



Эксперименты с активными мишенями

Дзюба Алексей

Отделение физики высоких энергий, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

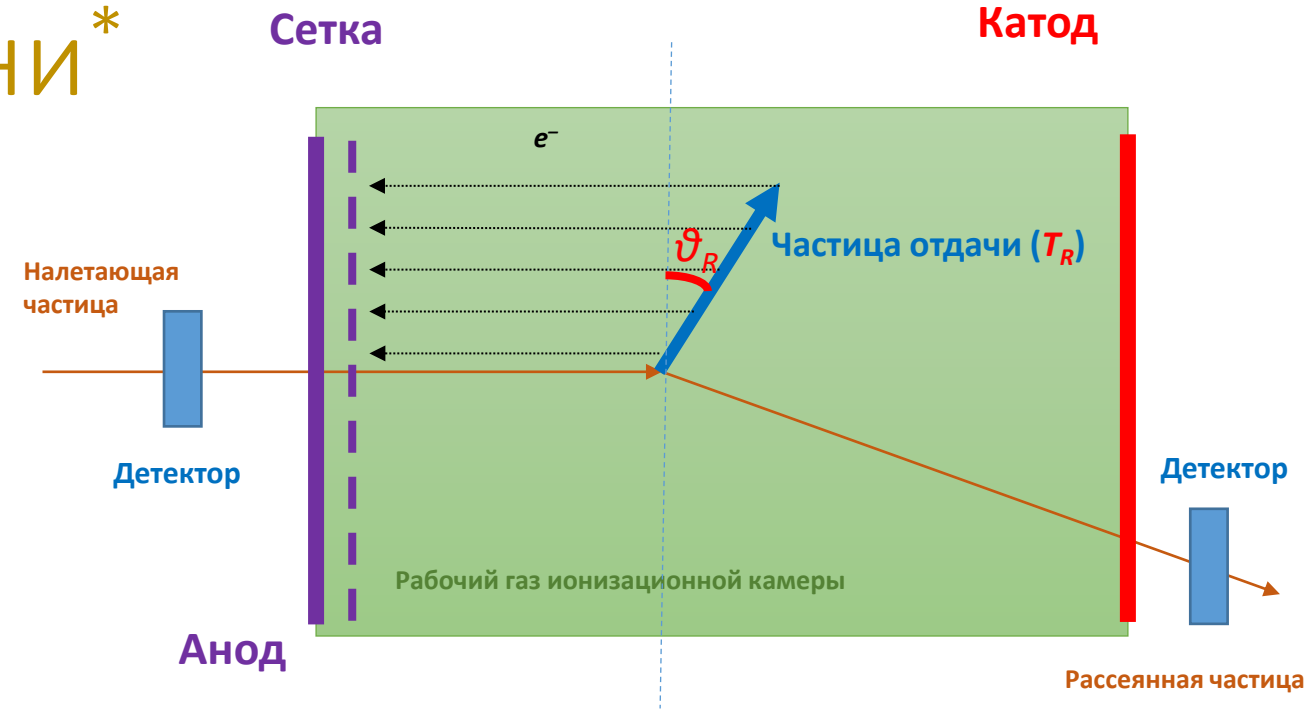
Сессия Ученого Совета ОФВЭ, 24 декабря 2025 г.

Метод активной мишени*

- В методе активной мишени время-проекционная **ионизационная камера (ИК)** является одновременно газовой мишенью и детектором частиц отдачи.

* **ИК = Активная мишень = TPC (Time Projection Chamber)**

- Метод позволяет измерять:
 - Энергию частицы отдачи (T_R),
 - Квадрат импульса (q^2), переданного ей
 - Угол вылета частицы отдачи (ϑ_R)
 - Измеряется по разнице времен прихода сигнала на сегментированную анодную плоскость



$$\text{Сигнал ИК} \sim T_R = q^2 / 2M_R$$

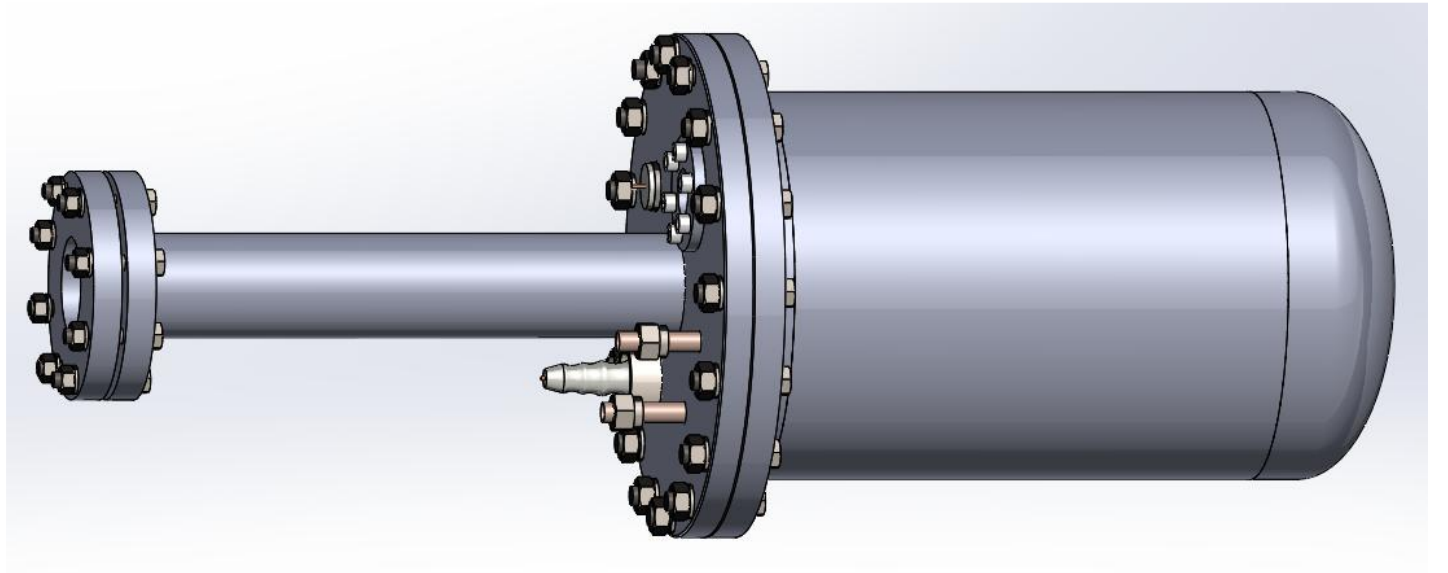
Преимущества метода:

- Отсутствие стеночных эффектов
- Прямое определение q^2
- Возможность работы в режиме совпадений
- 3D-картина ионизации

Совместные проекты в Германии и ЦЕРН

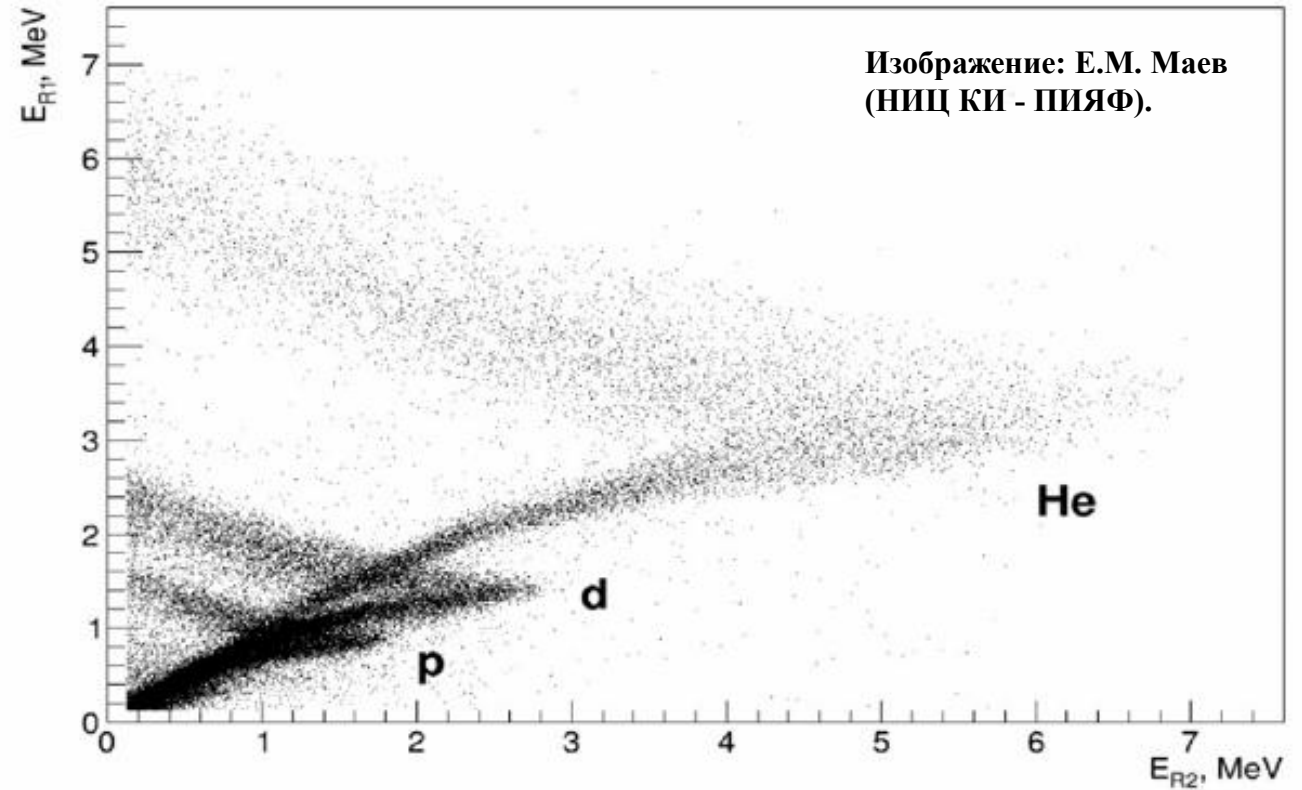
- В 2010-22 гг. **ОФВЭ НИЦ «КИ» - ПИЯФ** предложил ряд совместных экспериментов на базе европейских ускорителей:
 - **MAMI** (г. Майнц, Германия) – измерение зарядового радиуса протона в упругом e^-p -рассеяние (см. доклад П.В. Кравченко) → **АСТАМ**
 - **SPS M2**-beamline, **AMBER** / NA66 (CERN) – измерение зарядового радиуса протона в упругом μp -рассеяние
 - **MESA** (г. Майнц, Германия) – измерение поляризуемости нуклона → **COMPTON**
 - **R³B** (FAIR, г. Дармштадт, Германия) – изучение свойств экзотических ядер → **АСТАF2**
- В 2022-24 гг. сотрудничество было остановлено по инициативе европейских коллег по политическим причинам
- В настоящее время **ОФВЭ НИЦ «КИ» - ПИЯФ** ищет возможности реализации этой научной программы на базе российских ускорителей

ACTAM



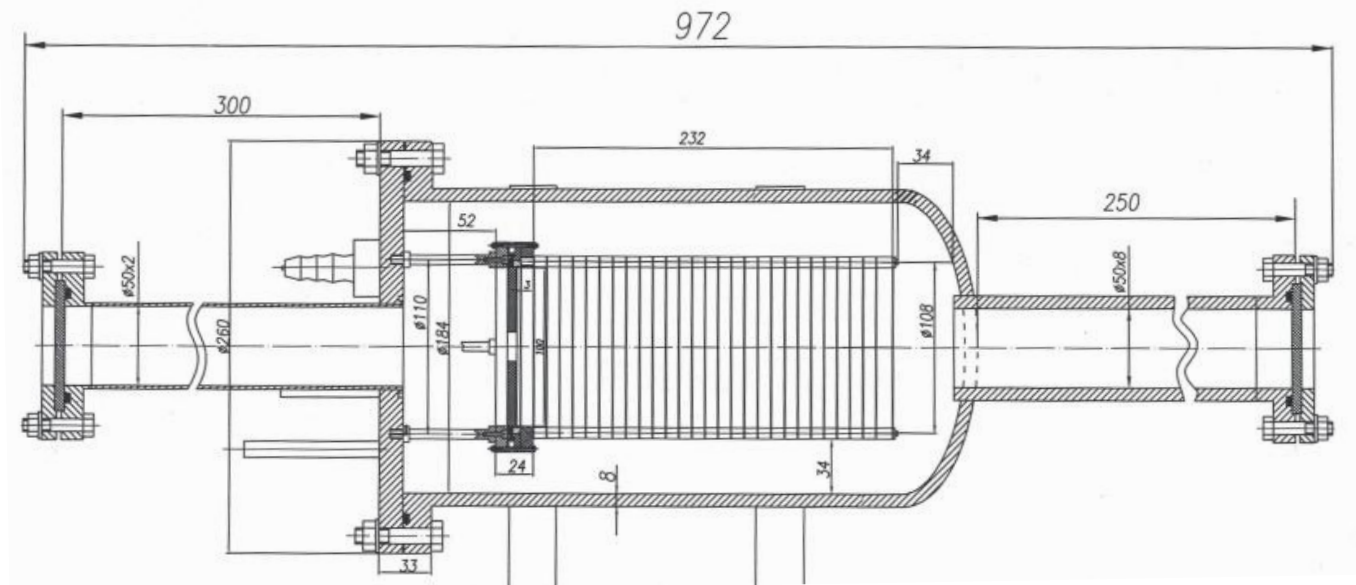
Измерение сечения выбивания нуклонов и кластеров из ядер

- Измерение дифференциальных сечений выбивания протонов и кластеров (дейтронов и ядер гелия) на различных газовых мишенях (He , CH_4 , N_2 , Ar) при различных энергиях электронного пучка.
- Во время тестовых измерений, проведенных с использованием прототипа ИК в 2018 г. на ускорителе электронов МАМІ (г. Майнц, Германия), наблюдалось выбивание протонов и дейтронов из ядер гелия и азота при энергии налетающего электрона 720 МэВ.



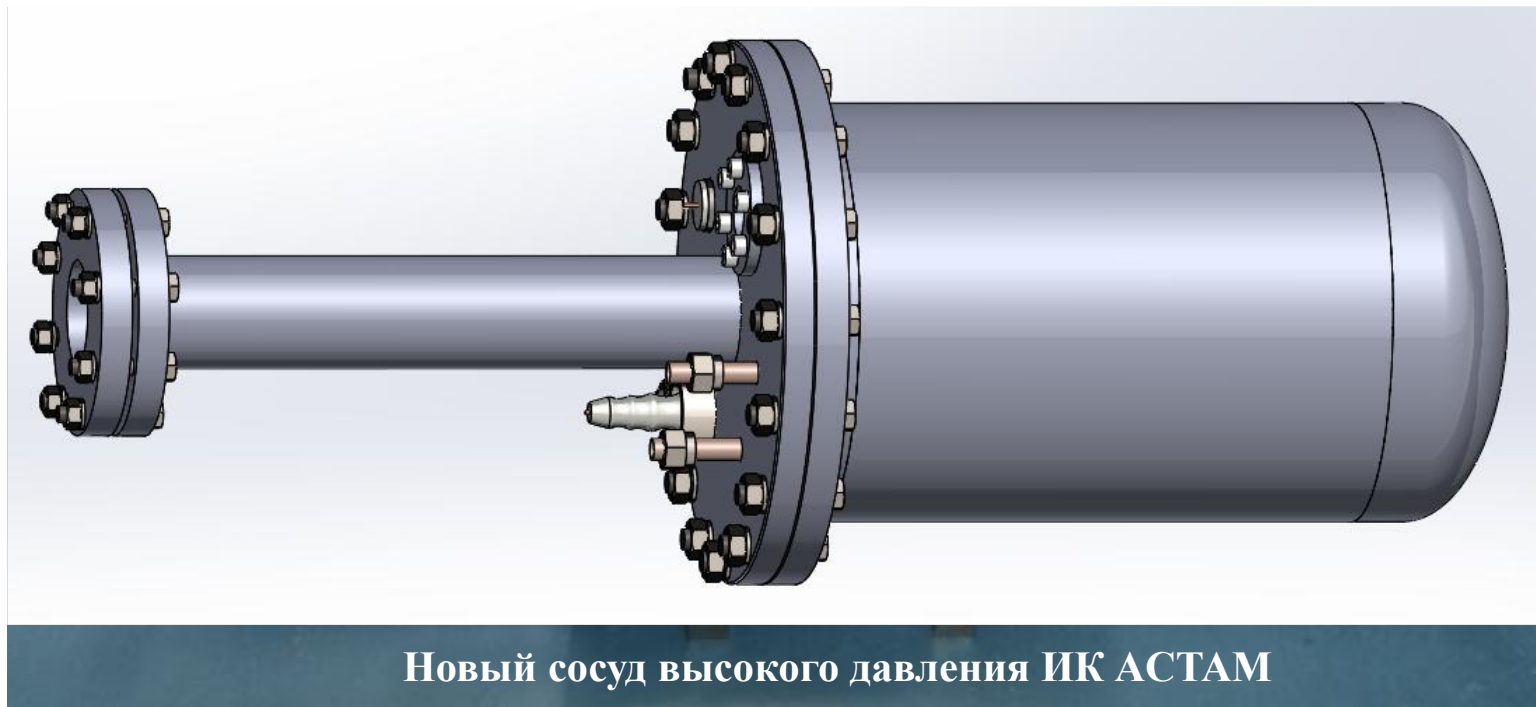
Ионизационная камера АСТАМ

- 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
- В дальнейшем эта камера (с изменённой структурой электродов) может быть использована для измерения сечения комптоновского рассеяния на ядрах гелий-3, где экспериментальные данные отсутствуют.



Ионизационная камера АСТАМ

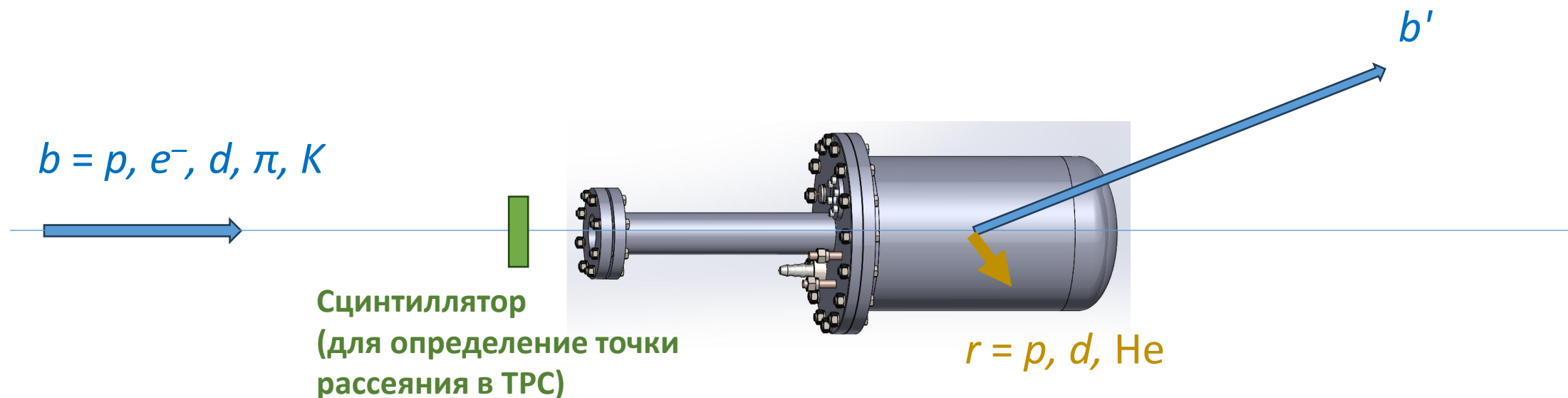
- Корпус камеры: алюминиевый сплав АМг5
- Толщина стенок камеры: 8 мм
- Длина корпуса: ~ 400 мм
- Внутренний диаметр 184 мм
- Полный объем камеры: 10 л
- Рабочее давление: <25 атм
- В дальнейшем эта камера (с изменённой структурой электродов) может быть использована для измерения сечения комптоновского рассеяния на ядрах гелий-3, где экспериментальные данные отсутствуют.



- В 2025 году изготовлен новый колпак сосуда высокого давления
- Отсутствие «трубы» дает доступ к измерению малых углов рассеяния

$$\overset{1}{A}(\overset{2}{b}, \overset{3}{r}b') \overset{4}{X} \overset{5}{\rightarrow} \overset{6}{d^3\sigma} / (\overset{7}{d\Omega_b}, dT_r, d\Omega_r) \overset{8}{\leftarrow} T_b, \text{ поляризация?}$$

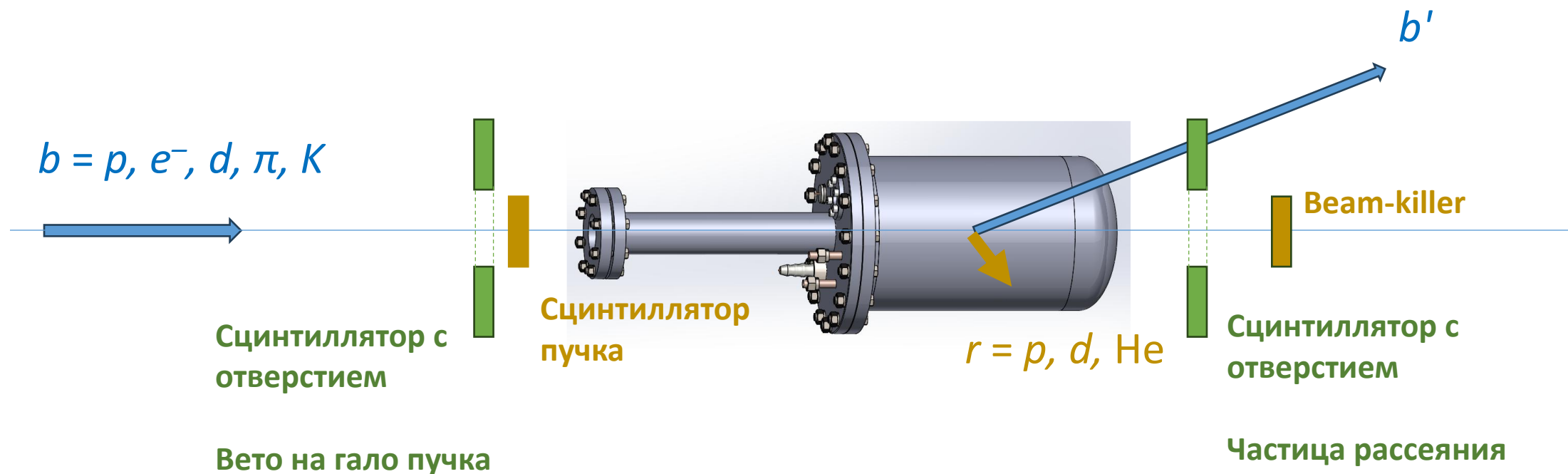
- Портативный прибор позволит работать на практически всех доступных пучках!
- **8 возможных параметров** для варьирования открывают гигантские комбинаторные возможности \rightarrow **фабрика сечений**



Минимальная конфигурация установки

$$\overset{1}{A}(\overset{2}{b}, \overset{3}{rb'}) \overset{4}{X} \rightarrow \overset{5}{d^3\sigma} / (\overset{6}{d\Omega_b}, \overset{7}{dT_r}, \overset{8}{d\Omega_r}) \leftarrow T_b, \text{ поляризация?}$$

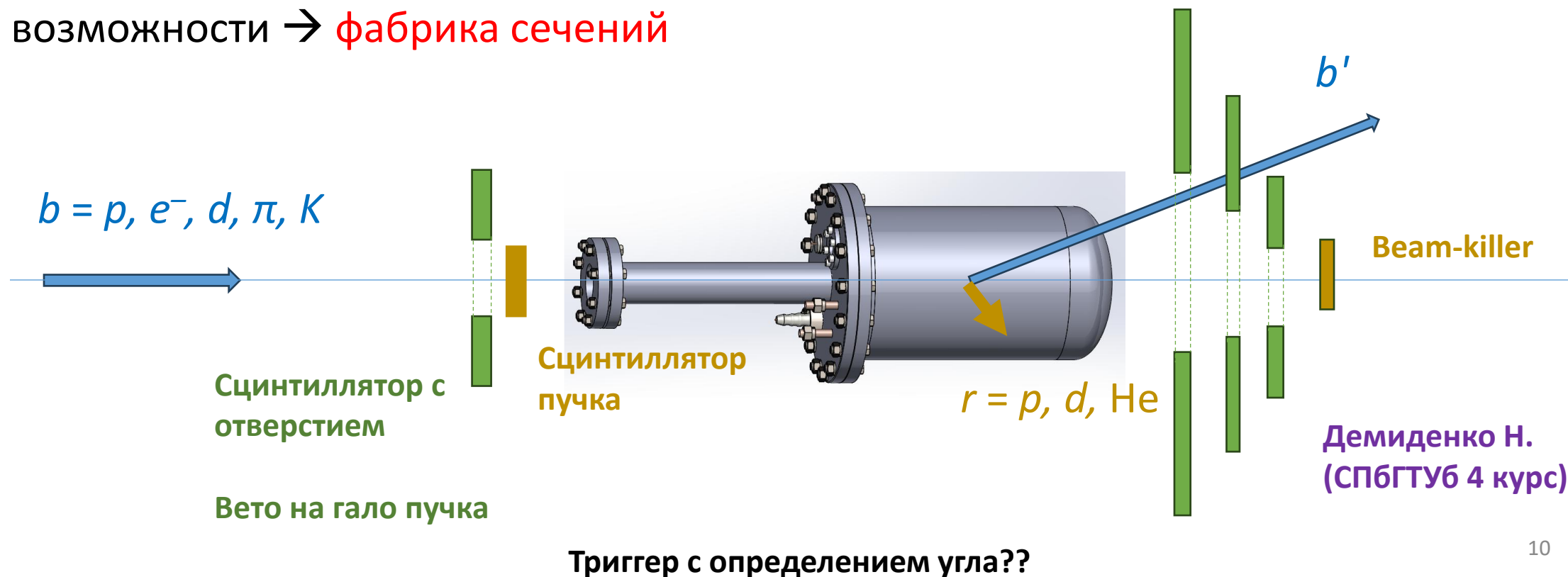
- Портативный прибор позволит работать на практически всех доступных пучках!
- **8 возможных параметров** для варьирования открывают гигантские комбинаторные возможности → **фабрика сечений**



Более сложный триггер – более интенсивные пучки

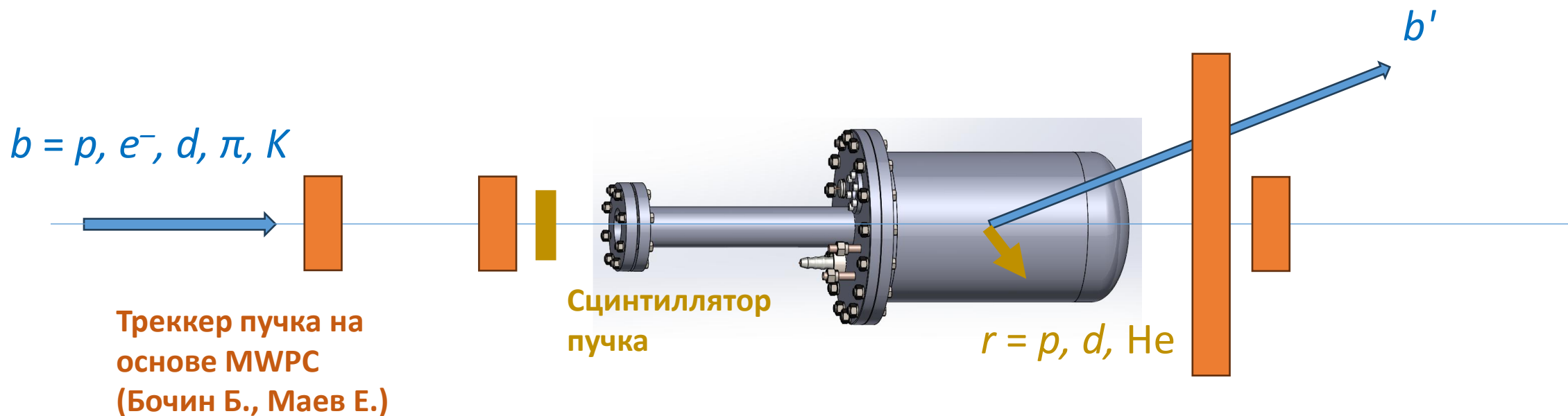
$$\overset{1}{A}(\overset{2}{b}, \overset{3}{rb'}) \overset{4}{X} \rightarrow \overset{5}{d^3\sigma} / (\overset{6}{d\Omega_b}, \overset{7}{dT_r}, \overset{8}{d\Omega_r}) \leftarrow T_b, \text{ поляризация?}$$

- Портативный прибор позволит работать на практически всех доступных пучках!
- **8 возможных параметров** для варьирования открывают гигантские комбинаторные возможности → **фабрика сечений**



$$\overset{1}{A}(\overset{2}{b}, \overset{3}{rb'}) \overset{4}{X} \rightarrow \overset{5}{d^3\sigma} / (\overset{6}{d\Omega_b}, \overset{7}{dT_r}, \overset{8}{d\Omega_r}) \leftarrow T_b, \text{ поляризация?}$$

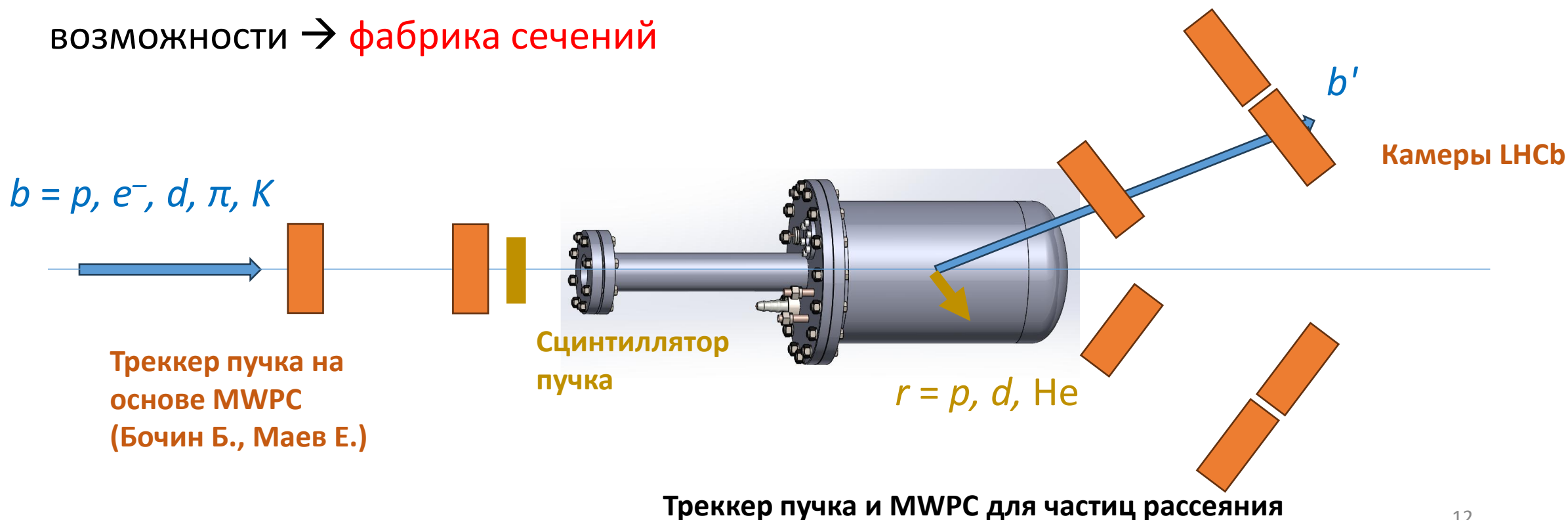
- Портативный прибор позволит работать на практически всех доступных пучках!
- **8 возможных параметров** для варьирования открывают гигантские комбинаторные возможности → **фабрика сечений**



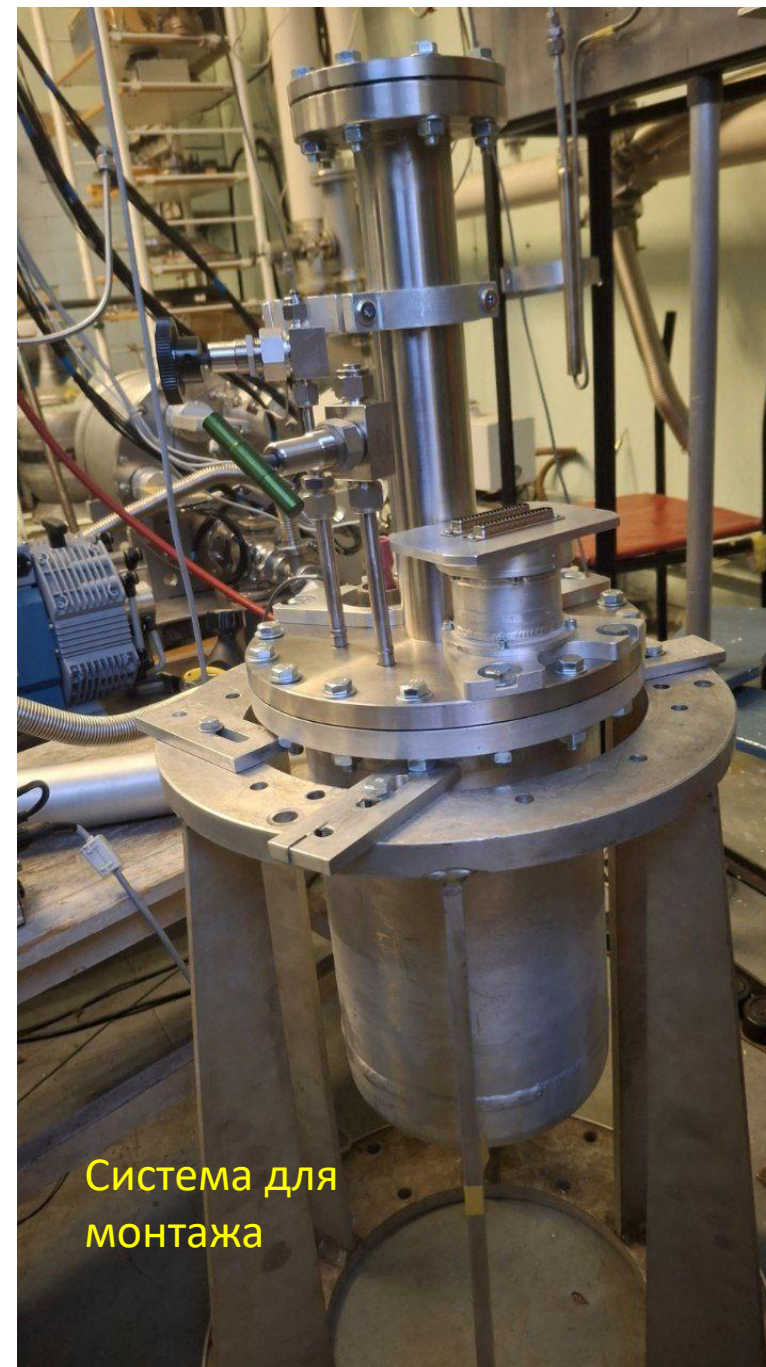
Треккер пучка и MWPC для частиц рассеяния

$$\overset{1}{A}(\overset{2}{b}, \overset{3}{rb'}) \overset{4}{X} \rightarrow \overset{5}{d^3\sigma} / (\overset{6}{d\Omega_b}, \overset{7}{dT_r}, \overset{8}{d\Omega_r}) \leftarrow T_b, \text{ поляризация?}$$

- Портативный прибор позволит работать на практически всех доступных пучках!
- **8 возможных параметров** для варьирования открывают гигантские комбинаторные возможности → **фабрика сечений**



Новый сосуд высокого давления

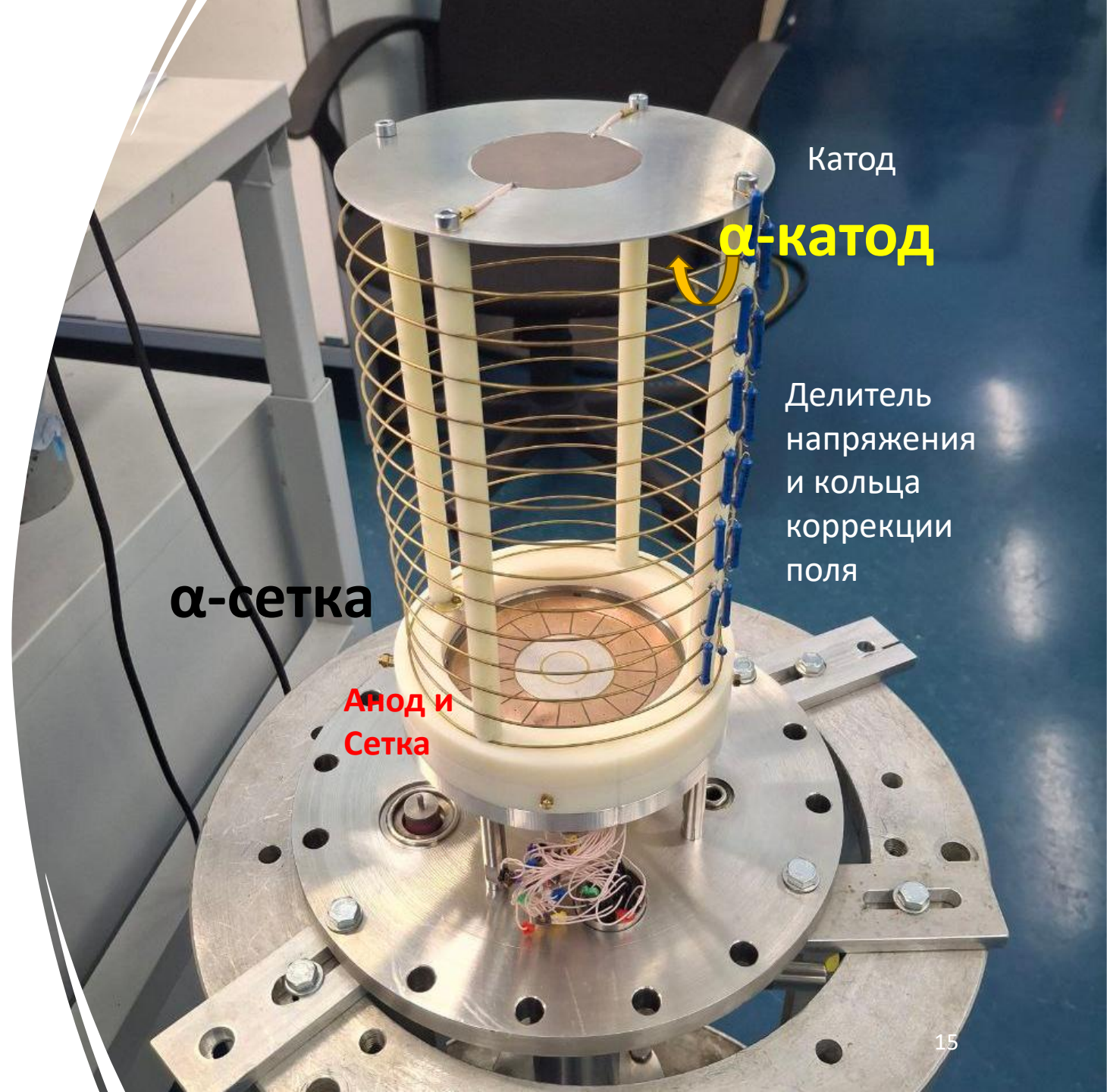


Ионизационная камера АСТАМ

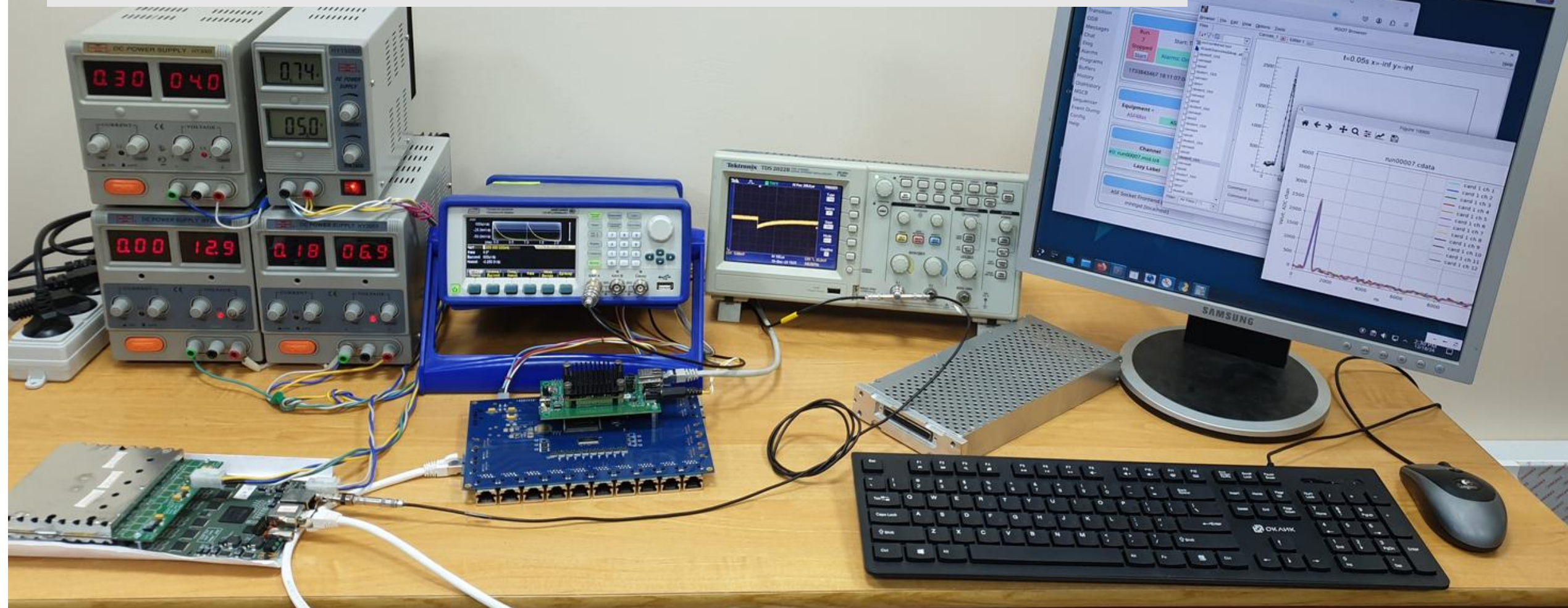
- Портативная ионизационная камера
- От 22 канала считывания
 - Азимутальная сегментация
- **Внутренние элементы камеры – изготовлены в ОФВЭ** координатор
О.Е. Маев



Сборка внутренней структуры АСТАМ



- 2024 г. стенд для тестирования работы подсистемы сбора данных с камеры ТРС, включая плату ASF12ер (Грузинский Н.) с разными предусилителями (Неустроев П.В. и Яцура В.И.) и концентратор сбора данных ССВ12 (Яцура В.И.).
- Разработано программное обеспечение для считывания, online - мониторинга и визуализации полученных данных на базе системы MIDAS (Фотьев В.).
- 2025 г. Проведено тестирование данной электроники на существующей камере ТРС, предоставленной лабораторией барионной физики (Маев Е.М., Маев О.Е. и Дзюба А.А.)
- 2025 г. Успешные испытания (Грузинский Н. и др.) с предусилителями (Петров Г.Е.)



Запуск ИК АСТАМ



Изготовлены 2 Flash ADC (22 канала)
Успешные испытания (Грузинский Н.)

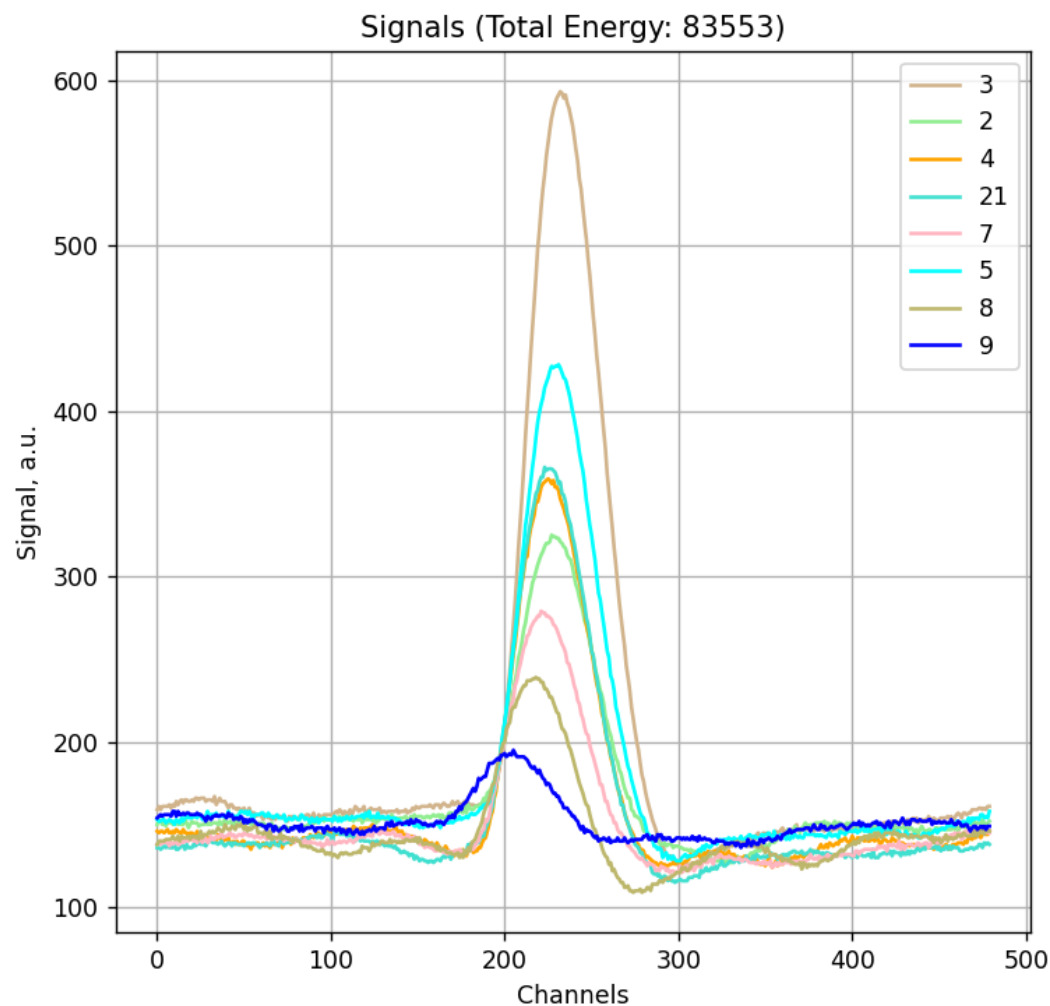
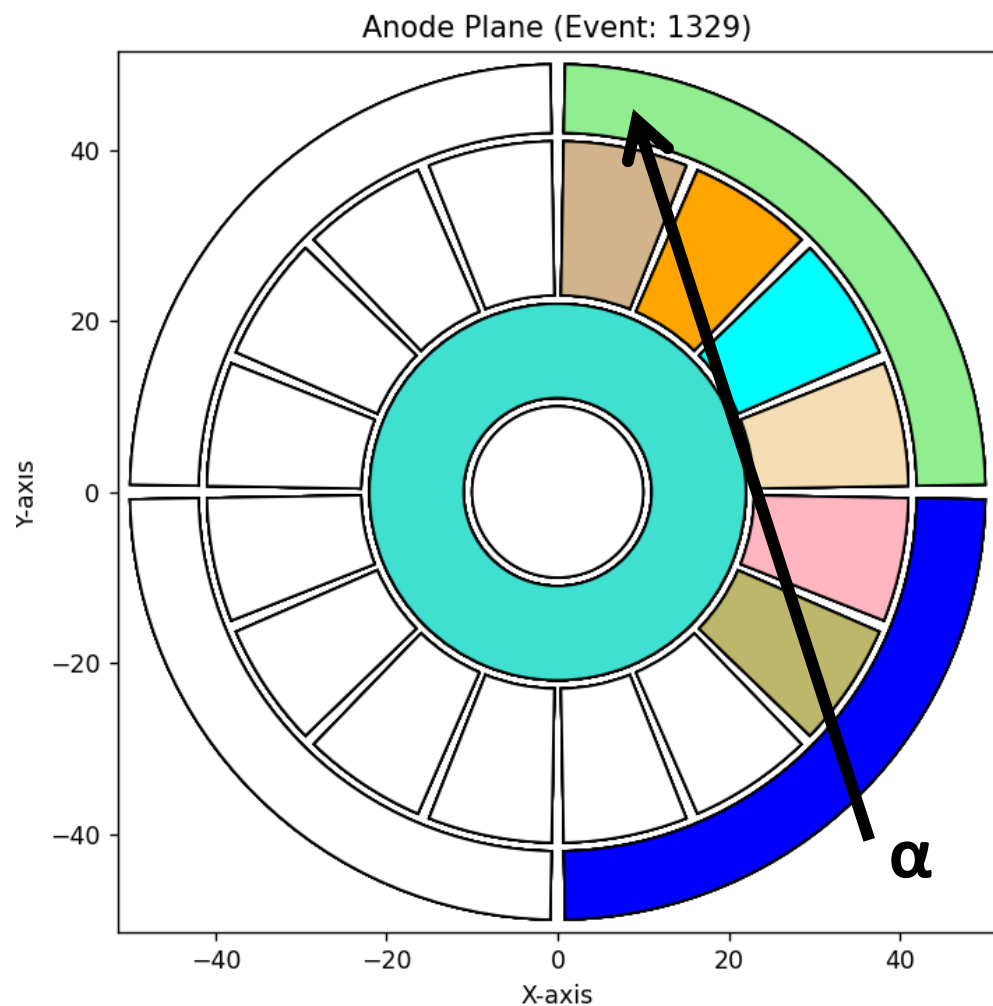


Усилители-
формирователи
(Петров Г.Е.)

АСТАМ

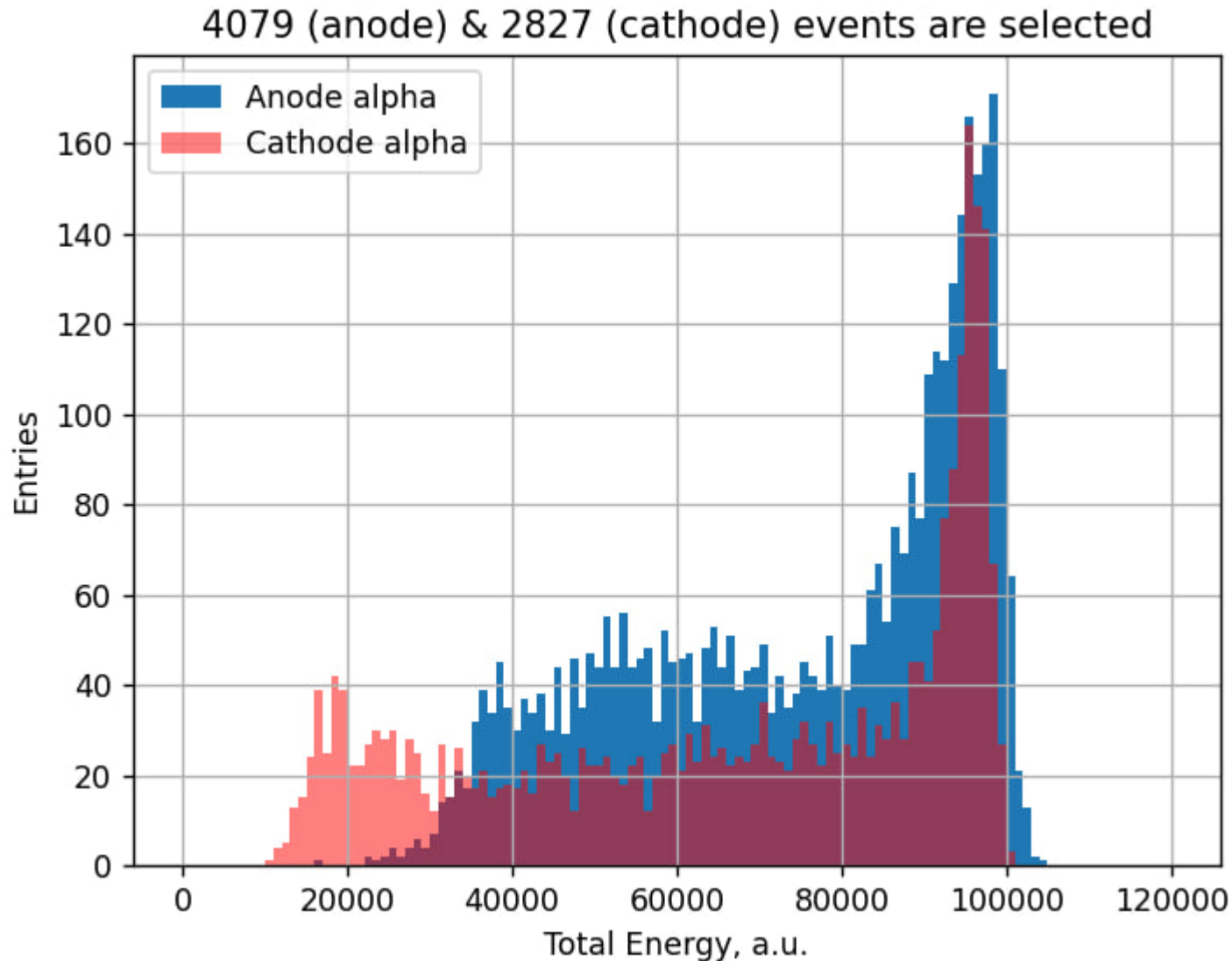
Event-display ACTAM

Начата разработка программного обеспечения для анализа данных



Аргон, давление 0,53 атм.

Обработка первых данных АСТАМ

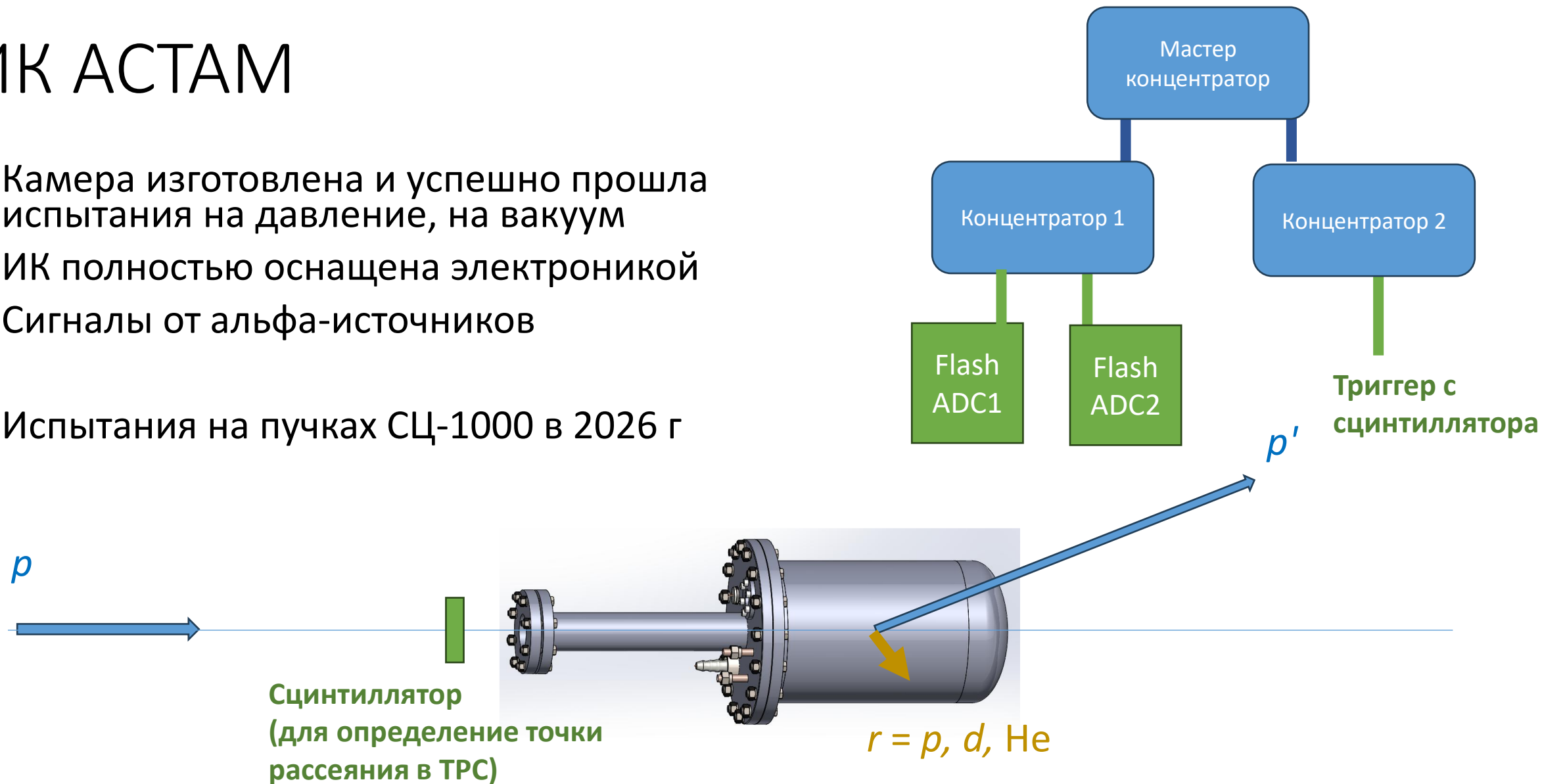


Аргон, давление 0,53 атм.

- Треки с числом сработавших сегментов ИК от 4 до 6
- Пик соответствует энергии альфа-частицы ^{241}Am
- Энергия: 5,486 МэВ
- **Малые потери электронов при дрейфе!**
- **ИК работает!**

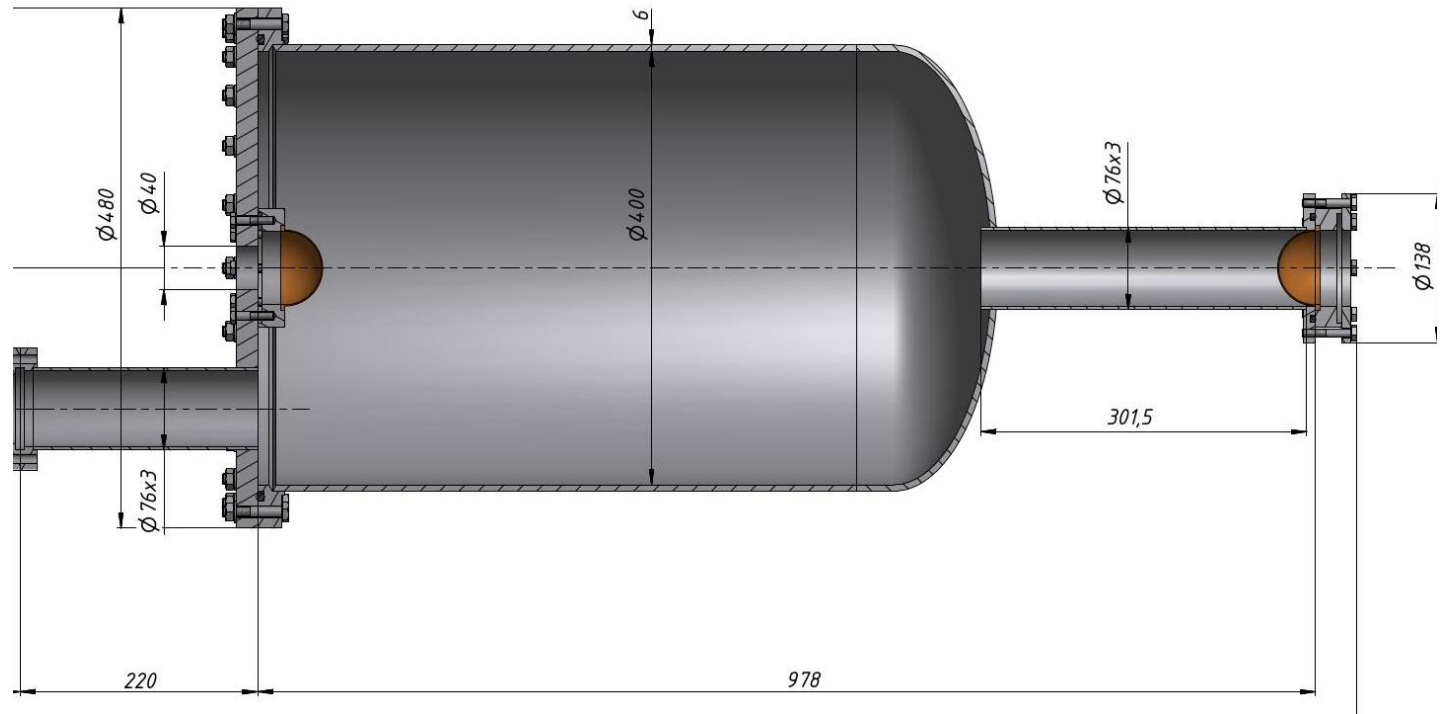
ИК АСТАМ

- Камера изготовлена и успешно прошла испытания на давление, на вакуум
- ИК полностью оснащена электроникой
- Сигналы от альфа-источников
- Испытания на пучках СЦ-1000 в 2026 г



Минимальная конфигурация установки

ACTAF2

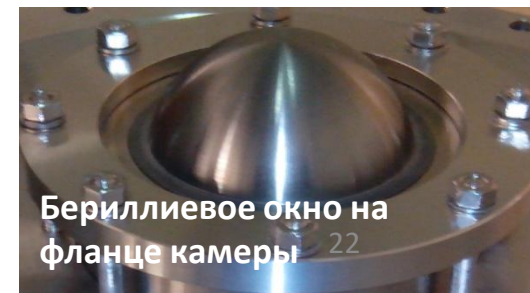
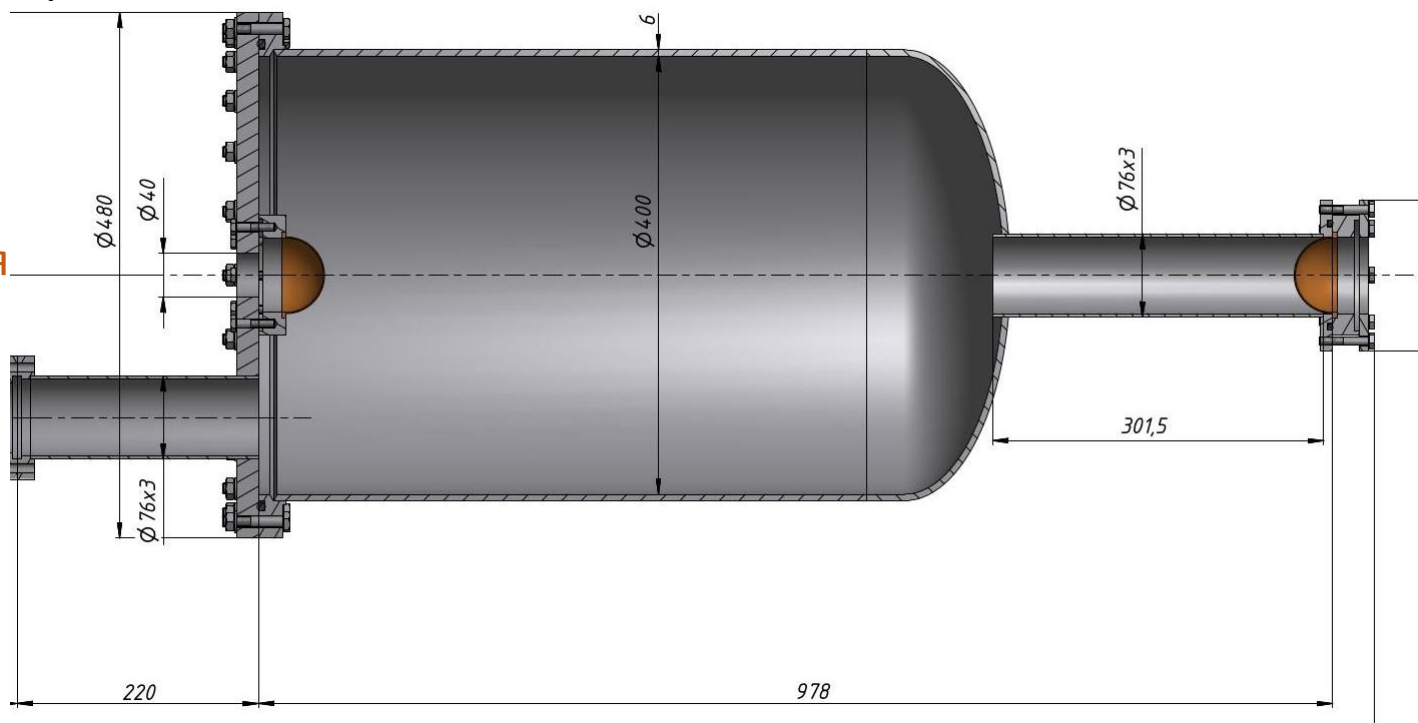


ИК АСТАФ2

- Активная мишень АСТАФ2 была создана для изучения процессов неупругого рассеяния экзотических ядер на ядрах гелия на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Дармштадт, Германия).
 - Планировалось ее размещение внутри большого детектора гамма квантов CALIFA
- Рабочее давление 10 bar
- С помощью α -источника (Am-241), помещенного на катоде ИК, были измерены энергетические спектры при разных экспериментальных условиях.

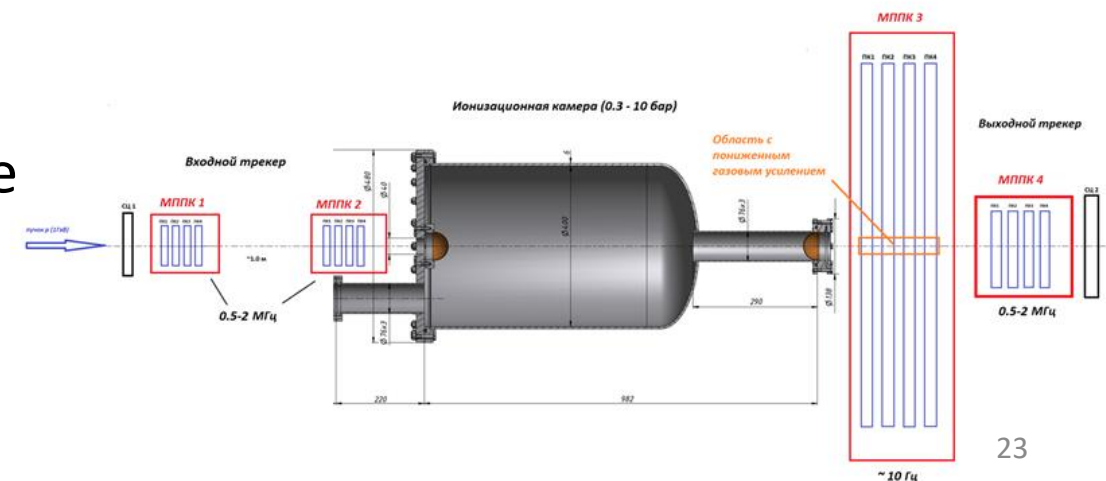
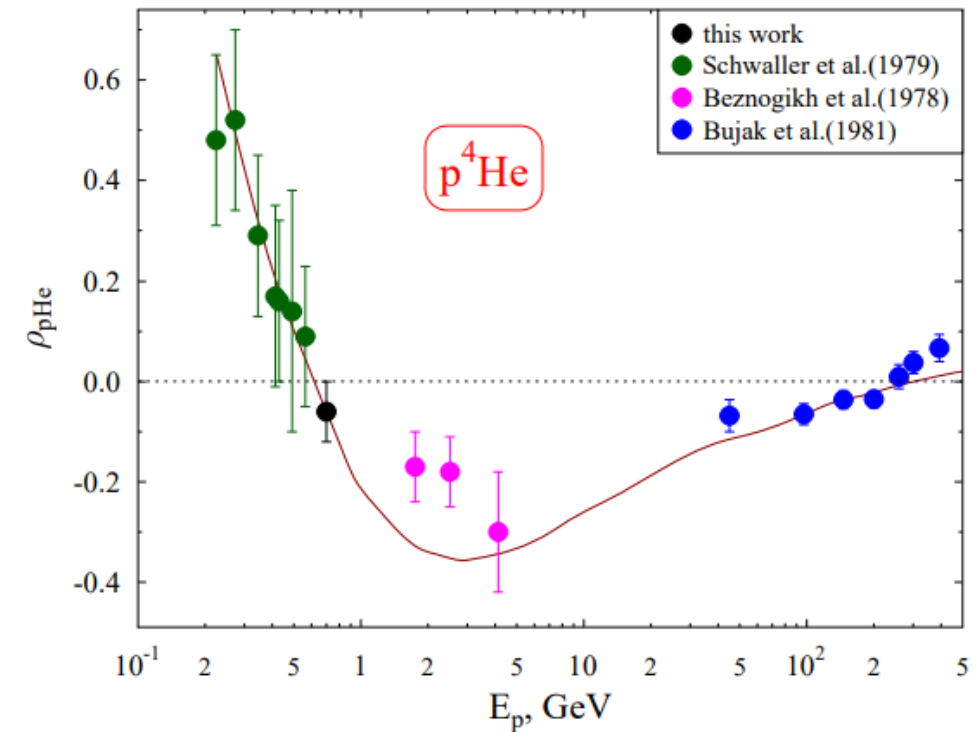
- Необходимо оснастить электроникой для съема данных (FlashADC)

2026 г. !



Эксперимент на СЦ1000

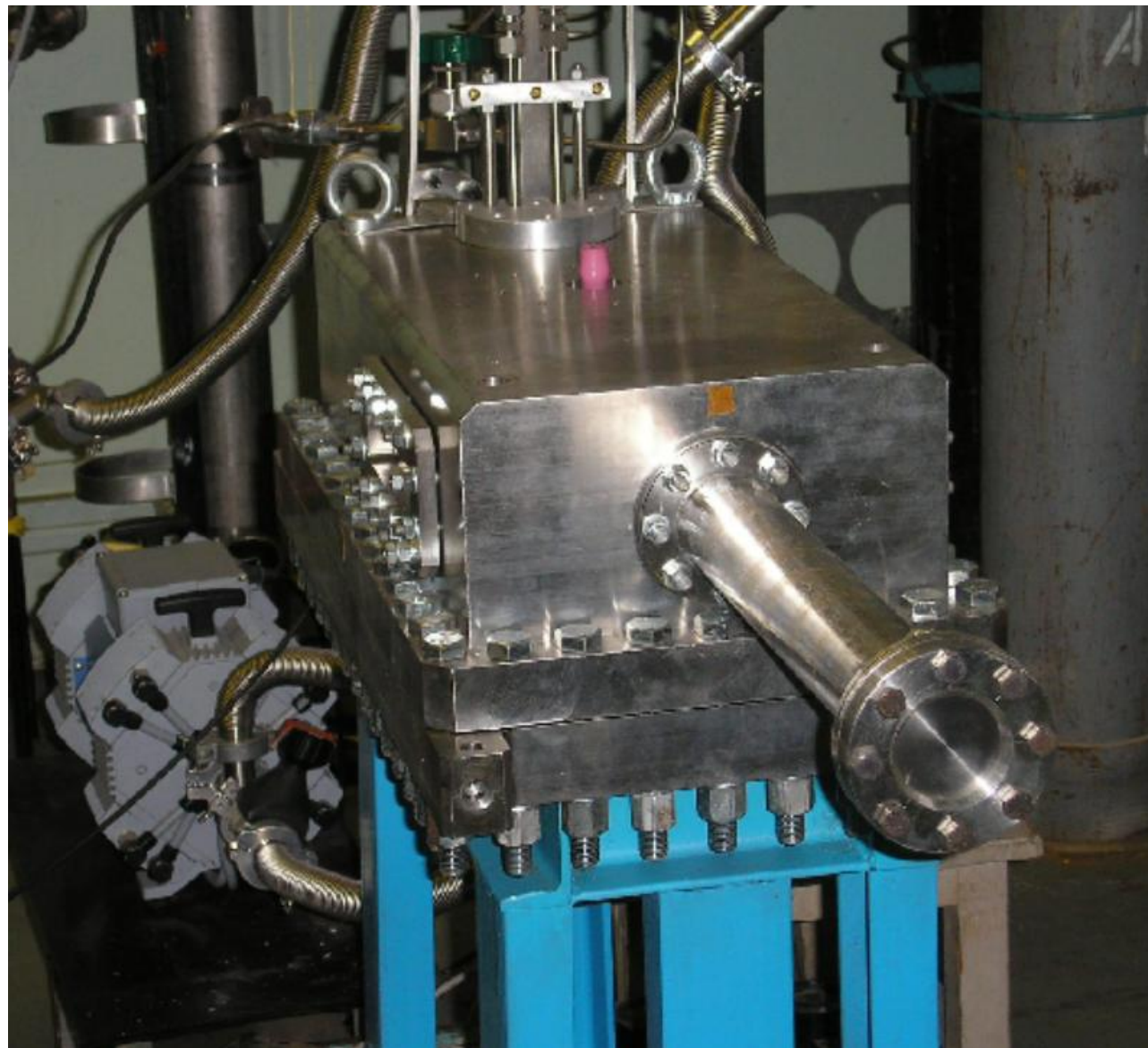
- Определение отношения реальной к мнимой части амплитуд упругого p -He, p -d и p -n рассеяния вперёд при энергиях протонов 500-1000 МэВ, где известные результаты можно улучшить, дополнить или выполнить измерения там, где они не проводились вообще.
- Одновременно, можно получить результаты по неупругому рассеянию протонов на тех же ядрах сопровождающихся вылетом кластеров
- Разработка трекера пучка (**ОДИ**)
- Тестовый сеанс на СЦ1000 без трековой системы, например, установка ИК на выходе спектрометра МАП и возможное использование трековой системы МАР в качестве входного трекера (**Миклухо О.В.**)



COMPTON

- Необходимо оснастить электроникой для съема данных (FlashADC)

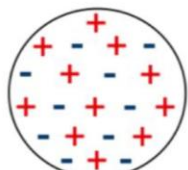
2026 г. !



Поляризуемость протона

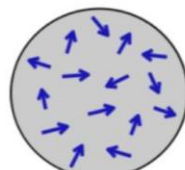
- **Поляризуемость** – одно из фундаментальных свойств нуклона, которое характеризует степень его деформации под действием внешнего электромагнитного поля.
- Поляризуемость (**электрическую** (α) и **магнитную** (β)) можно определить при измерении зависимостей дифференциальных сечений комптоновского рассеяния от энергии и угла рассеяния фотонов θ_γ

электрическая поляризуемость

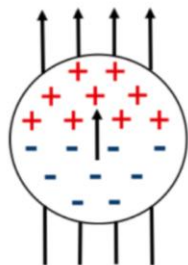


$$D = 0$$

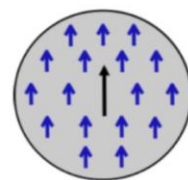
магнитная поляризуемость



$$M = 0$$

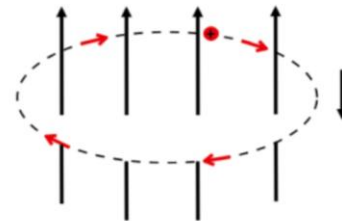


$$D = \alpha E$$



парамагнитная

$$M = \beta_{\text{para}} B$$



диамагнитная

$$M = \beta_{\text{dia}} B$$

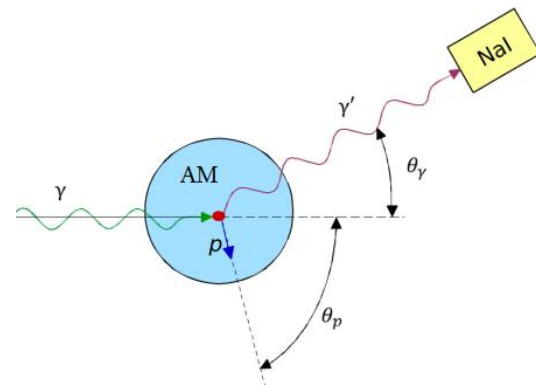
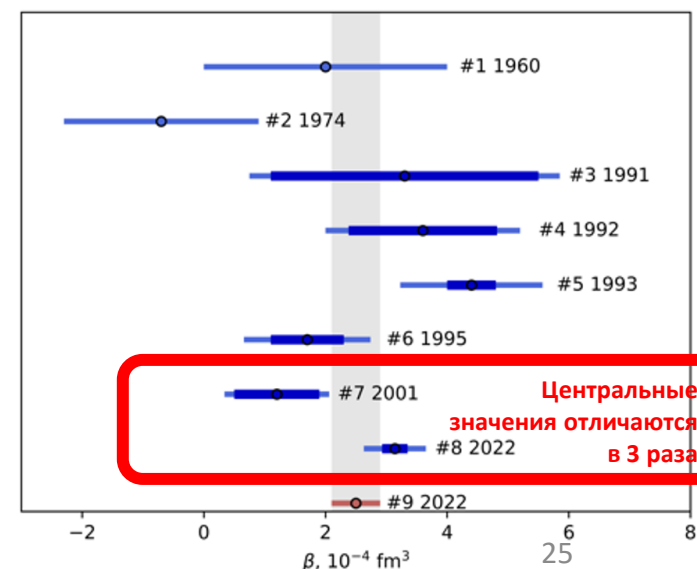
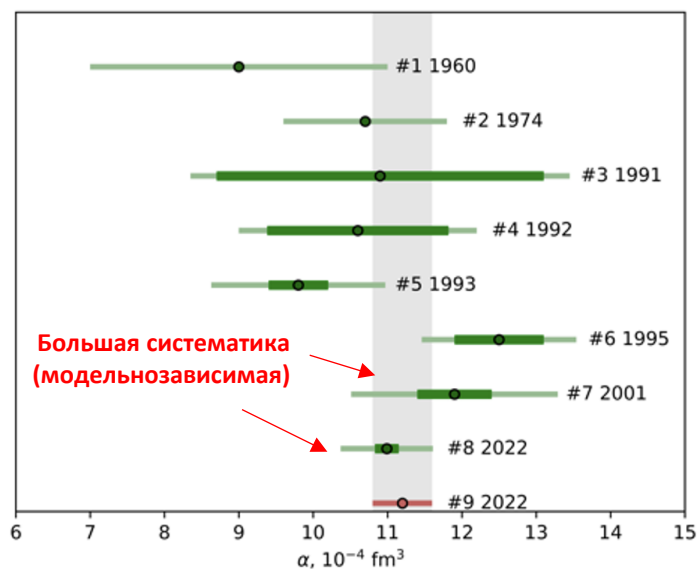


Схема планируемого эксперимента по измерению поляризуемости нуклонов



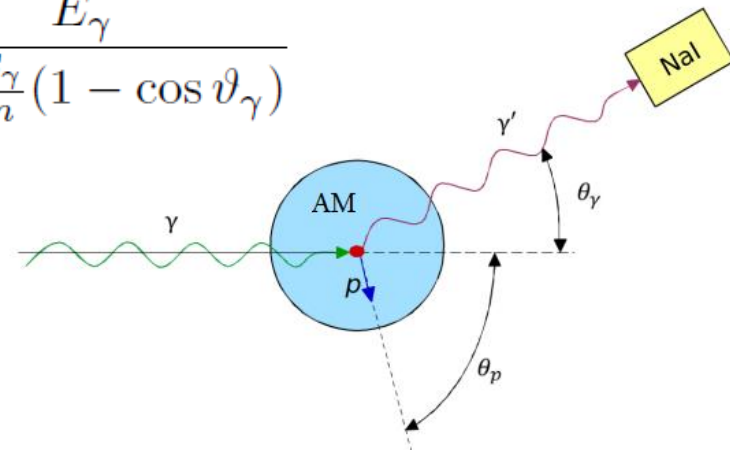
Идея измерения

Low Energy Theorem (LET) позволяет точно рассчитать сечения рассеяния для энергий меньше 100 МэВ

Безмодельный расчёт сечения!

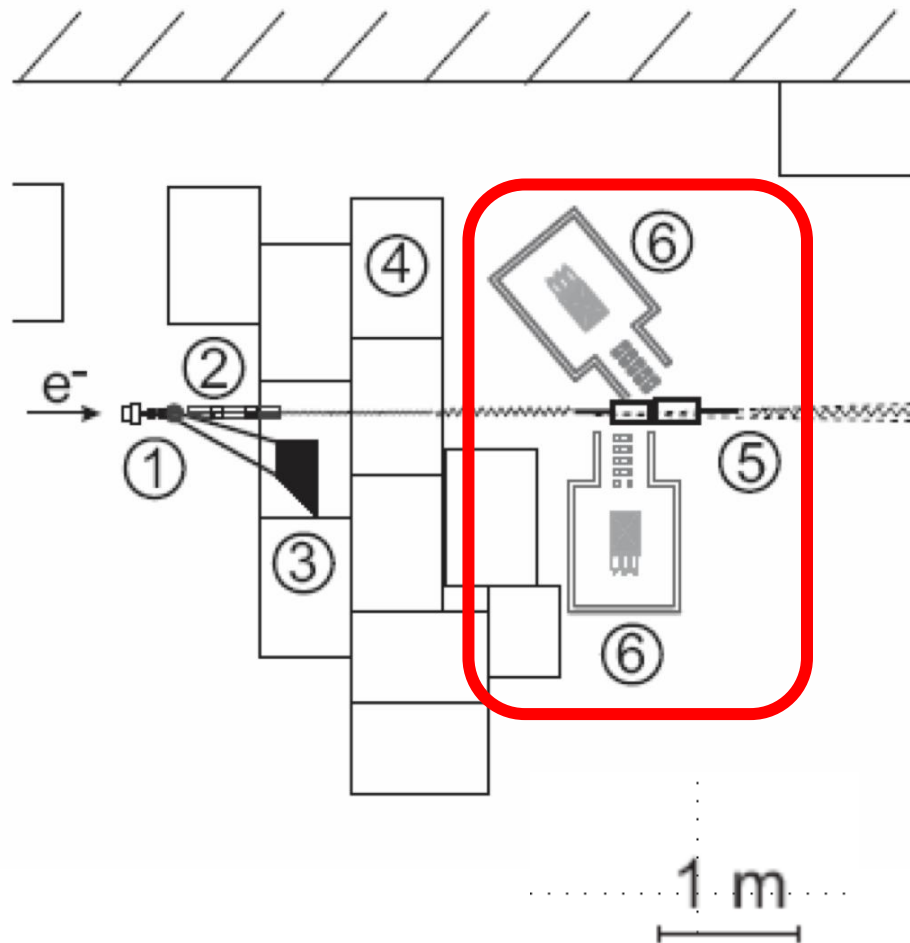
$$\left[\frac{d\sigma(E_\gamma, \vartheta_\gamma)}{d\Omega} \right]_{LET} = \left[\frac{d\sigma(E_\gamma, \vartheta_\gamma)}{d\Omega} \right]_{point} - \rho + \mathcal{O}(E_\gamma^4),$$
$$\rho = \frac{e^2}{4\pi m} \left(\frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} \right)^2 (E_\gamma \cdot E_{\gamma'}) \left[\frac{\bar{\alpha} + \bar{\beta}}{2} (1 + \cos \vartheta_\gamma)^2 + \frac{\bar{\alpha} - \bar{\beta}}{2} (1 - \cos \vartheta_\gamma)^2 \right]$$

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m}(1 - \cos \vartheta_{\gamma})}$$



- При угле рассеяния 90 градусов сечение не зависит от магнитной поляризуемости.
- Достаточно провести измерения при двух углах (90 и 135 град.)
- Использование активной мишени на совпадение со спектрометром фотонов позволяет получить дополнительные ограничения на кинематику рассеяния
- Можно использовать непрерывный спектр фотонов
- Нормировка на энергии фотонов в районе 25 МэВ, где зависимость от поляризуемости очень слабая

Предлагаемая схема измерения



1. Преобразователь тормозного излучения и дипольный магнит;
2. Коллимационная система;
3. Сброс для электронного пучка;
4. Бетонная (+свинец, полиэтилен) защита;
5. Ионизационные камеры высокого давления;
6. γ -спектрометр;

Тестовый эксперимент в ТУ Дармштадт

Статья по теме диссертации А.Ю. Арутюновой принята к печати

Исследование возможностей метода активной мишени по определению поляризуемостей протона и нейтрона

A.Y. Arutyunova^{a}, A.A. Dzyuba^{a,b}, E.M. Maev^a*

А.Ю. Арутюнова^{a}, А.А. Дзюба^{a,b}, Е.М. Маев^a*

^a NRC «Kurchatov Institute» - PNPI, Gatchina, 188300 Russia

^a НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ, Гатчина, 188300 Россия

^b Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

^b Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: arutiunova_ai@pnpi.nrcki.ru

Исследование рассеяния фотонов (комптоновского рассеяния) на нуклонах позволяет определить одну из фундаментальных характеристик 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 зависимостей дифференциальных сечений комптоновского рассеяния на водороде (дейтерии, гелии) от энергии и угла рассеяния фотонов. В НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ был разработан новый метод исследования этого процесса с использованием активной мишени, которая одновременно является газовой мишенью и детектором частиц отдачи.

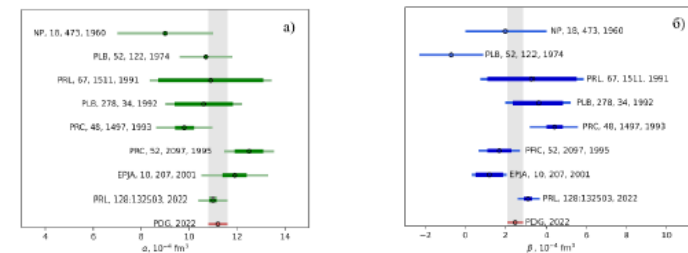


Рис. 1. а) Результаты экспериментов по измерению электрической поляризуемости протона; б) Результаты экспериментов по измерению магнитной поляризуемости протона. (Темным цветом показаны вклады статистических неопределенностей, а светлым полные — статистические и систематические ошибки).

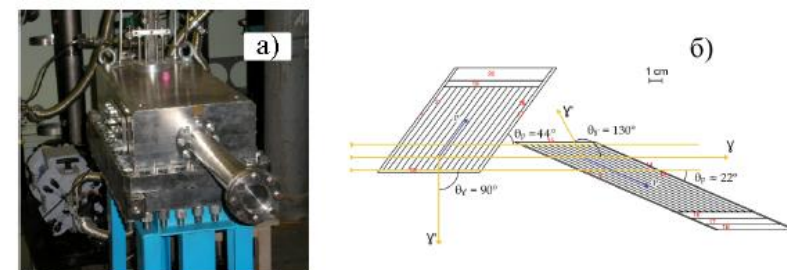


Рис. 4. а) Фотография ионизационной камеры COMPTON; б) Геометрия анодных плоскостей внутри ионизационной камеры.

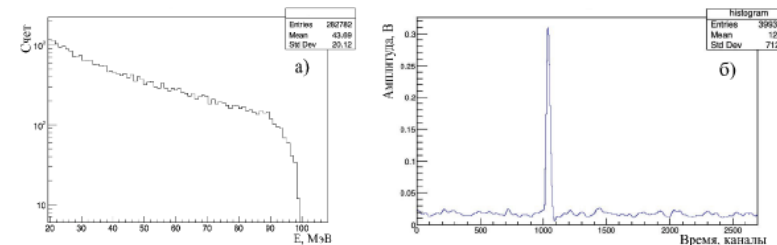


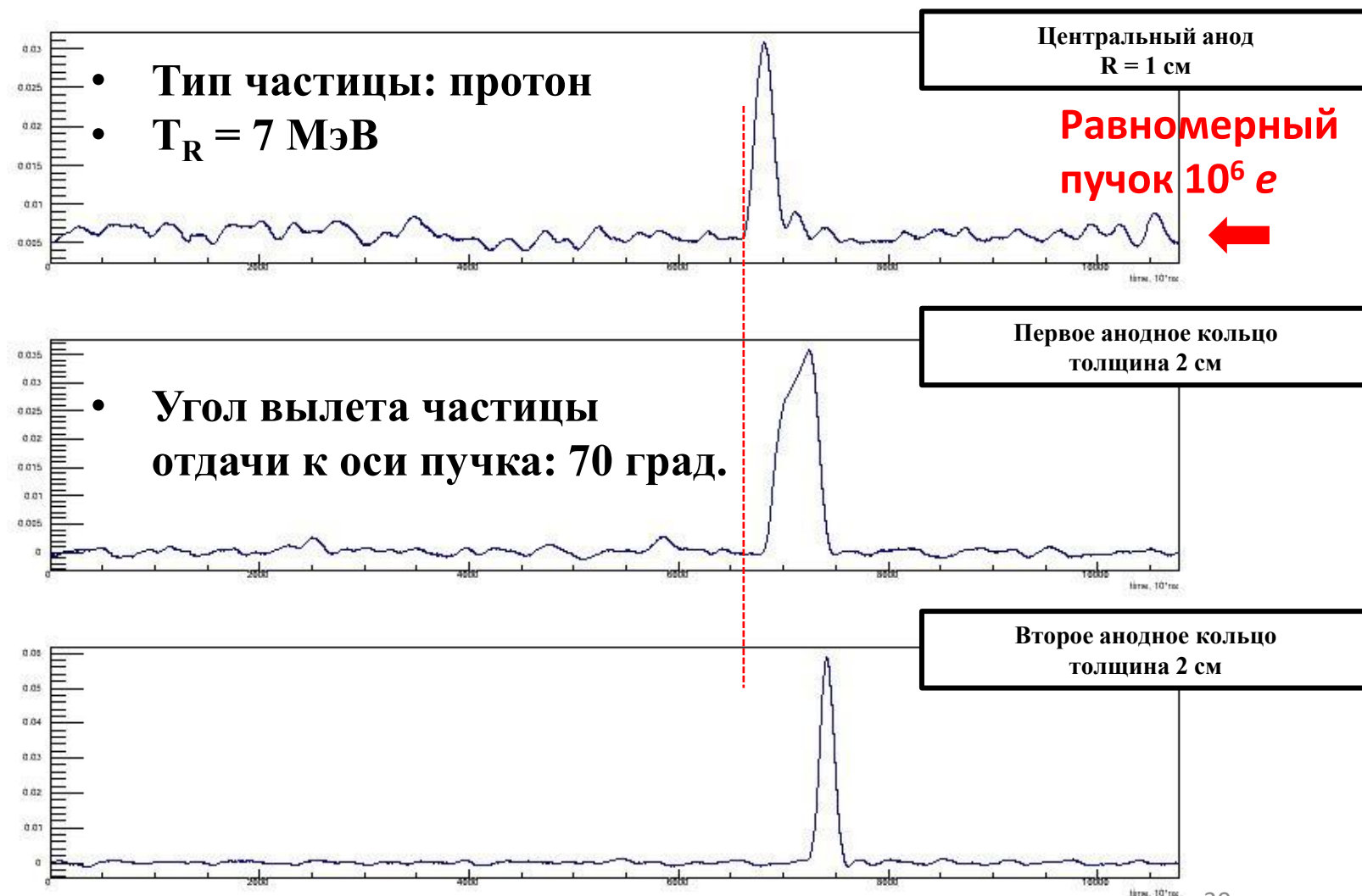
Рис.5. а) Спектр тормозного излучения от пучка электронов с энергией 100 МэВ; б) Пример сигнала от протона отдачи с энергией 5 МэВ с шумами от электроники и налетающего пучка (интенсивность — $2 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$), временной канал — 4 нс.

Разработка программ моделирования

Пример моделированного события

Построена компьютерная Монте-Карло модель ИК АСТАМ, учитывающая физические процессы формирования сигнала частицей отдачи, а также сопутствующие шумы (электронический и шум, наведенный пучком электронов).

Измерения с ИК АСТАМ могут быть прекрасным тестовым экспериментом



$$\chi_m^2 = \frac{\sum_i (E_i^{\text{exp}} \mu_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2}.$$

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПА ЧАСТИЦ ОТДАЧИ В ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

А. Аламури¹, А. А. Дзюба^{2,*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199034, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, 188300, Россия

Метод активной мишени может быть использован для измерения сечений выбивания электронами протонов, дейтронов и ядер гелия из ядер различных газов. Для проведения измерений разработан метод идентификации типа частицы отдачи, основанный на корреляции между величиной пробега частицы и энергией, оставленной ею в детекторе. При этом учитывается угол вылета частицы. Для разработки метода была создана модель Монте-Карло, учитывающая транспорт ионизирующего излучения, функции отклика электроники и ее шумы, а также фоновые наложения от электронов пучка. Модель будет использоваться при планировании эксперимента и обработке полученных данных.

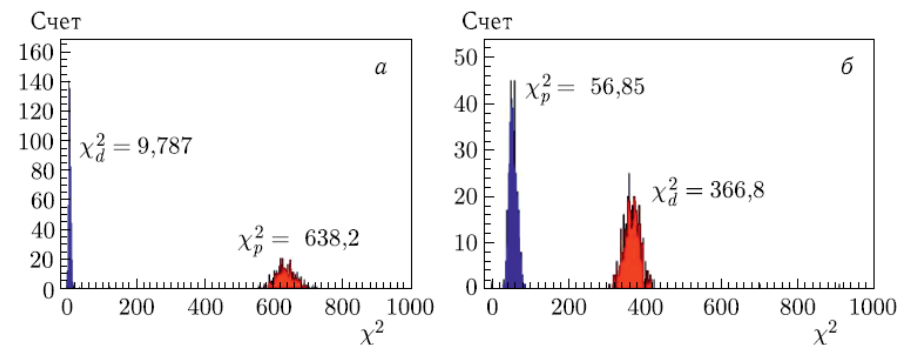
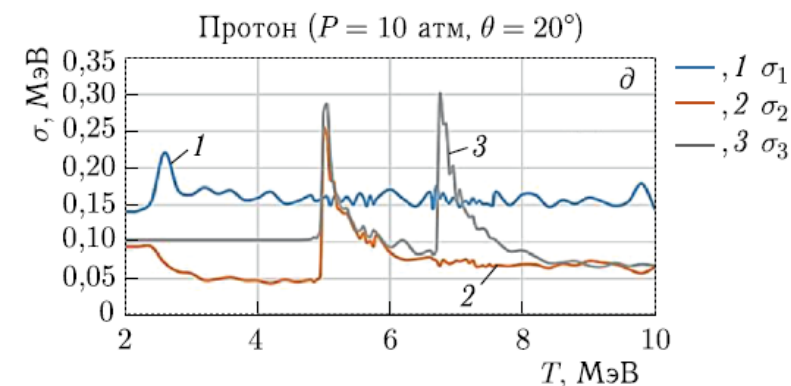
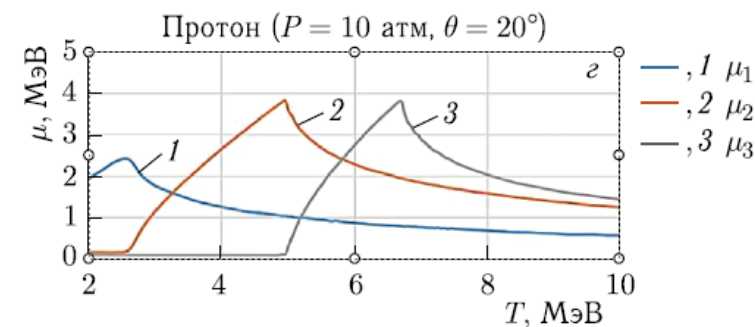
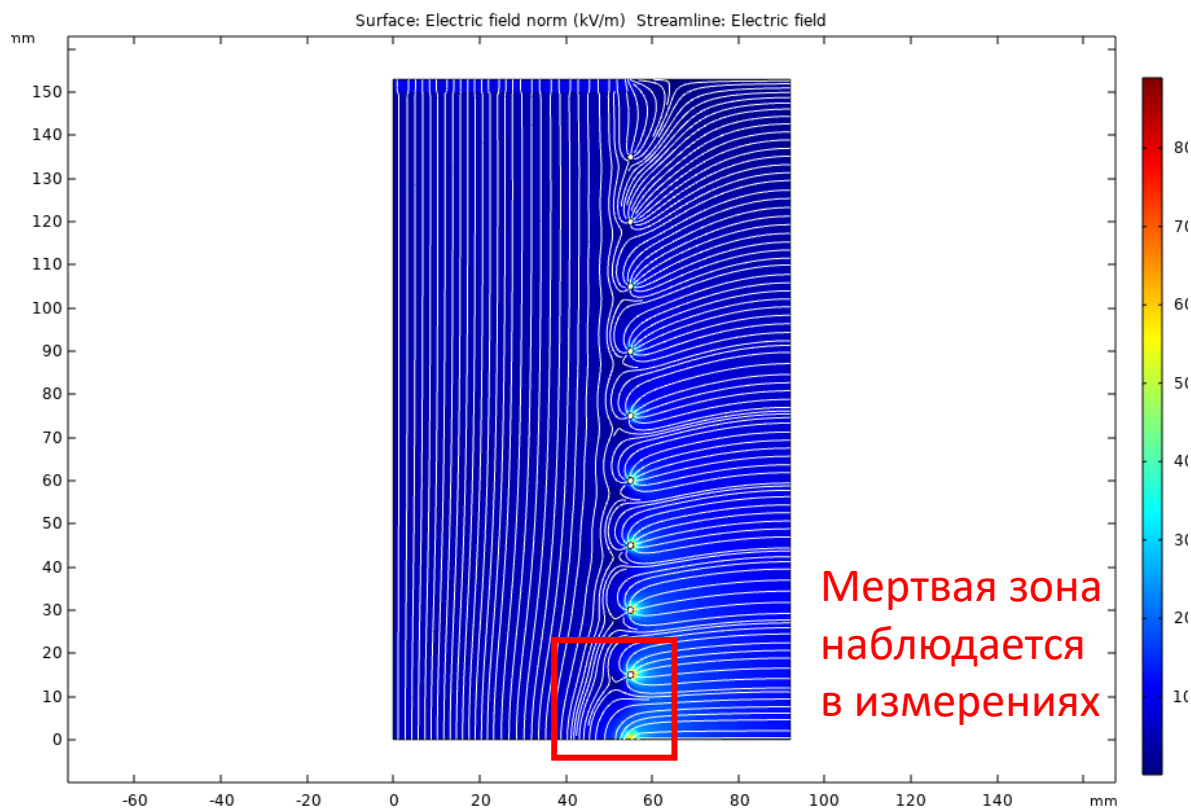


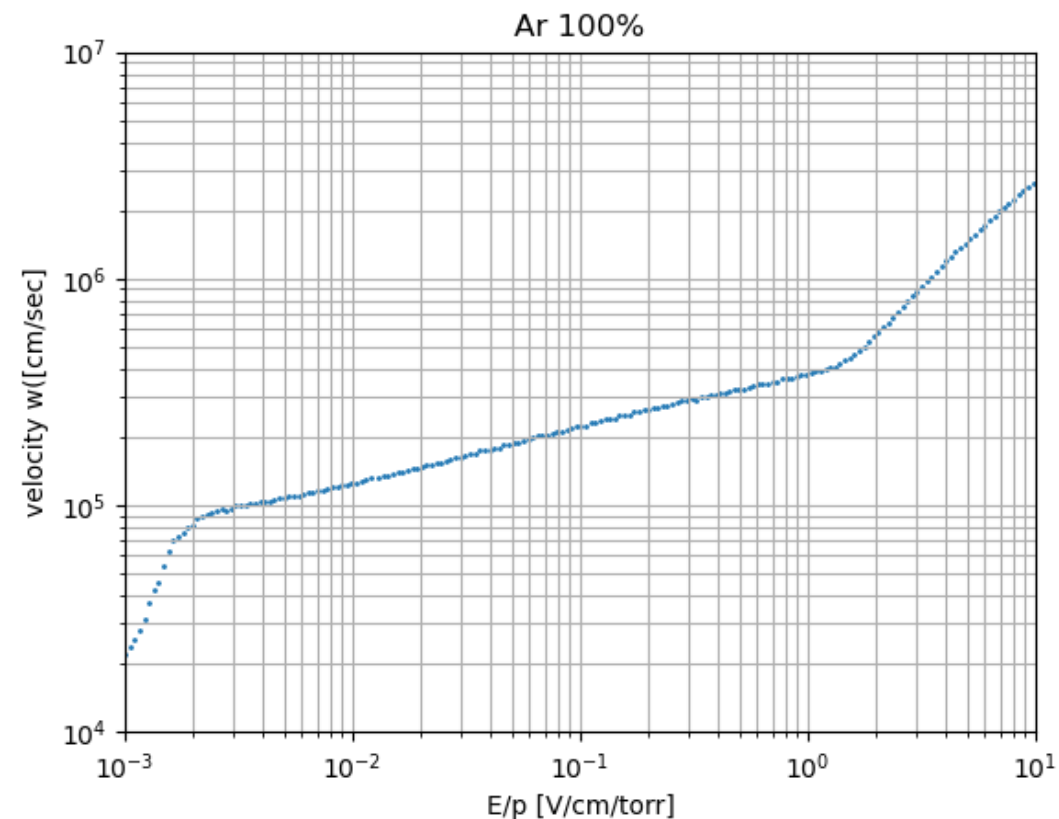
Рис. 5. а) Распределения значений χ_p^2 и χ_d^2 для смоделированного сигнала дейтрона; б) распределения значений χ_p^2 и χ_d^2 для смоделированного сигнала протона

Расчет полей и транспортных свойств газов

Расчет электрических полей (COLMSOL)



Расчет транспортных свойств газов: скорость дрейфа, диффузия, прилипание (Garfield+Magboltz)



Добровольский А.В., Чубыкин А.Д.

Заключение

- **Метод активной мишени** – надежный способ изучать реакции с малым переданным импульсом
- **ОФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ** имеет большой опыт в этой области, научный задел, наработки, а также **программу исследований**:
 - Измерение сечения выбивания нуклонов и кластеров из ядер (ИК АСТАМ)
 - Измерение отношения реальной и мнимой частей амплитуды рассеяния во взаимодействиях протон-гелий на СЦ-1000 (ИК АСТАФ2)
 - Измерение электрической и магнитной поляризуемостей протона (КОМПТОН)
 - Исследование комптоновского рассеяния на гелии-3 → поляризуемость нейтрона (ГАММА-ГЕЛИЙ)
 - Измерение зарядового радиуса протона (ПРОТОН)

С наступающим Новым Годом!



Запасные слайды

LET Theorem

LET позволяет точно рассчитать сечения рассеяния для энергий меньше 100 МэВ):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{LET} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Point} - \rho$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Point} = & \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m}\right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E_{\gamma'}}\right)^2 (1 + \cos^2\theta_\gamma + \frac{E_\gamma E_{\gamma'}}{m^2} \times \\ & \times ((1 - \cos\theta_\gamma)^2 + a_0 + a_1 \cos\theta_\gamma + a_2 \cos^2\theta_\gamma)) \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{e^2}{m} \left(\frac{E_\gamma}{E_{\gamma'}}\right)^2 (E_\gamma E_{\gamma'}) \left(\frac{\alpha + \beta}{2} (1 + \cos\theta_\gamma)^2 + \frac{\alpha - \beta}{2} (1 - \cos\theta_\gamma)^2\right)$$

$$a_0 = 2k + \frac{9}{2}k^2 + 3k^3 + \frac{3}{4}k^4$$

$$a_1 = -4k - 5k^2 - 2k^3$$

$$a_2 = -4k - 5k^2 - 2k^3$$

Параметры $a_{0,1,2}$ задаются с помощью зависимости от аномального магнитного момента

Данные по поляризуемости протона

	$\alpha, \cdot 10^{-4} fm^3$	$\beta, \cdot 10^{-4} fm^3$	Ref
1	9.0 ± 2.0	2.0 ± 2.0	V.I. Goldansky, Elastic γ -p scattering at 40 to 70 MeV and polarizability of the proton. Nuclear Physics, 18:473–491, 1960.
2	10.7 ± 1.1	-0.7 ± 1.6	P. Baranov, New experimental data on the proton electromagnetic polarizabilities. Physics Letters B, 52(1):122–124, 1974.
3	$10.9 \pm 2.2 \pm 1.3$	$3.3 \pm 2.2 \pm 1.3$	F. J. Federspiel, Proton compton effect: A measurement of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. Lett., 67:1511–1514, Sep 1991.
4	$10.6 \pm 1.22 \pm 1.05$	$3.6 \pm 1.22 \pm 1.05$	A. Zieger, 180° compton scattering by the proton below the pion threshold. Physics Letters B, 278(1):34–38, 1992
5	$9.8 \pm 0.4 \pm 1.1$	$4.4 \pm 0.4 \pm 1.1$	E. L. Hallin, Compton scattering from the proton. Phys. Rev. C, 48:1497–1507, Oct 1993.
6	$12.5 \pm 0.6 \pm 0.7 \pm 0.5$	$1.7 \pm 0.6 \pm 0.7 \pm 0.5$	B. E. MacGibbon, Measurement of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. C, 52:2097–2109, Oct 1995.
7	$11.9 \pm 0.5 \pm 1.3 \pm 0.3$	$1.2 \pm 0.7 \pm 0.3 \pm 0.4$	V. Leon, Low-energy compton scattering and the polarizabilities of the proton. The European Physical Journal A, 10:207–215, 04 2001.
8	$10.99 \pm 0.16 \pm 0.47 \pm 0.17 \pm 0.34$	$3.14 \pm 0.21 \pm 0.24 \pm 0.20 \pm 0.35$	P.P. Martel, Measurement of compton scattering at mami for the extraction of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. Phys. Rev. Lett., 128:132503, Apr 2022
9	11.2 ± 0.4	2.5 ± 0.4	R. L. Workman and Others. Review of Particle Physics. PTEP, 2022:083C01, 2022.

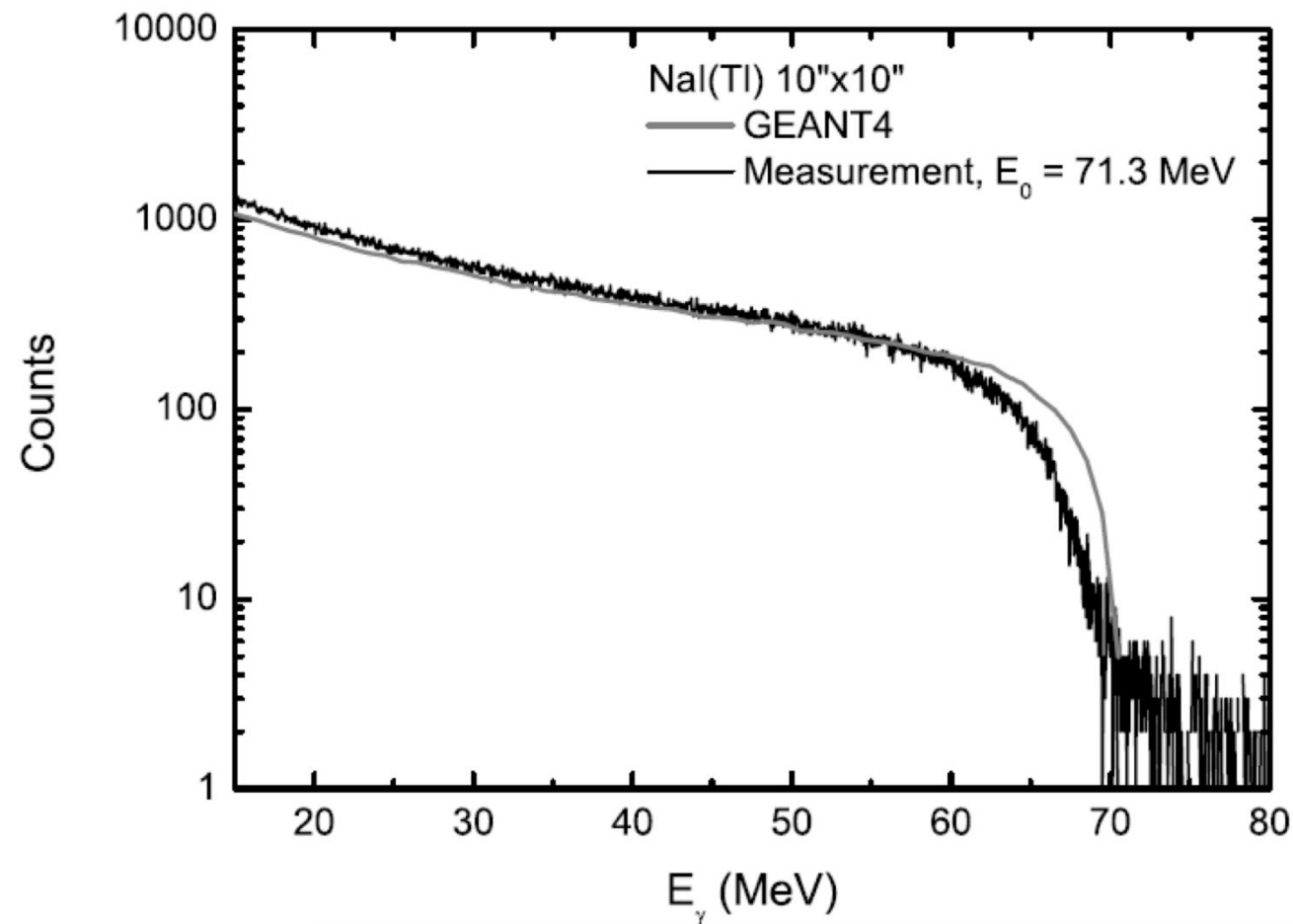
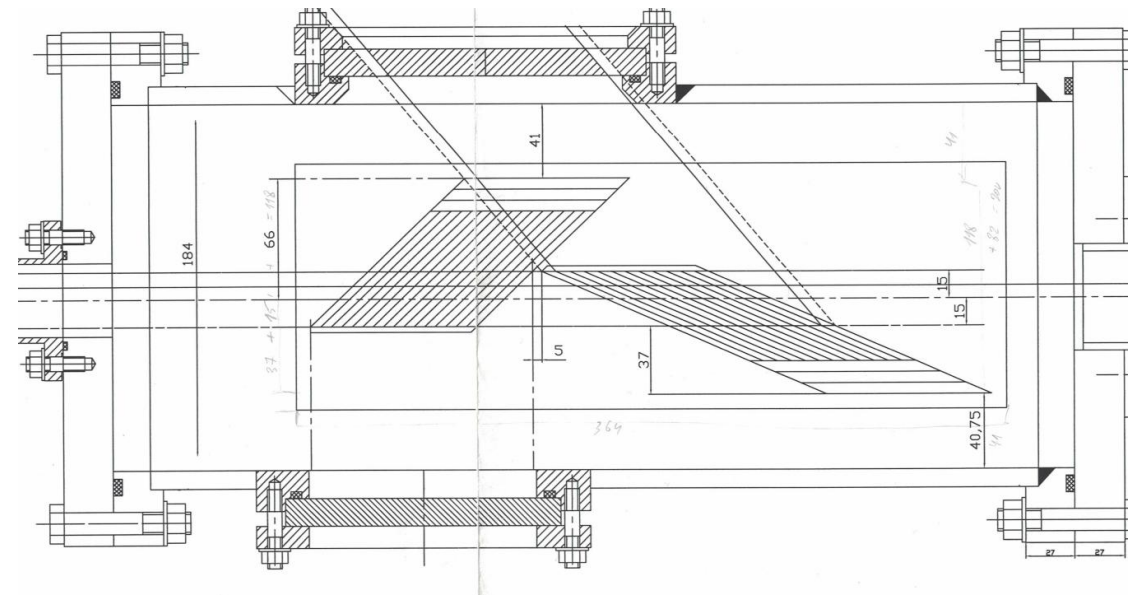
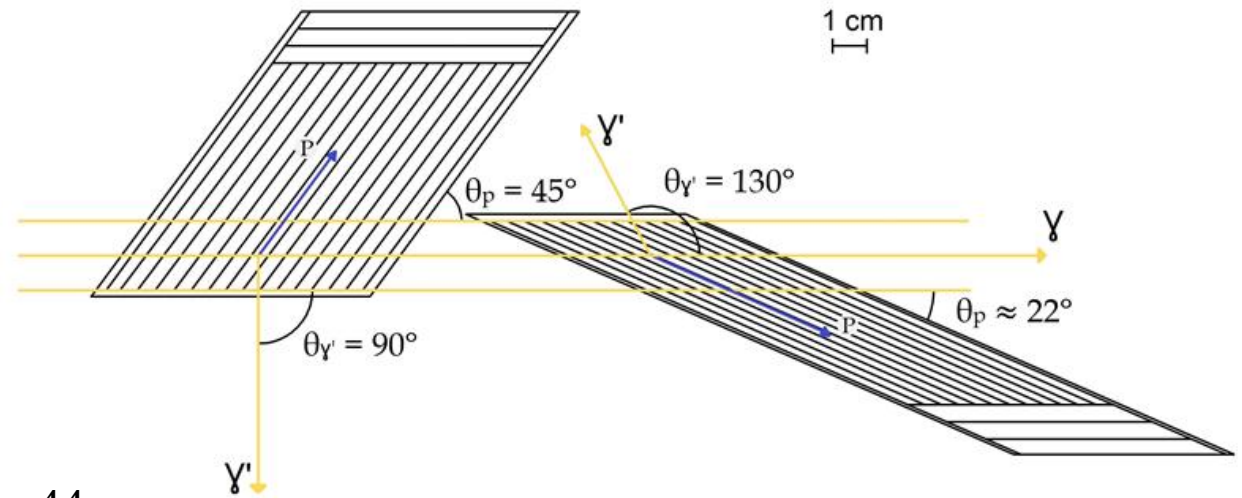
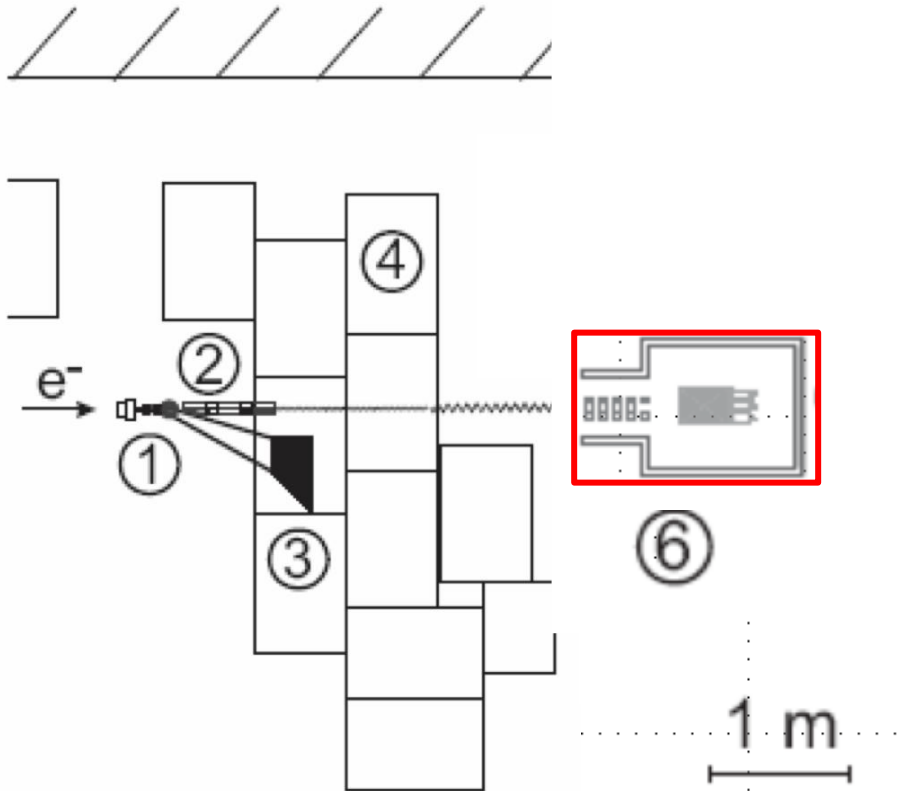


Рис. N Сравнение спектра, измеренного в детекторе с кристаллом 10''x10'' при 0° (черная линия), с моделируемым нормированным спектром (серая линия) при $E_0 = 71.3$ МэВ. Время измерения составило 40 минут при токе электронного пучка 200 пА.

- Расстояние катод-сетка (мм) - 26
- Расстояние катод-сетка (мм) - 1
- Зазор между сеточными проволоками (мм) - 0.5
- Диаметр проволоки (мм) - 0.055
- Ширина основных анодных стрипов(мм)
- для первой и второй ИК, соответственно - 3 и 4
- Зазор между стрипами (мм) - 0.3
- Направление основных стрипов в первой ИК (град) - 44
- Число основных стрипов в первой ИК - 15
- Длина основных стрипов в первой ИК (мм) - 90
- Направление основных стрипов во второй ИК (град) - 22
- Число основных стрипов во второй ИК - 12
- Длина основных стрипов во второй ИК (мм) - 120
- Число дополнительных стрипов в каждой ИК - 3
- Ширина дополнительных стрипов в каждой ИК- 6
- Число анти стрипов в каждой ИК - 3
- Ширина анти стрипов в каждой ИК- 2



Предлагаемая схема измерения (спектр γ)



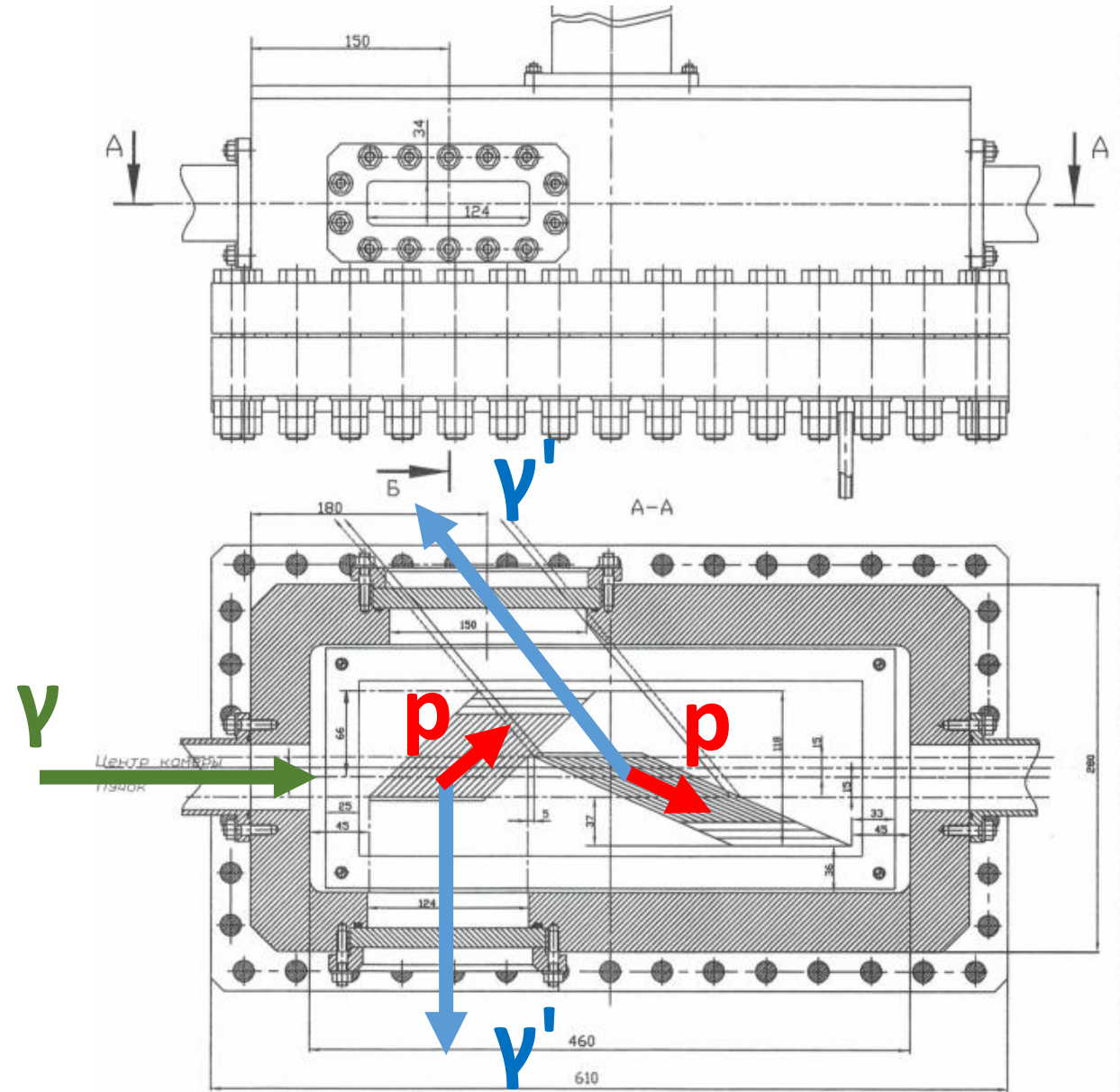
1. Преобразователь тормозного излучения и дипольный магнит;
2. Коллимационная система;
3. Сброс для электронного пучка;
4. Бетонная (+свинец, полиэтилен) защита;

6. γ -спектрометр;

Тестовый эксперимент в ТУ Дармштадт

Ионизационная камера для проекта КОМПТОН

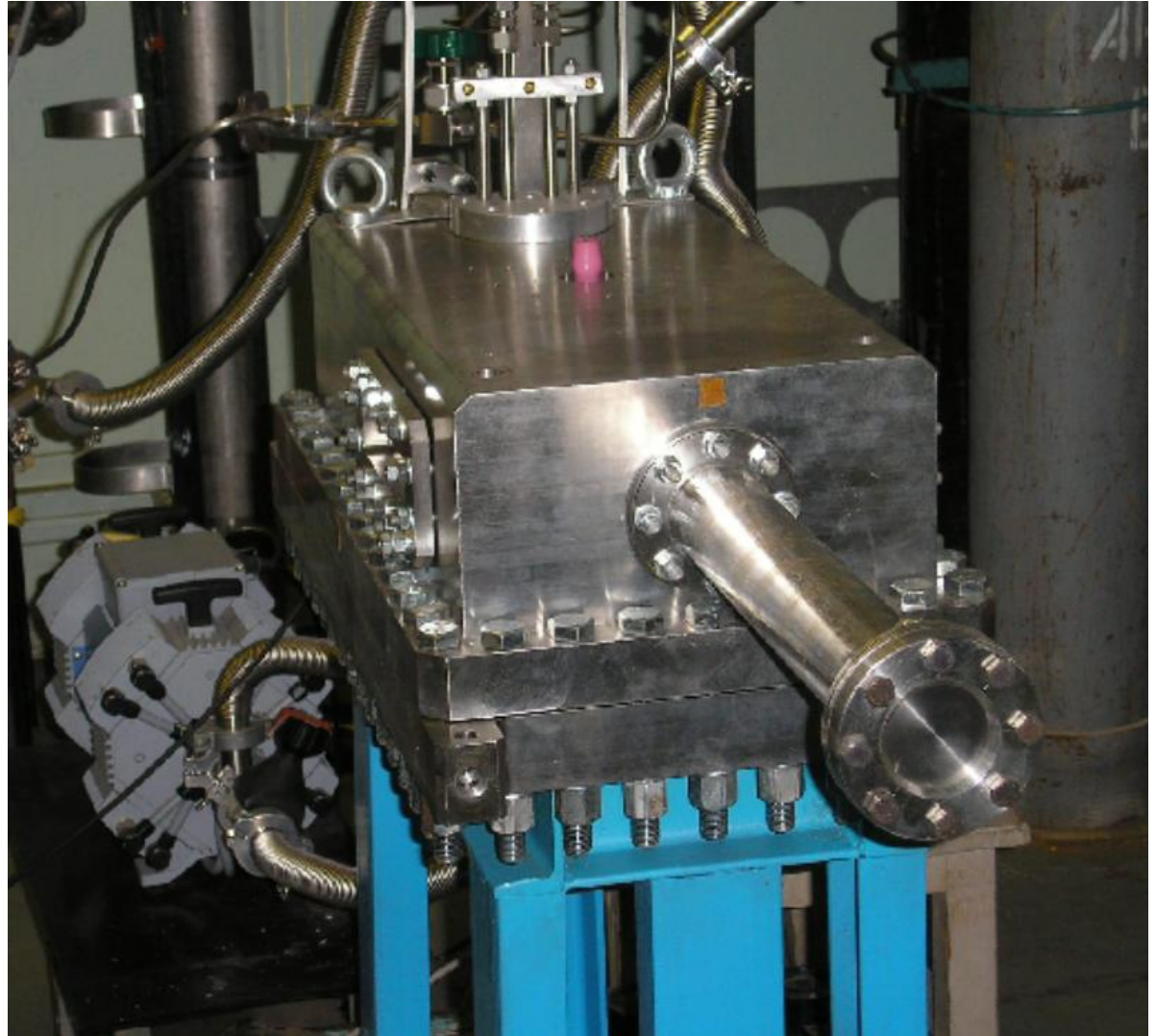
- Созданная в НИЦ «Курчатовский Институт» – ПИЯФ ИК, первоначально предполагалась использоваться на ускорителе MESA (Майнц, Германия).
- Данная камера обеспечивает необходимые требования по регистрации угла и энергии протонов отдачи, при наполнении объёма камеры до **давления ~75 атм**, в процессе комптоновском рассеяния фотонов с энергией 15-140 МэВ под углами 90 ± 5 и 130 ± 5 градусов.
- Для этого в ней установлены две последовательные анодные плоскости
- Корпус камеры изготовлен из нержавеющей стали с толщиной стенок 50 мм.
- Фотонный пучок входит (выходит) из камеры через бериллиевые окна диаметром 50 мм и толщиной 8 мм.



Чертежи ионизационной камеры в двух проекциях⁴⁰

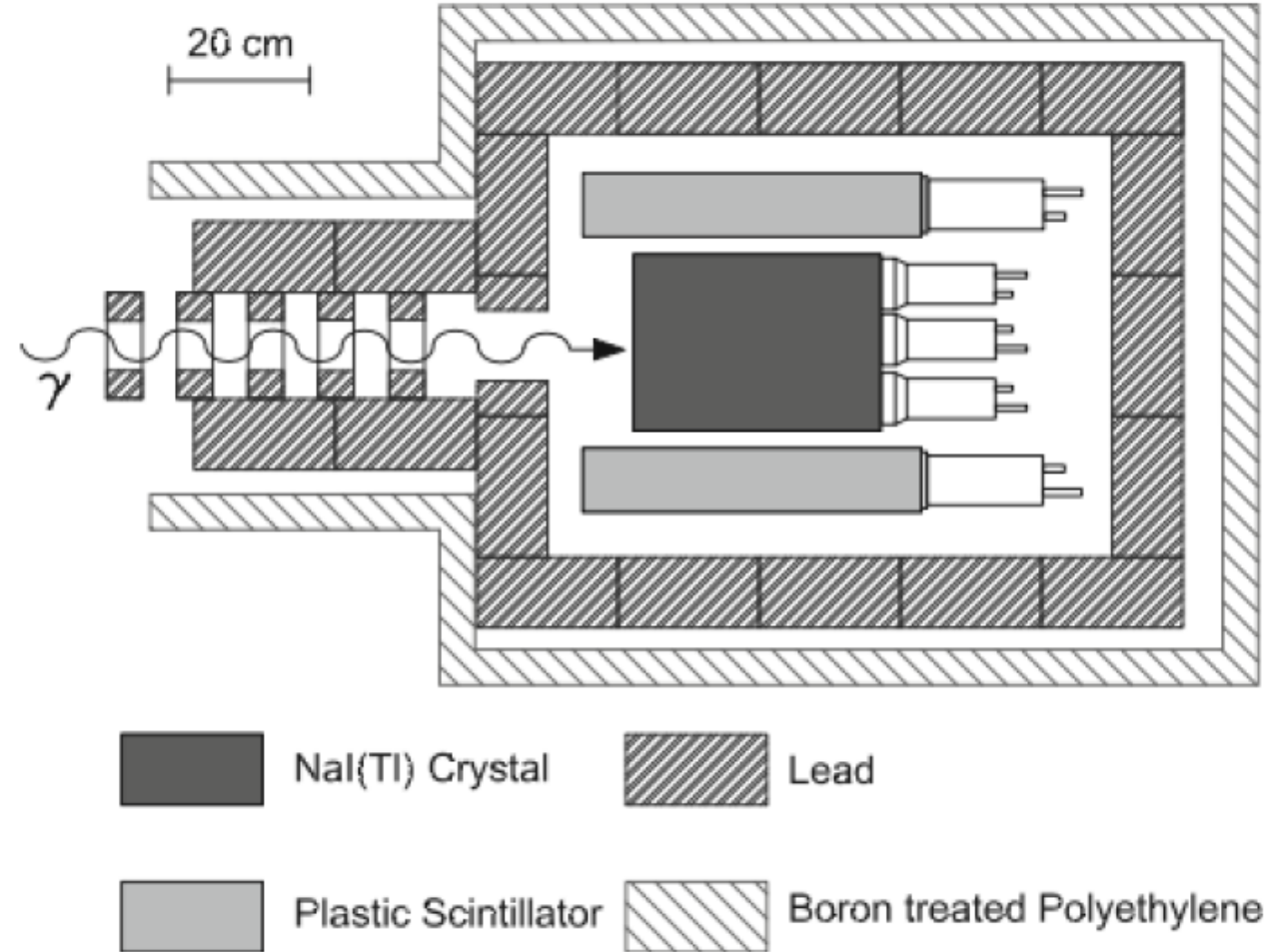
Ионизационная камера для проекта КОМПТОН

- Рассеянные на водороде комптоновские фотоны под выбранными углами $\vartheta\gamma = 90^\circ \pm 5^\circ$ и $\vartheta\gamma = 130^\circ \pm 5^\circ$ вылетают из ионизационной камеры через 15 мм бериллиевые окна в направлении гамма-спектрометров.
- Объем камеры составляет ~ 10 литров.
- ИК работает в режиме сбора электронов, т.е. сигналы образуются от электронов, собранных после ионизации, произведенной протонами.
- Высокое напряжение приложенное к катоду составляет -70 кВ, к сетке -3.5 кВ, при нулевом потенциале анода.
- Время дрейфа электронов составляет ~ 5 мкс и ~ 0.12 мкс для промежутка катод-сетка и сетка-анод, соответственно.

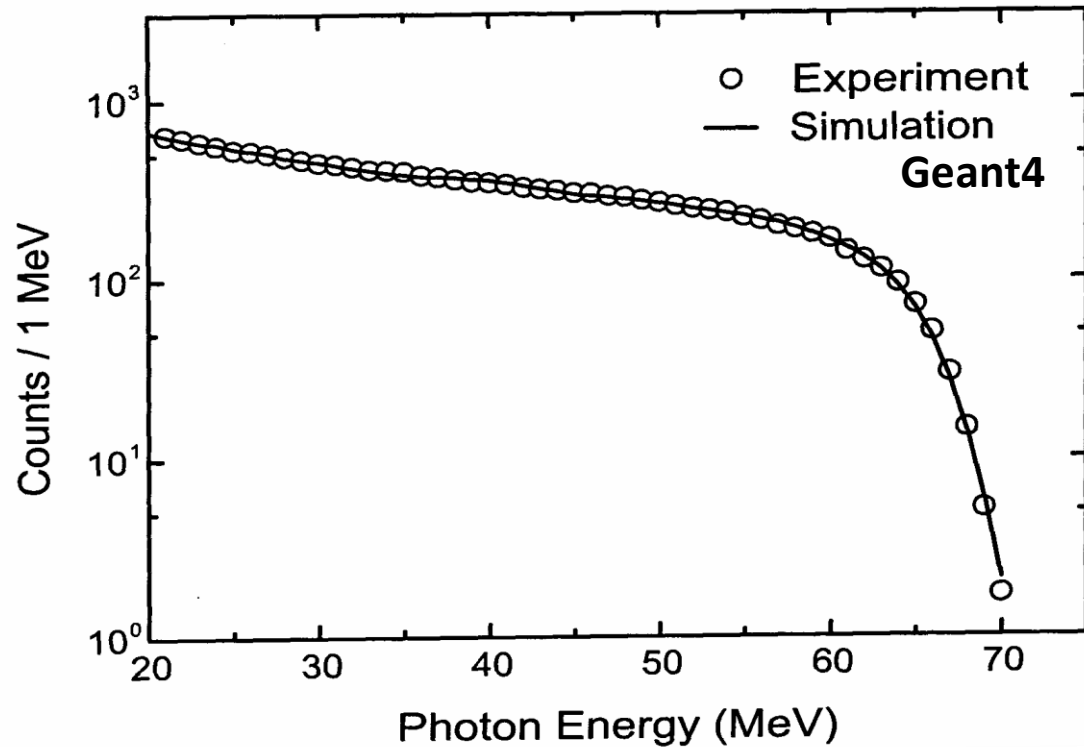


Сцинтилляционные спектрометры

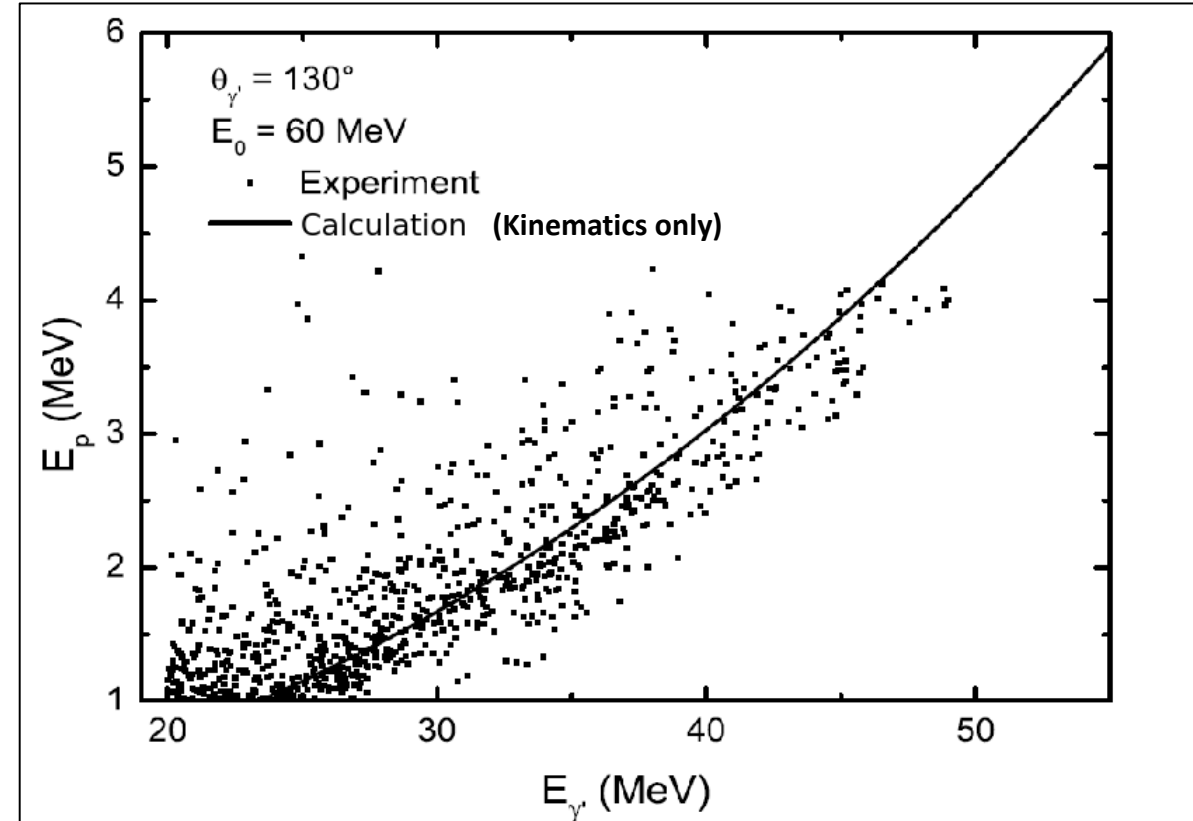
- Предполагалось, что спектрометры (NaI) будут изготовлены в Германии
- **В распоряжении ОФВЭ имеются детекторы, которые могут быть использованы для этих измерений**
- Разработка спектрометра планируется в первой половине 2025 г.



Результаты тестового измерения в Германии



Пучок фотонов, полученный из пучка электронов с энергией 70 МэВ

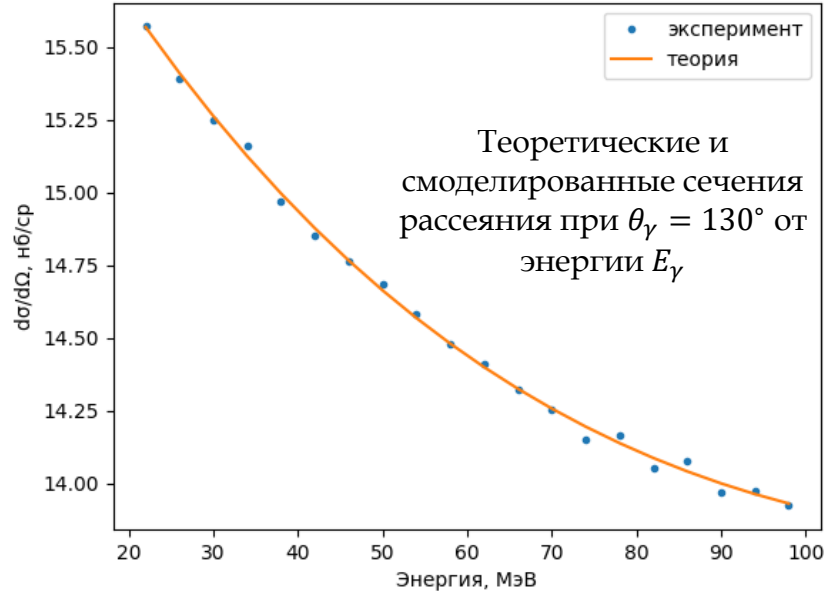


Корреляционный (тестовый эксперимент),
выполненный на фотонном пучке, полученном
из пучка электронов с энергией 60 МэВ

Необходимо увеличить статистику!

Требования к пучку и ожидаемая погрешность

- Выведенный электронный пучок с энергией 140 МэВ
- Ток пучка 50 мкА
- Ожидаемая скорость набора 5 Гц
- Продолжительность сеанса 500 часов



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

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

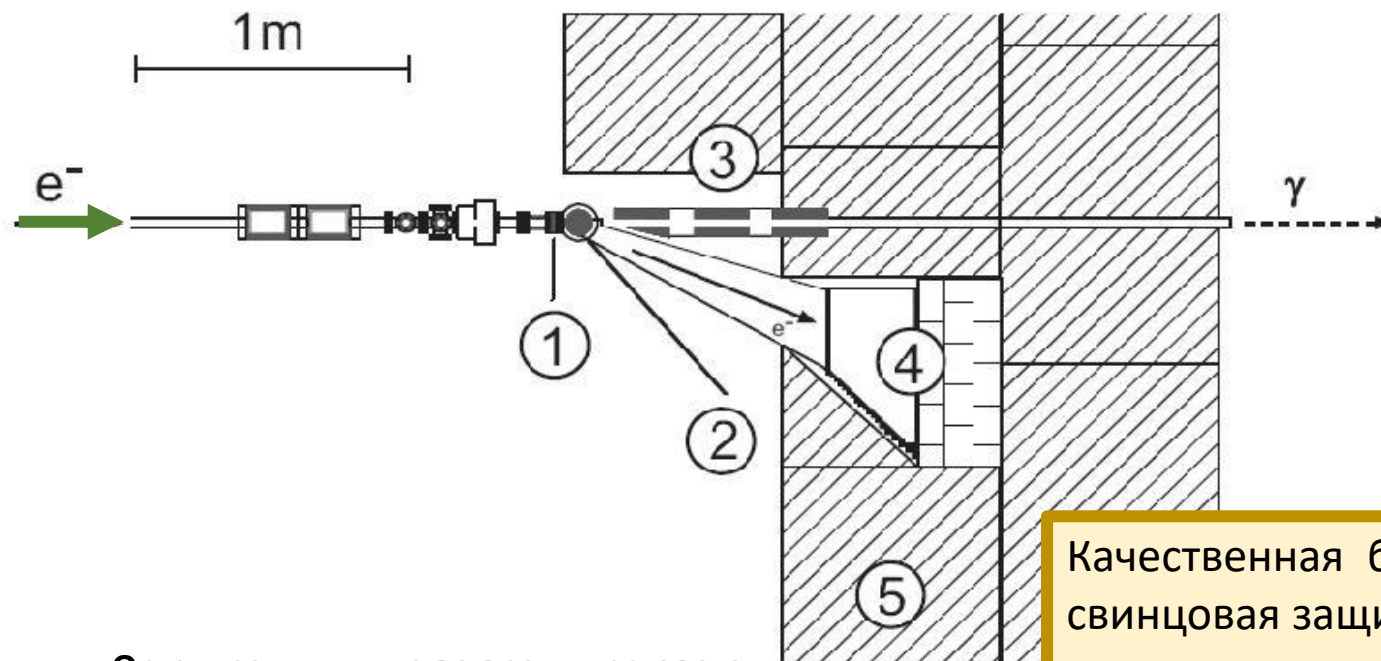
Активная мишень: $\Delta\alpha = [0.07_{stat} \pm 0.11_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

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

Организация пучка фотонов

Основные требования к пучку электронов:

1. Выведенный электронный пучок с энергией ~ 140 MeV и интенсивностью ~ 50 mA.
2. Временная структура пучка – равномерный (или почти равномерный) во времени пучок электронов. Фактор заполнения больше 50%.



Организация пучка во время тестового измерения в Германии

Качественная бетонная и свинцовая защита для остановки электронного пучка.

Важно до минимума снизить фон от нейтронов.

1 – bremsstrahlung converter target (0.3mm gold), 2 – cleaning magnet, 3 – γ - beam collimator, 4 – electron beam dump (Faraday cup), 5 – concrete shielding

Ускоритель ЛИНАК (Дубна)



- Линейный ускоритель электронов
- FLAP Collaboration
 - Fundamental & applied Linear Accelerator Physics collaboration
 - Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 338–353
- 2024-12-10 – Доклад Алексей Дзюба "**Метод активной мишени. Перспективы использования и физические задачи для электронных пучков**"
- 2024-12-13 – официальное начало пуско-наладочных работ
- 200-300 МэВ уже сейчас
- 500+ МэВ в будущем
- Выведанные пучки 60, 100 и 200 МэВ

Предложение ОФВЭ → FLAR

- Провести измерения электрической и магнитной поляризуемостей протона методом активной мишени
 - Статистика 10^7 набранных событий, что в 10 раз больше, чем в других экспериментах
 - Систематические ошибки будут также существенно уменьшены, так как измерения сечений будут выполнены в диапазоне энергий гамма квантов 20-120 МэВ, где теория практически не имеет модельных ошибок.
 - Впервые будут выполнены измерения в области малых энергий фотонов (20-40 МэВ), что позволит произвести нормировку на теорию и практически убрать систематику, связанную с определением абсолютного потока гамма-квантов, числом ядер в мишени и угловым захватом гамма-детекторов
- В случае успеха, исследования могут быть продолжены на других газах
 - Эксперименты на дейтерии и гелии-3, позволят измерить электрическую и магнитную поляризуемости нейтронов
 - Точность может быть улучшена в 2-3 раза!