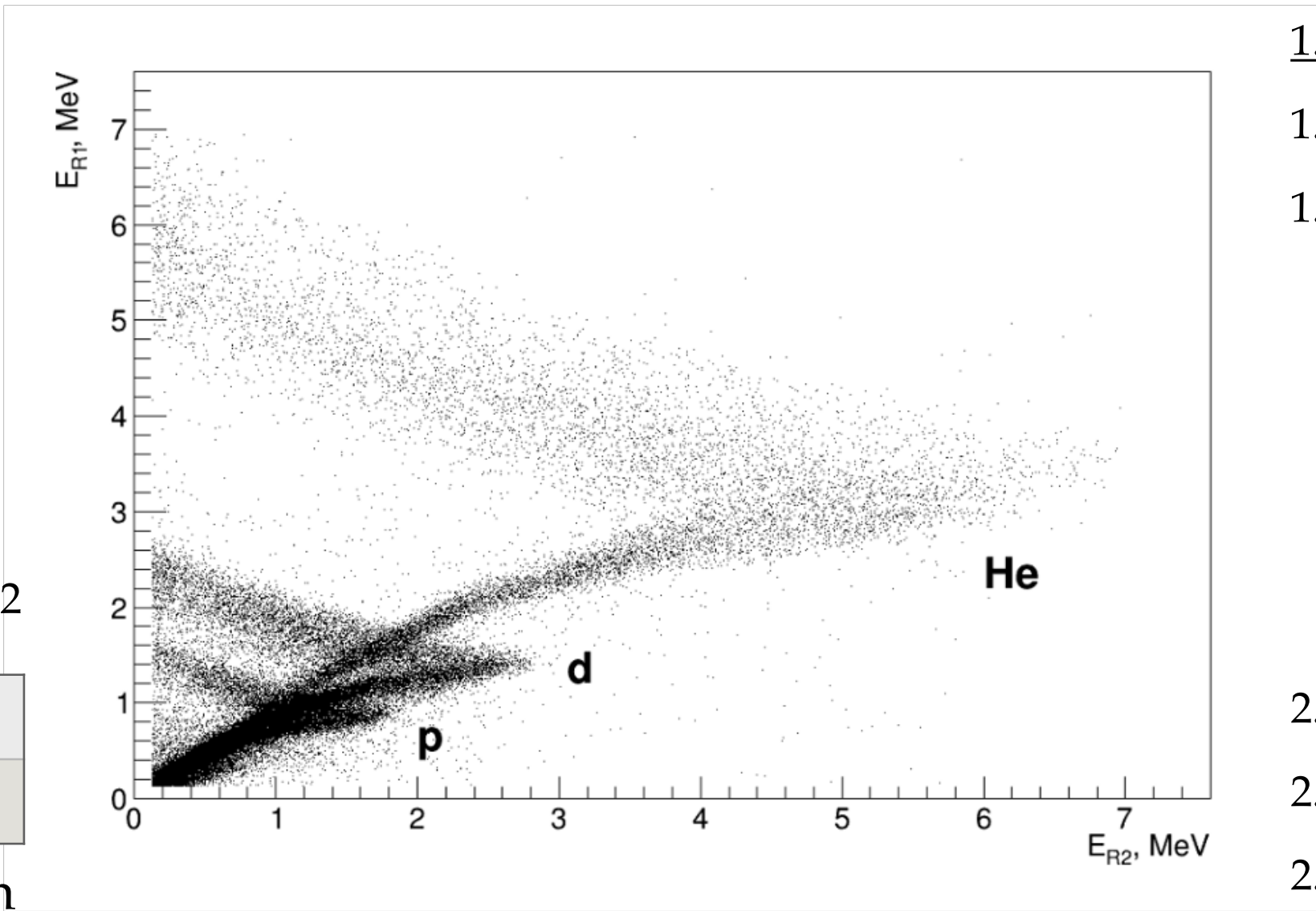


Рис. 13. Корреляция между энергиями, оставленными энергиями на соседних анодных кольцах.

1. Рассеяние электронов на гелии
1.a. Упругое рассеяние $e + He \rightarrow e' + He'$
1.б. Неупругое рассеяние
$$e + He \rightarrow e' + d + d$$
$$e + He \rightarrow e' + {}^3He + n$$
$$e + He \rightarrow e' + t + p$$
$$e + He \rightarrow e' + p + p + n + n$$
2. Рассеяние электронов на азоте
2.a. Упругое рассеяние $e + N_2 \rightarrow e' + N'_2$
2.б. Неупругое рассеяние
$$e + {}^{14}N \rightarrow e' + \alpha + {}^{10}B$$
$$e + {}^{14}N \rightarrow e' + d + {}^{12}C$$
$$e + {}^{14}N \rightarrow e' + p + {}^{13}C$$

Идея разделения кластеров

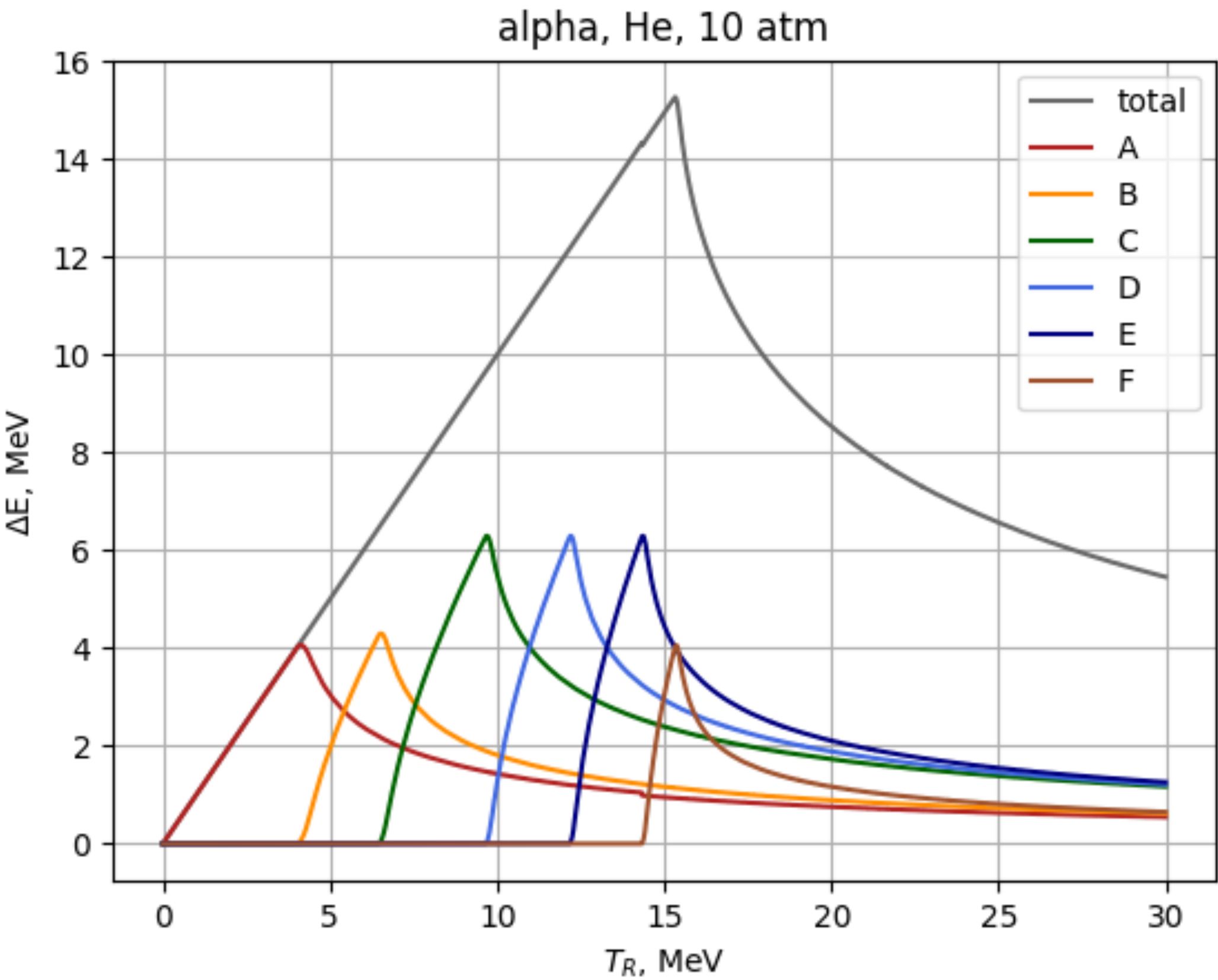


Рис. 14. Зависимость энергии, оставленной частицей на кольцах анодной плоскости, от энергии частицы отдачи

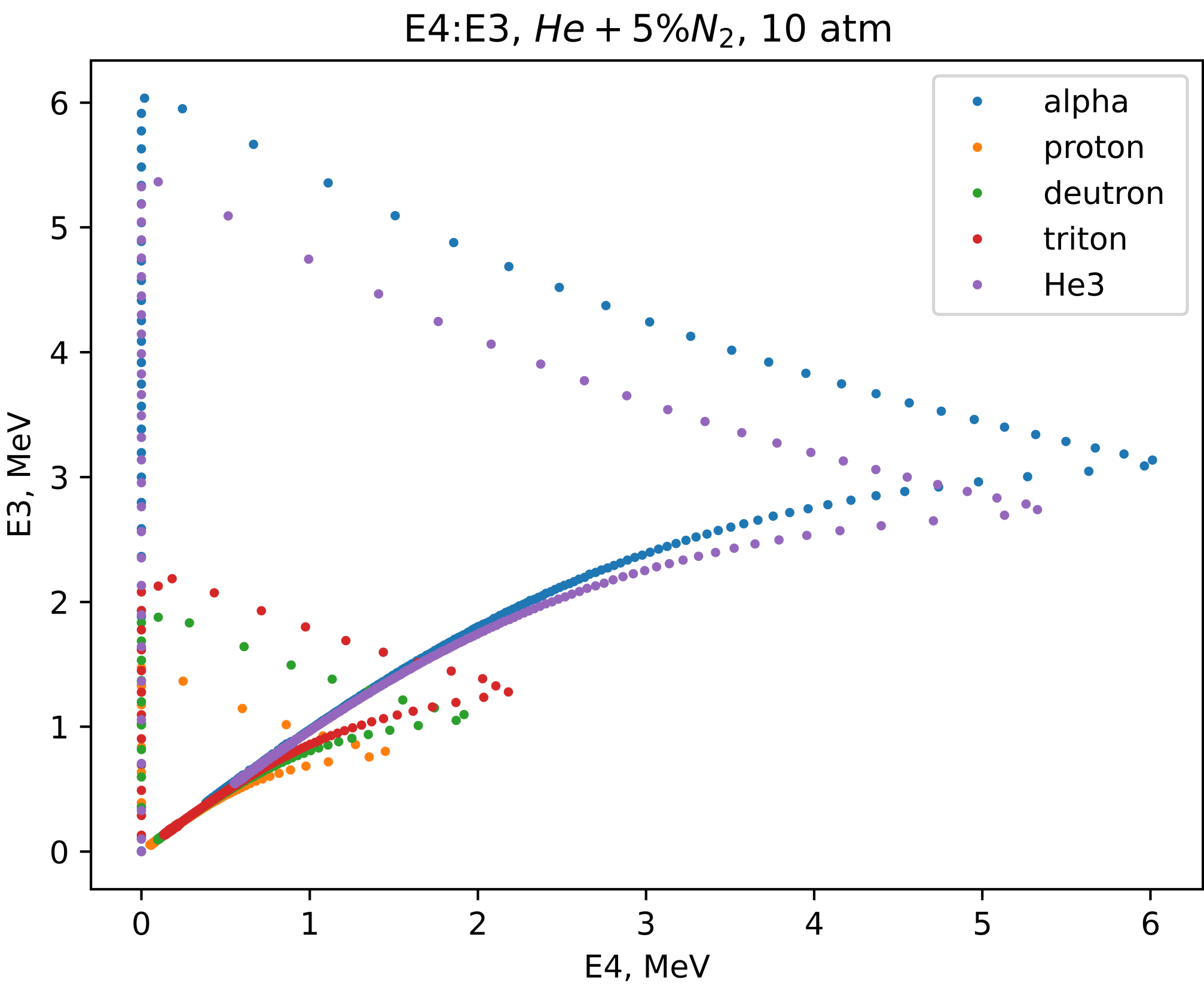


Рис. 15. Зависимость энергии, оставленной частицей на кольцах анодной плоскости, от типа частицы отдачи

●●●●●●●●●●○○○○○

Анализ тестового эксперимента

Расчет дифференциального сечения рассеяния на гелии:

$$\tau = \frac{Q^2}{4M^2}$$
$$G = \exp\left(-\frac{Q_{fm^{-2}}^2 \cdot R_{He}^2}{6}\right)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2 \cos^2(\frac{\theta}{2})}{4E^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2E}{M} \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right) \cdot \left[\frac{G^2}{1 + \tau} \right]$$

Абсолютная нормировка сечений исследуемых реакций будет произведена на сечение упругого рассеяния электронов на гелии, которое хорошо известно теоретически

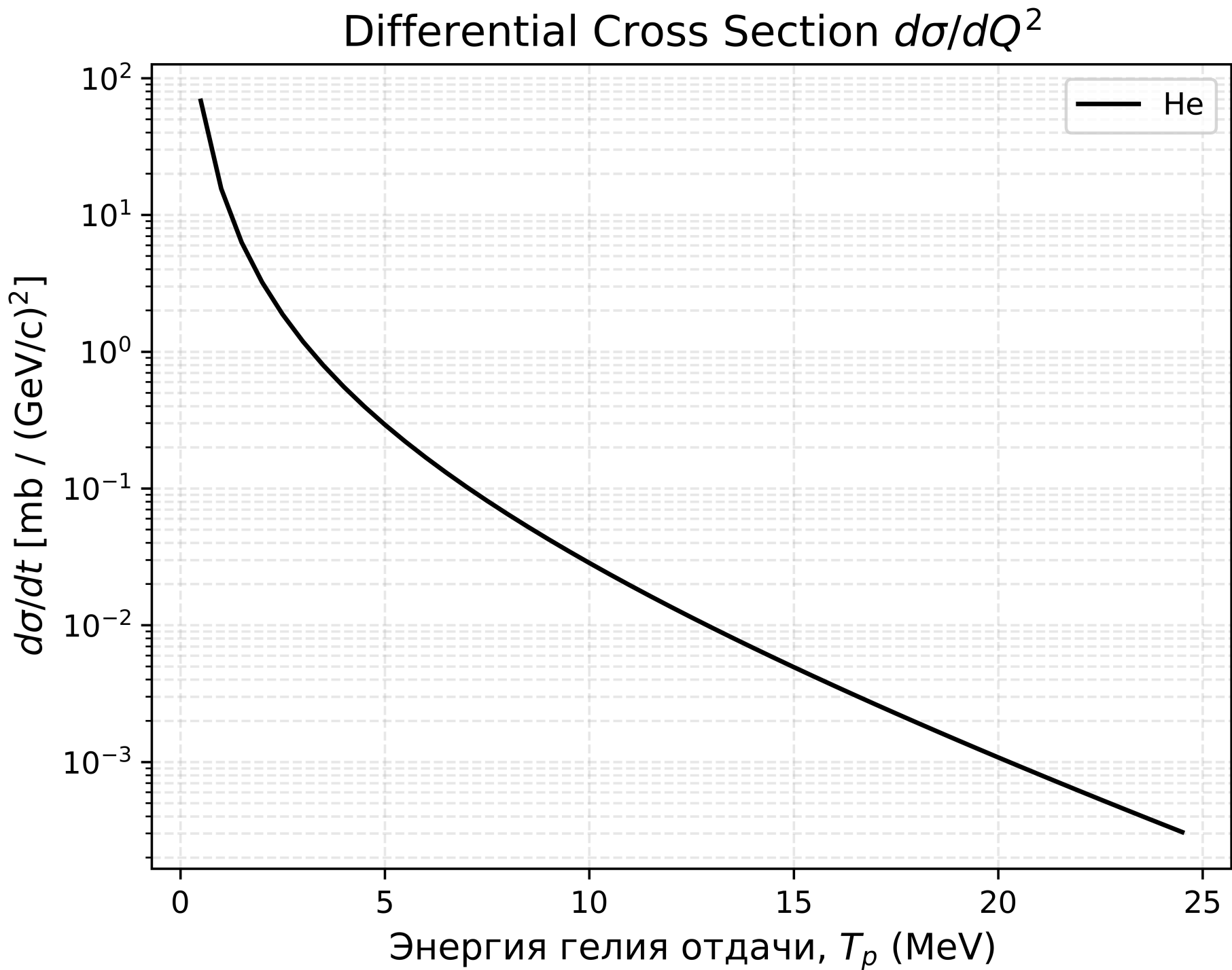


Рис. 16. Дифференциальное сечение упругого рассеяния

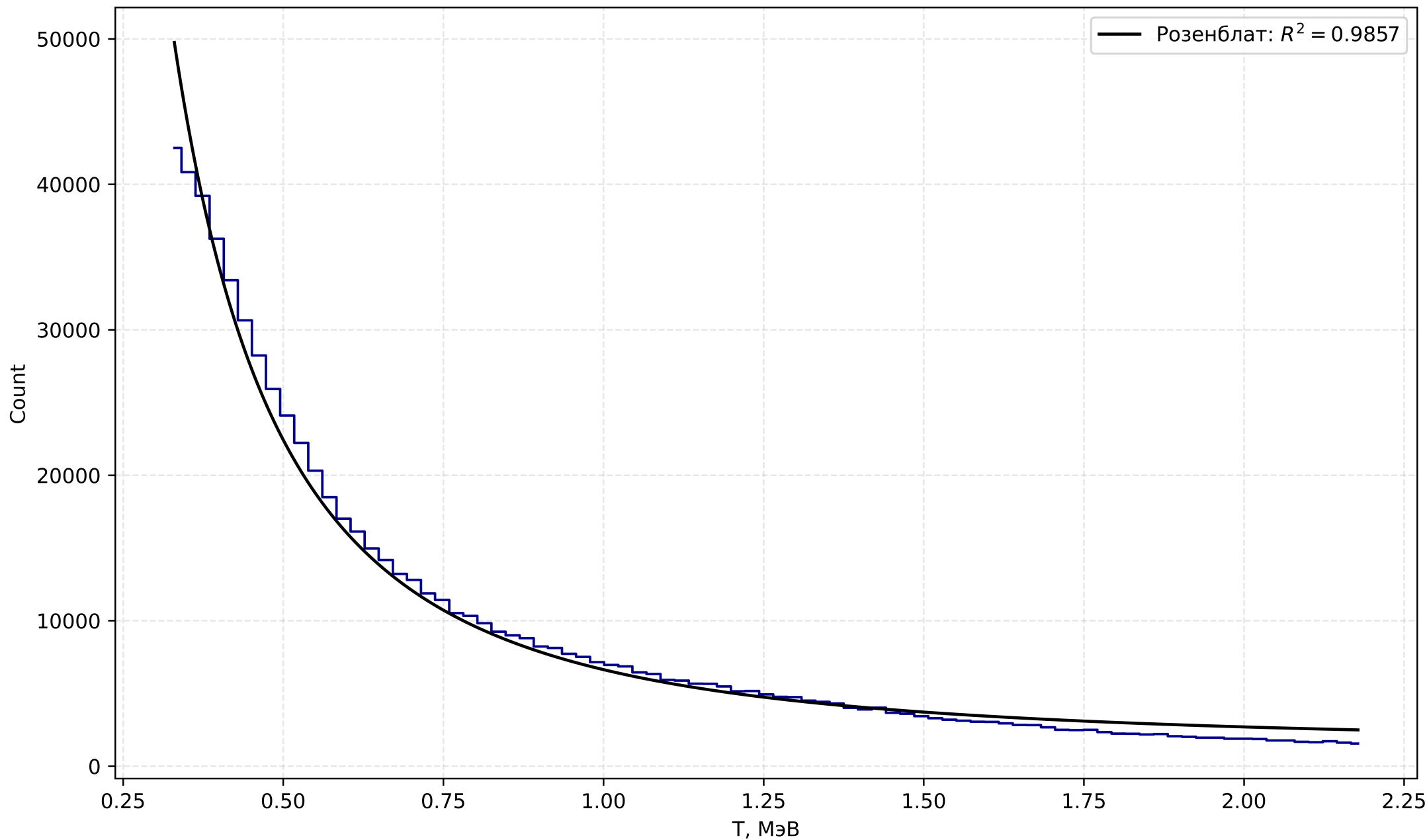


Рис. 17. Энергетический спектр на центральном аноде – сечение упругого рассеяния при малых энергиях. Хорошо описывается теоретической кривой для упругого рассеяния.

Отклонение – примесь неупругих событий.

Анализ тестового эксперимента

Определение дифференциального сечения неупругого рассеяния

1. Отбор по энергии

He+4%N₂; давление 10/5 атм;
720 МэВ электронный пучок;
MAMI, 2017 г.

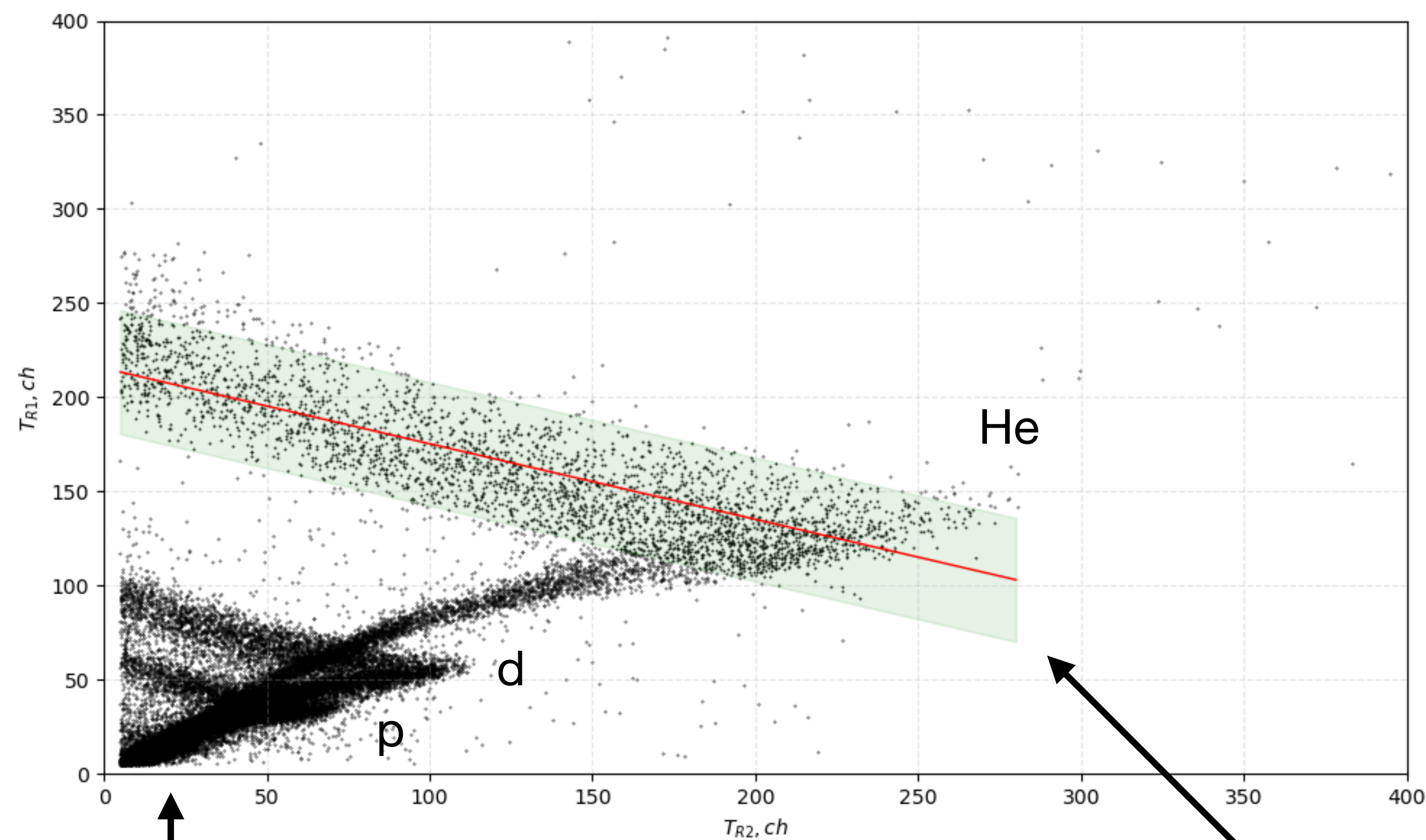


Рис. 18. Корреляция энергий, оставленных частицей
отдачи на соседних анодах. Ц.к. 22 кэВ

События неупругого рассеяния

События упругого рассеяния на 4He,
по которым будет проведена нормировка

2. Отбор по углу

Еще один критерий для отбора упругого рассеяния -
переменная длительности сигнала => позволяет
определить угол рассеяния и сравнить с
кинематическим, который жестко связан при
упругом рассеянии с энергией

Анализ тестового эксперимента

Отбор событий с дейтроном

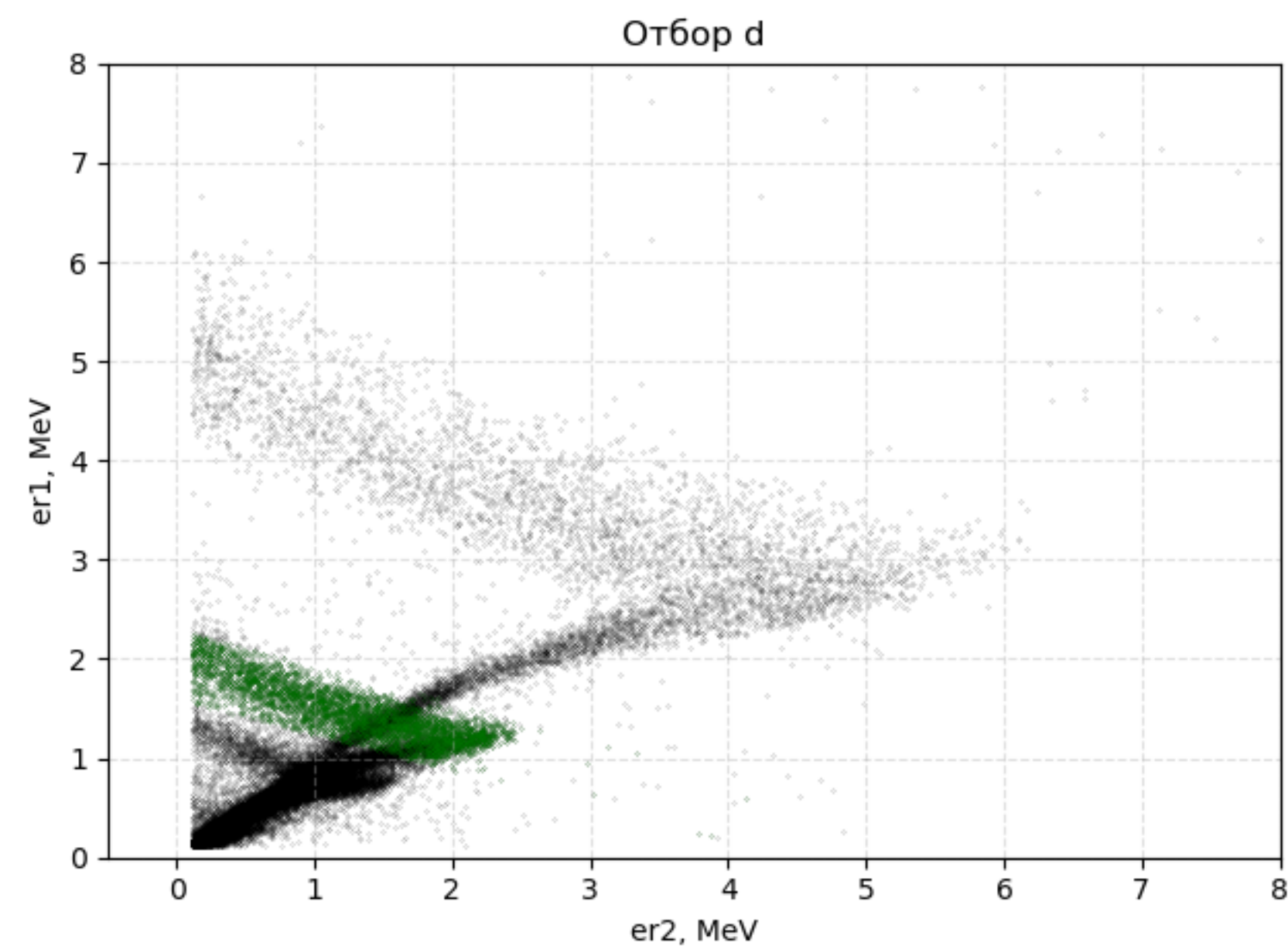


Рис. 19. Отобранные события с дейтроном

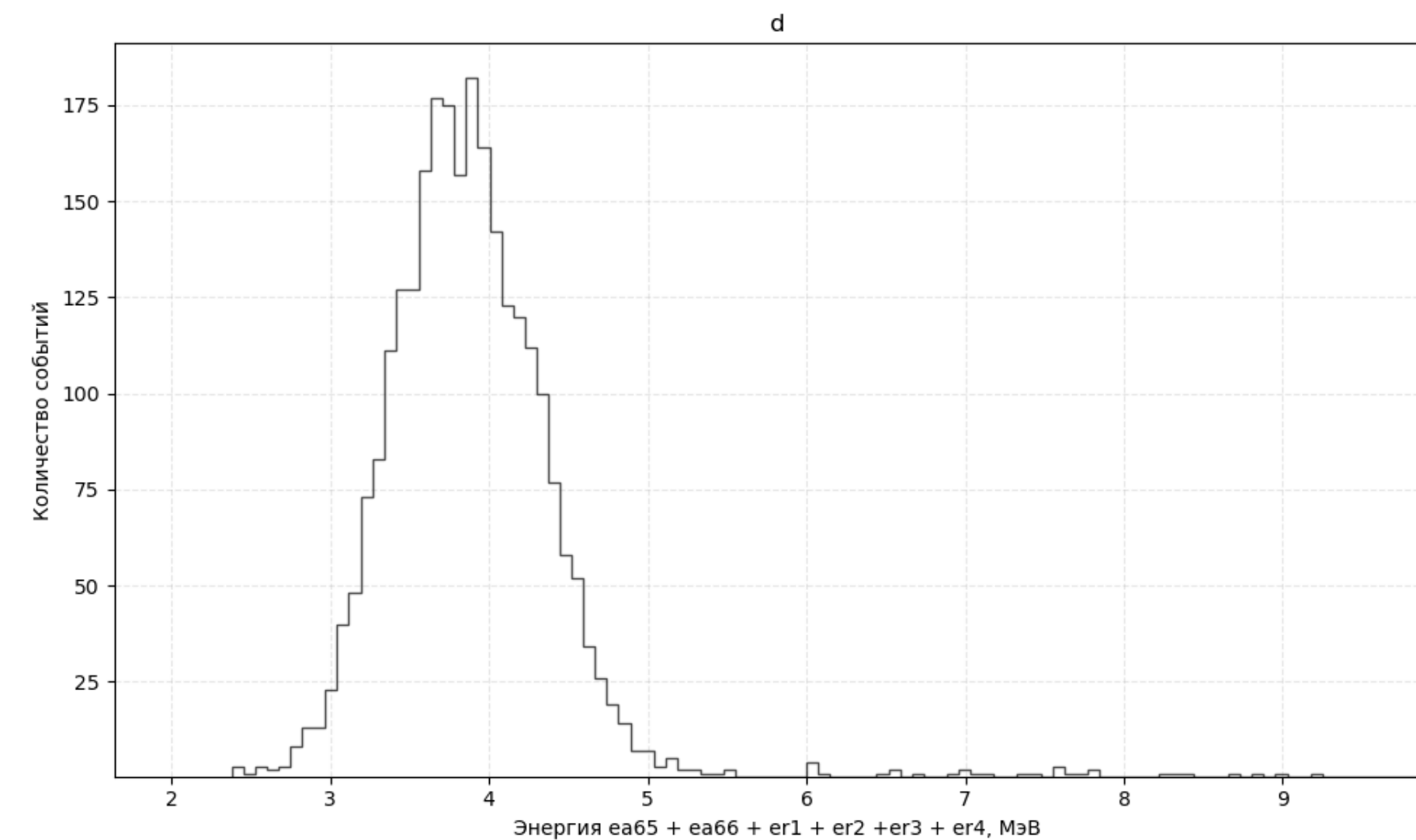


Рис. 20. Энергетический спектр событий с дейтроном

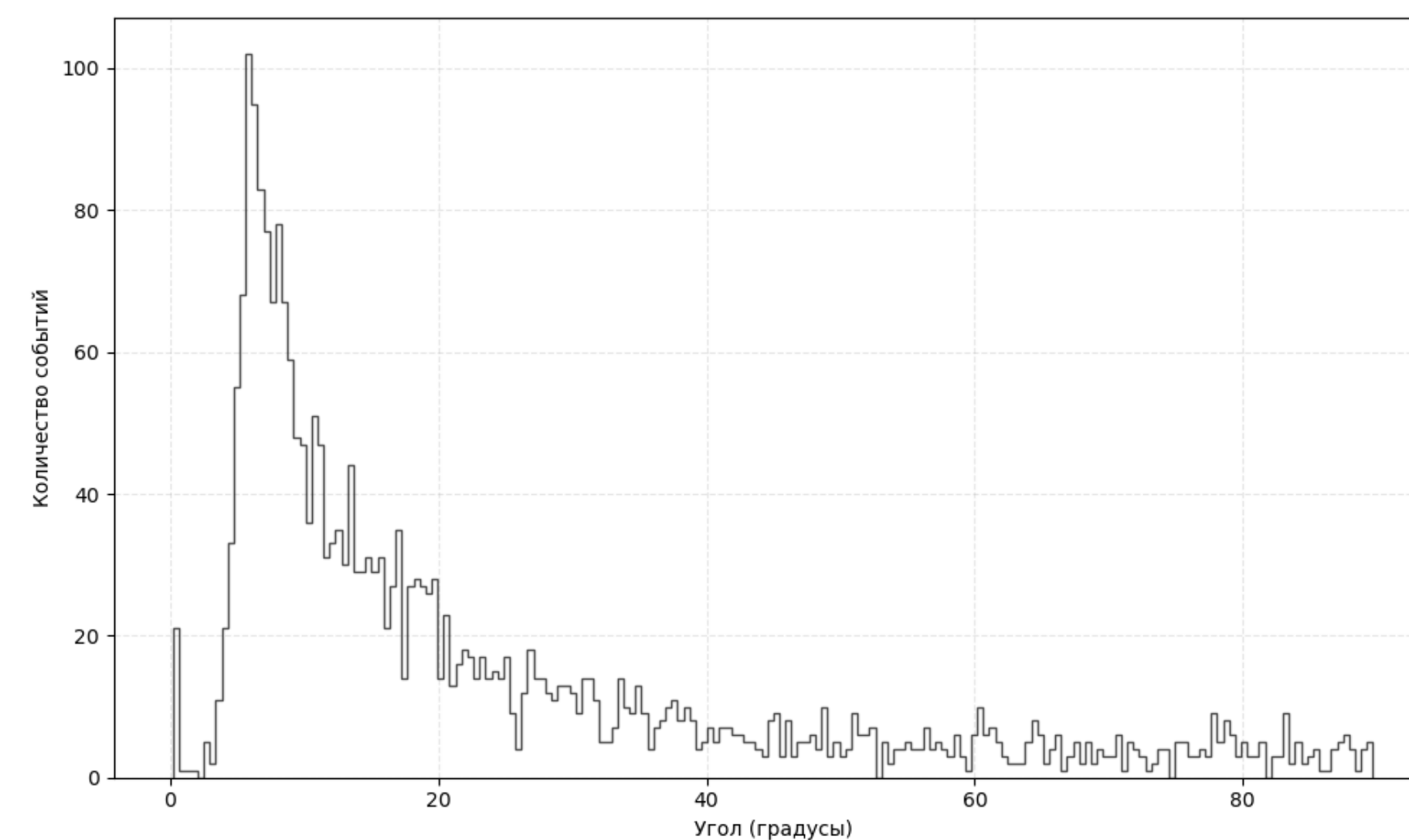


Рис. 21. Угловой спектр событий с дейтроном из переменной длительности сигнала и геометрии анодной плоскости

Предлагаемая экспериментальная установка

Входной трекер – многопроволочные пропорциональные камеры (МППК 1 и 2)

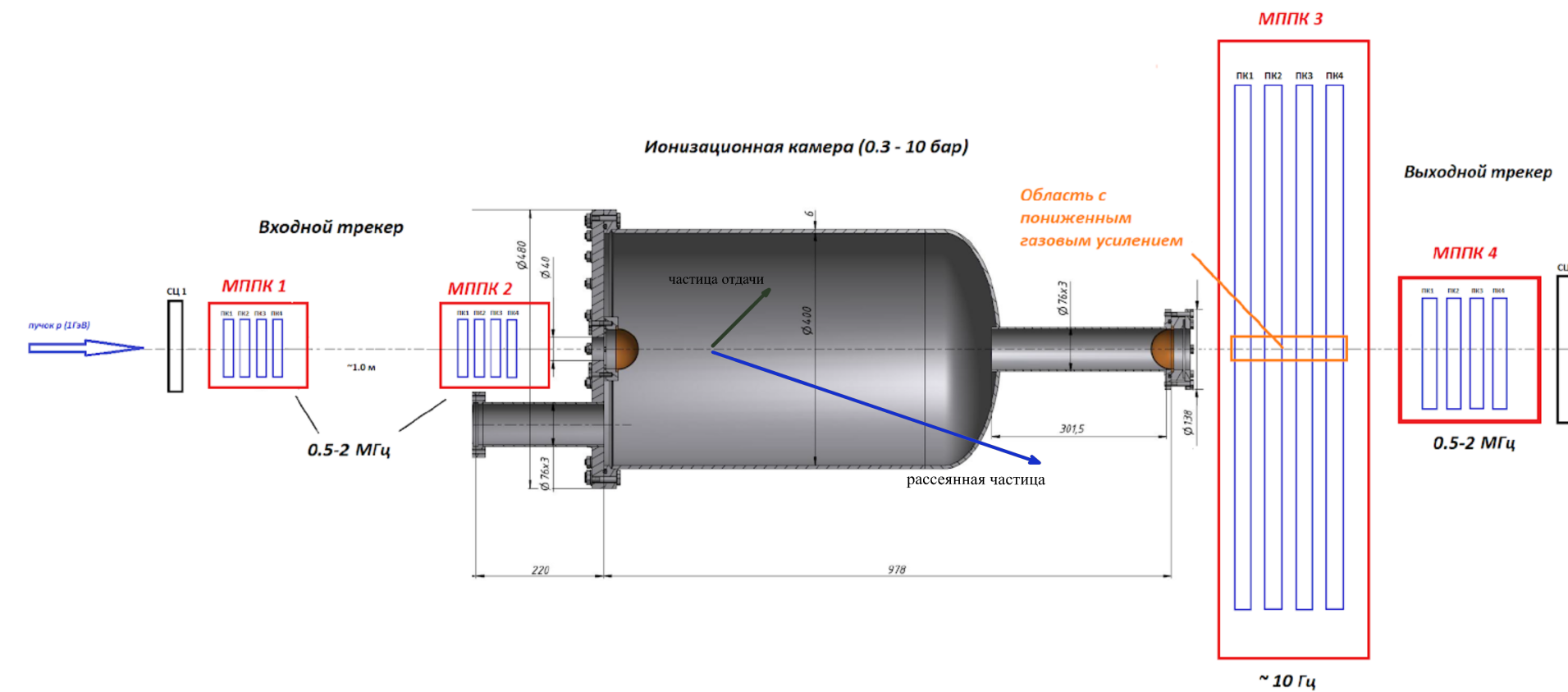


Рис. 22. Предполагаемая экспериментальная установка

В центре — ионизационная камера для регистрации ядер отдачи и вылетающих из ядра кластеров (активная мишень).

На входе и выходе протонного пучка - сцинтилляционные счетчики (СЦ 1 и 2).

Выходной трекер – МППК 3 и 4, которые служат для регистрации рассеянных частиц пучка.

24 канала FADC для эксперимента (электроника)
и электроника для пропорциональных камер

АСТАМ

Гелиевая ионизационная камера АСТАМ создавалась для работы в качестве активной мишени, для регистрации ядер отдачи в процессе рассеяния гамма-квантов на ядрах гелия.

- Корпус камеры: алюминиевый сплав АМг5
- Толщина стенок камеры: 8 мм
- Длина корпуса: ~ 400 мм
- Внутренний диаметр 184 мм
- Полный объем камеры: 10 л
- Рабочее давление: <25 атм
- Расстояние катод-сетки 210 мм

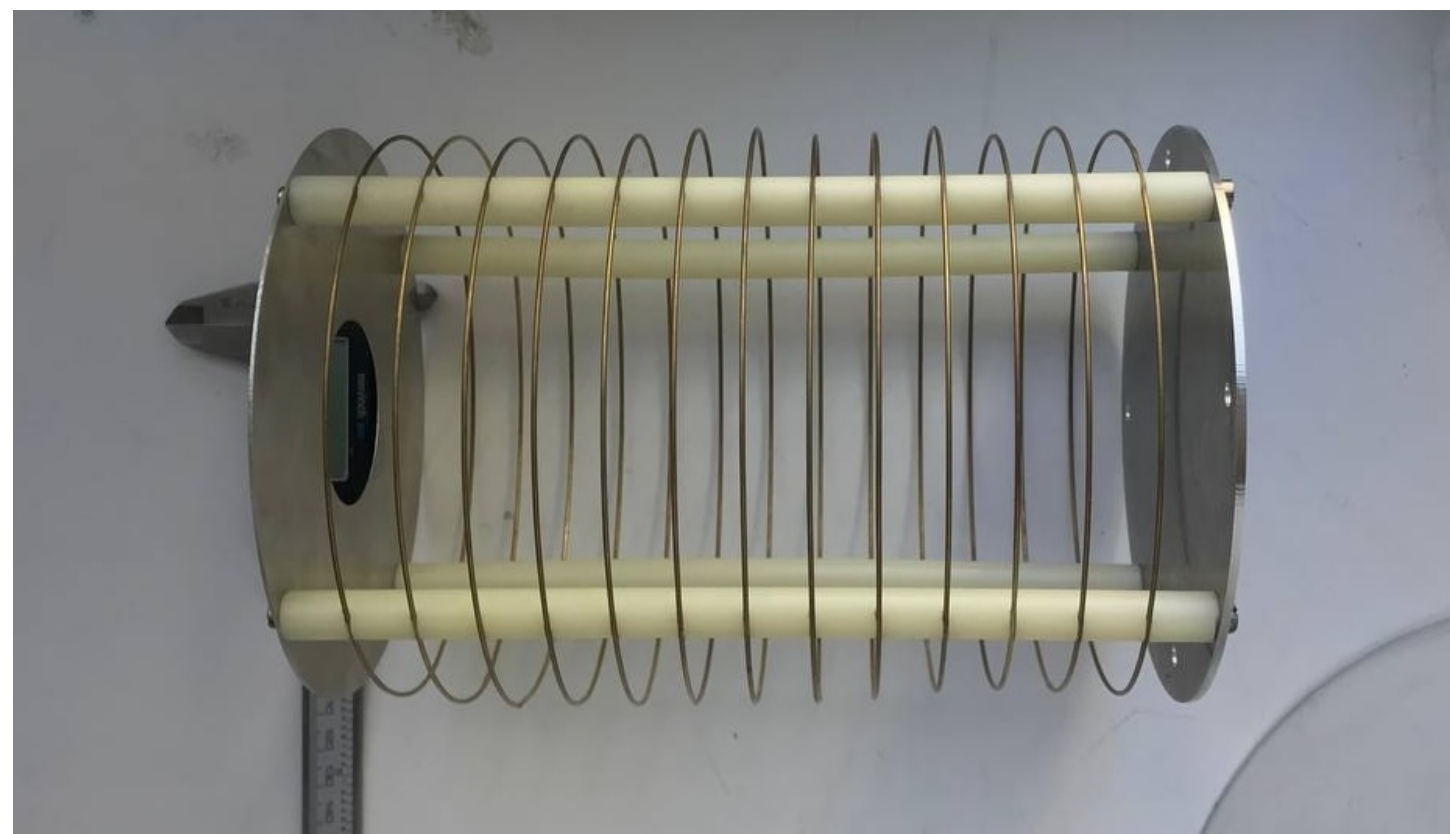


Рис. 23. Структура камеры АСТАМ

Размещены 2 α -источника на катоде и сетке.

Написаны программы для обработки и анализа сигналов, поступающих на аноды камеры

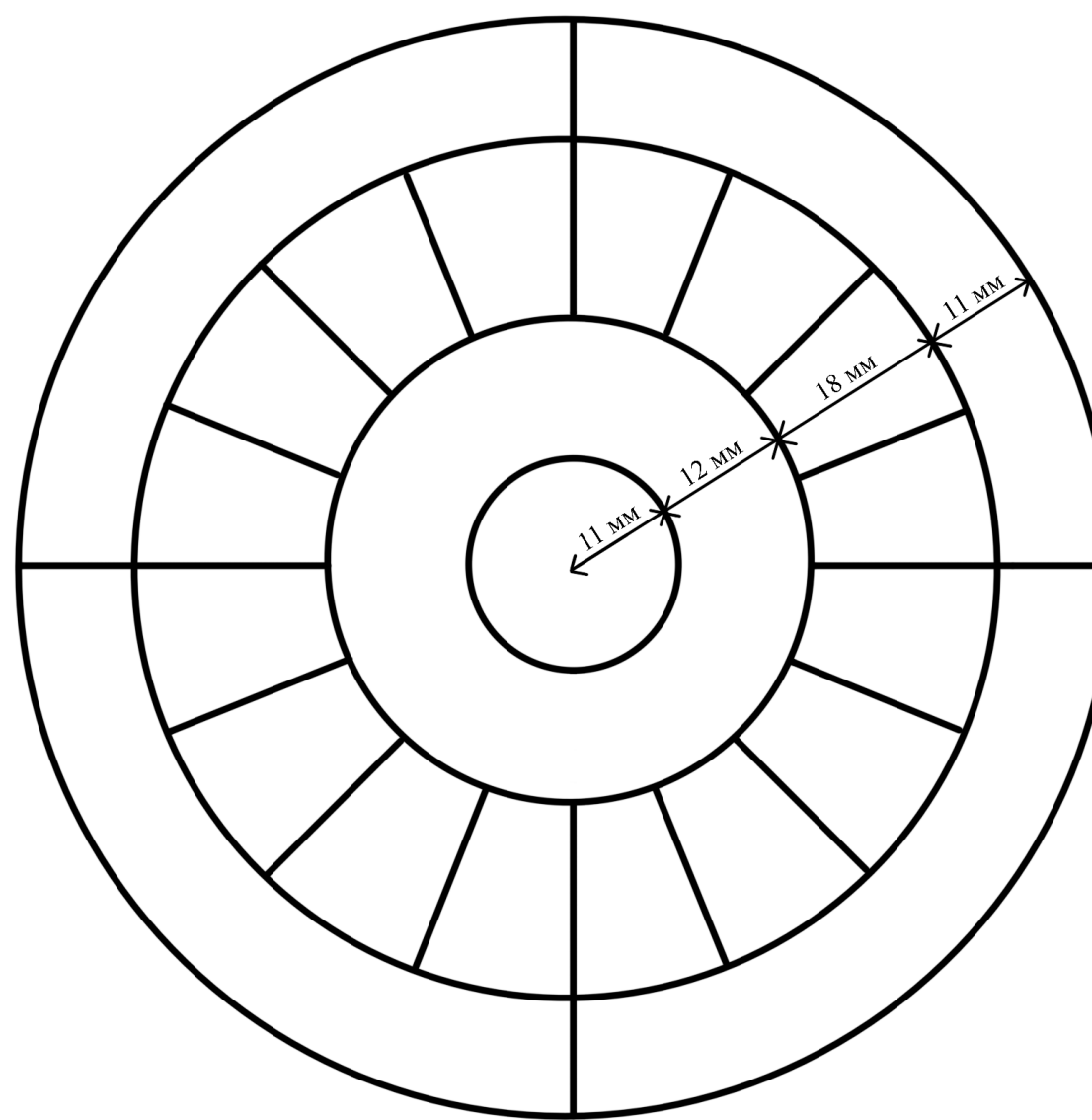
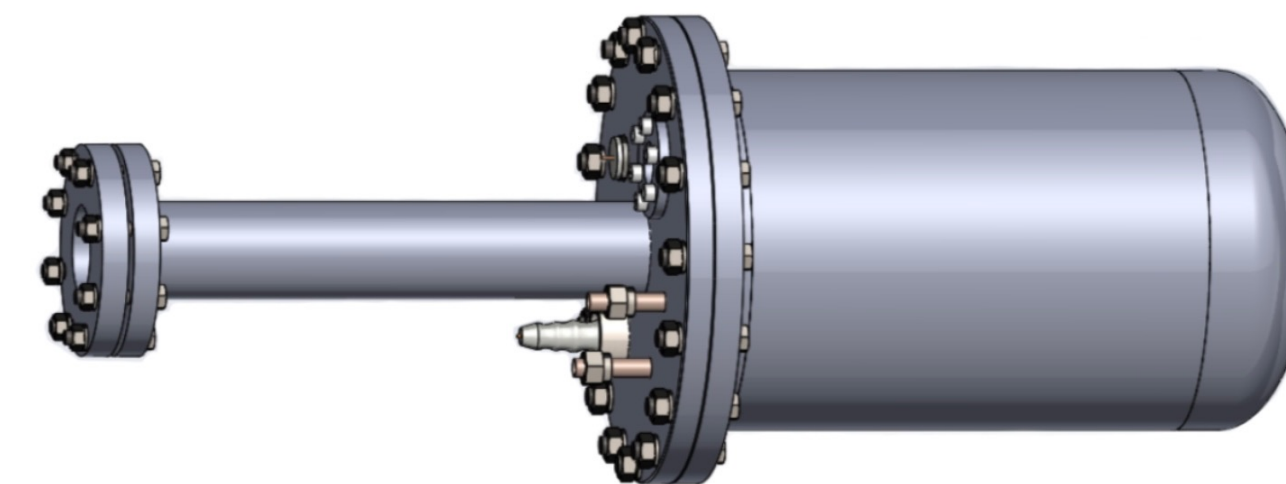


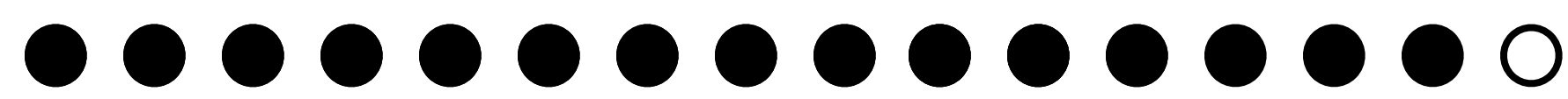
Рис. 24 Анодная плоскость



ИК АСТАМ



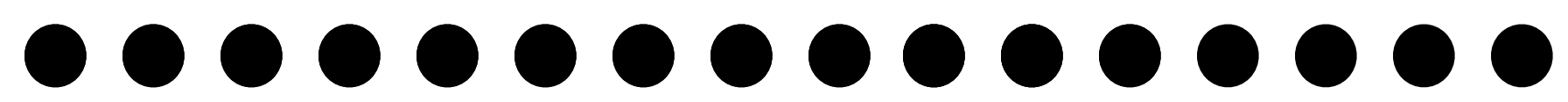
Рис. 25 Тестирование установки на космических лучах (ИК, проп.камеры, счетчики)



Планы

Выход на пучок. Первый эксперимент с этой установкой на протонном пучке нашего ускорителя в конце 2026 года. Собрана установка, включающая в себя: активную мишень АСТАМ и трековую систему (сцинтилляционные счетчики, пропорциональные камеры). Вся электроника существует и тестируется, как и программное обеспечение. Проведен первый тестовый эксперимент этой установки на космике.

Тестовый эксперимент планируется провести на He и Ar.



Результаты 2026

- Собрана камера АСТАМ
- Протестирована необходимая электроника (24 канала FADC, электроника для проп.камер (система cross3))
- Написаны программы анализа данных с камеры АСТАМ
- Начат анализ данных, полученных в тестовых экспериментах на ускорителе МАМІ на электронном пучке в смеси $\text{He}+4.3\%\text{N}_2$

В конце сентября на конференции ЯДРО-2026 (Хабаровск) будут сделаны 2 доклада на тему исследования кластерной структуры ядер с помощью активной мишени. Планируется публикация статей на основе этих докладов в ЭЧАЯ.