



Эксперименты с активными мишенями

Дзюба Алексей

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

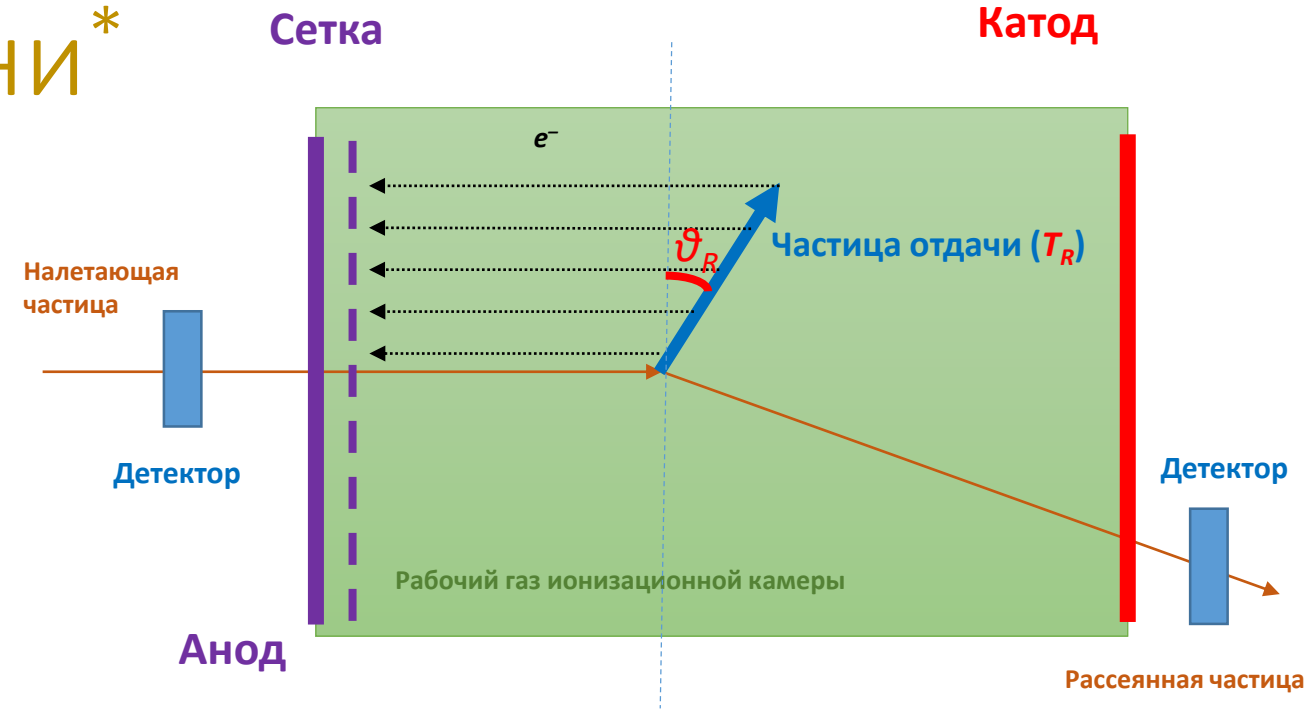
Сессия Ученого Совета ОФВЭ, 25 декабря 2024 г.

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](#))
 - **SPS M2**-beamline, **AMBER** / NA66 (CERN) – измерение зарядового радиуса протона в упругом μp -рассеяние
 - **MESA** (г. Майнц, Германия) – измерение поляризуемости нуклона
 - **R³B** (FAIR, г. Дармштадт, Германия) – изучение свойств экзотических ядер
- 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**

AMBER / NA66

Создание ИК для эксперимента AMBER

- Одна из целей коллаборации AMBER – прецизионное измерение зарядового радиуса протона путем исследования упругого мюон-протонного рассеяния
 - Совместное предложение ОФВЭ и сотрудничества COMPASS
 - Эксперимент **AMBER** (NA66)
- Группа НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ **участвовала в пилотных измерениях (ИКАР)**, а также **разработала и сопровождала изготовление ионизационной камеры, рассчитанной на давление 20 атм.**
- В настоящее время сотрудничество ЦЕРН-РФ прекращено решением Совета ЦЕРН



Прекращение сотрудничества с ЦЕРН

- 2022-23 гг. – неопределенность со статусом российских институтов в ЦЕРН
 - С 2022 г. решению менеджмента ЦЕРН «Меморандум о взаимопонимании» структурам НИЦ КИ для подписания не высылался!
 - Декабрь 2023 г. решение Совета ЦЕРН о прекращении сотрудничества с РФ
 - Сотрудничество AMBER не предложило способов официального продолжения научного сотрудничества
- Обязательства НИЦ КИ - ПИЯФ (в большей степени моральные) перед сотрудничеством AMBER выполнены в более чем полном объеме
- **Возобновление сотрудничества возможно только в официальном режиме!**
- Решением Совета AMBER сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ рассматриваются соавторами будущих статей по тематике измерения зарядового радиуса протона
 - *The AMBER Collaboration board recognizes the contribution of PNPI to the development of active target technology and the preparation of an experiment proposed by AMBER Collaboration on precision measurement of the proton charge radius. The AMBER Collaboration board recognizes the current members of the PNPI group as co-authors of all scientific works that have been and will be carried out using the active target technique and will include them and their affiliation (possibly by ORCID identifier) in the list of authors of the related scientific publications in agreement with AMBER publication rules. Access to AMBER data (including data on disk, AMBER software, PRM-related meetings) will be granted to current members of AMBER-PNPI group. All steps will be taken in agreement with the present and future CERN regulations. Current composition of PNPI group is Aleksei Dziuba, Eugeny Maev, Aleksandr Vassiliev, Anastasiya Arutyunova (PhD student).*

- Acknowledgment for Alexey Vorobyev (PRM result paper)
- Authors which made contributions in past (one publication on specific topic)
 - **2021 data:** Aleksandr Inglessi (run coordinator)
 - **2023 data:** Kuzma Ivshin, Aleksandr Solovov
 - **IKAR new inner structure:** Oleg Maev (spring 2021)
 - **Main TPC design:** Marat Vznuzdaev

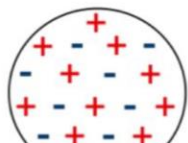
Will be also nice to have

Поляризуемость нуклонов

Поляризуемость протона

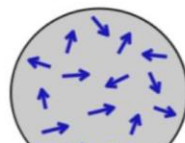
- **Поляризуемость** – одно из фундаментальных свойств нуклона, которое характеризует степень его деформации под действием внешнего электромагнитного поля.
- Поляризуемость (**электрическую** (α) и **магнитную** (β)) можно определить при измерении зависимостей дифференциальных сечений комптоновского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

электрическая поляризуемость

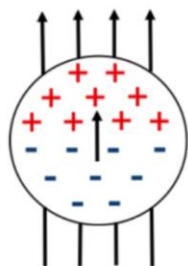


$$D = 0$$

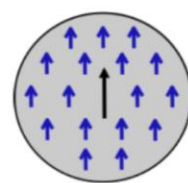
магнитная поляризуемость



$$M = 0$$

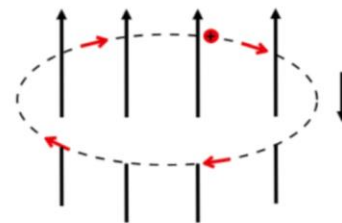


$$D = \alpha E$$



парамагнитная

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



диамагнитная

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

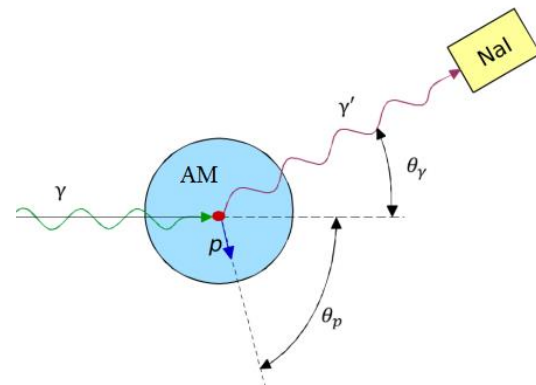
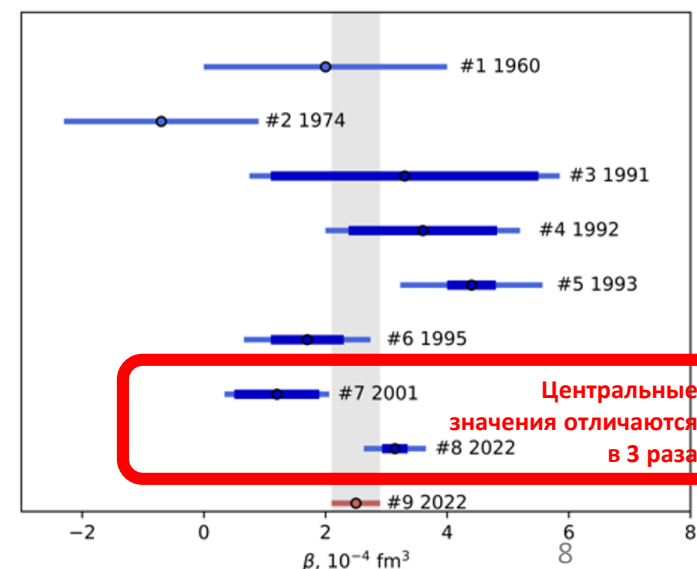
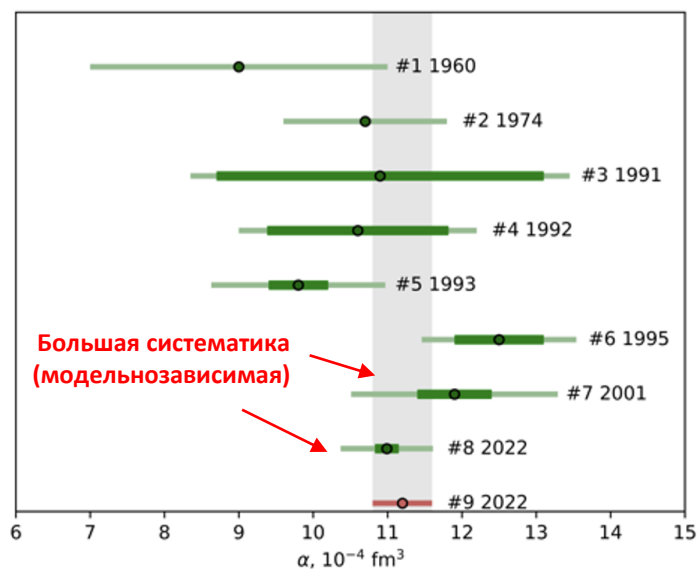


Схема планируемого эксперимента по измерению поляризуемости нуклонов



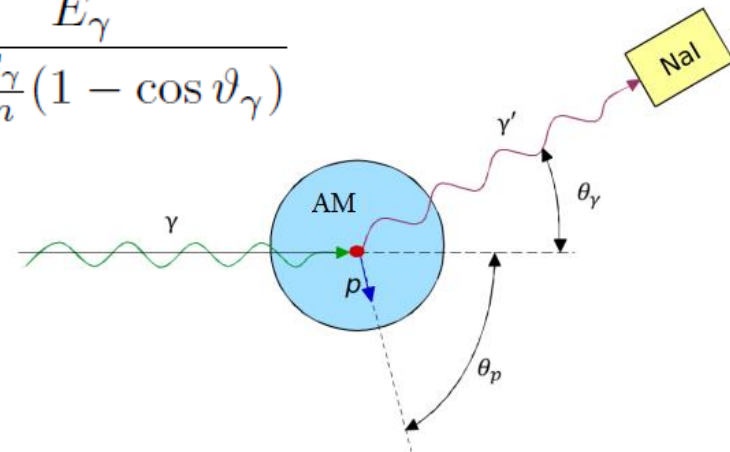
Идея измерения

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

Безмодельный расчёт сечения!

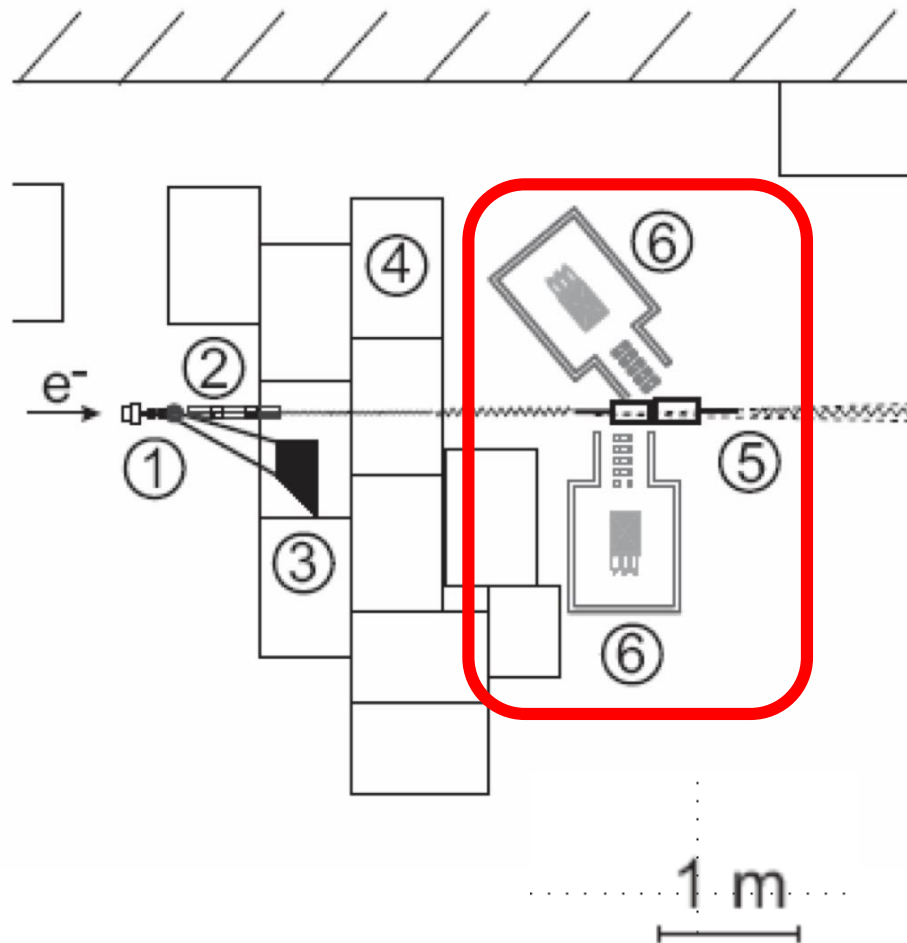
$$\left[\frac{d\sigma(E_\gamma, \vartheta_\gamma)}{d\Omega} \right]_{LET} = \left[\frac{d\sigma(E_\gamma, \vartheta_\gamma)}{d\Omega} \right]_{point} - \rho + \mathcal{O}(E_\gamma^4),$$
$$\rho = \frac{e^2}{4\pi m} \left(\frac{E_{\gamma'}}{E_\gamma} \right)^2 (E_\gamma \cdot E_{\gamma'}) \left[\frac{\bar{\alpha}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

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



- 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

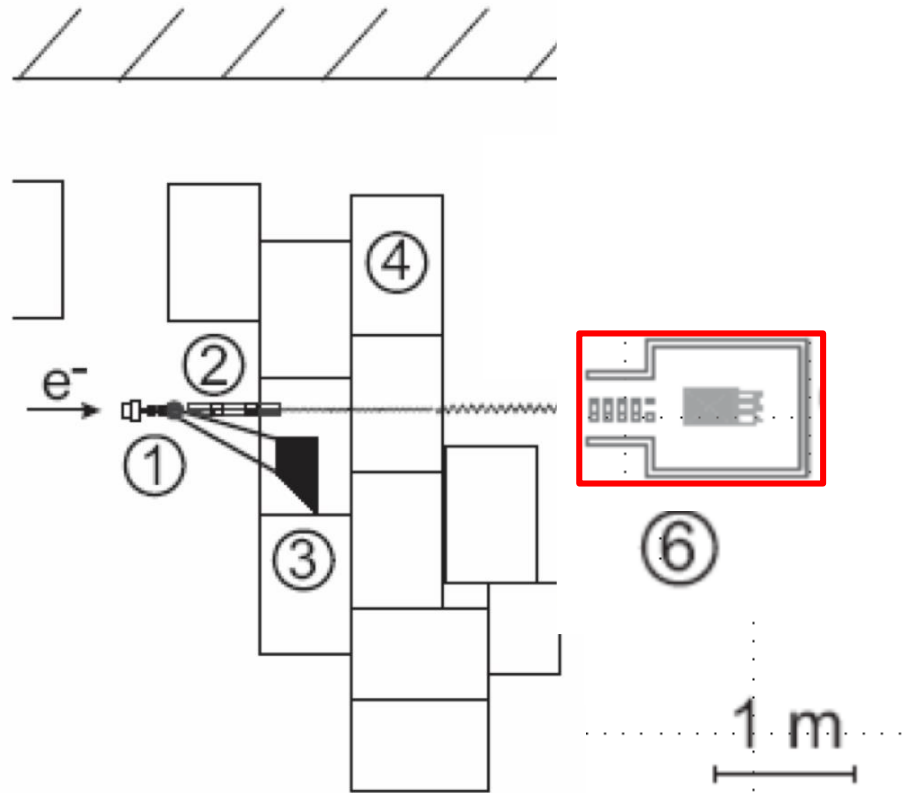


1. Преобразователь тормозного излучения и дипольный магнит;
2. Коллимационная система;
3. Сброс для электронного пучка;
4. Бетонная (+свинец, полиэтилен) защита;

5. Ионизационные камеры высокого давления;
6. γ -спектрометр;

Тестовый эксперимент в ТУ Дармштадт

Предлагаемая схема измерения (спектр γ)



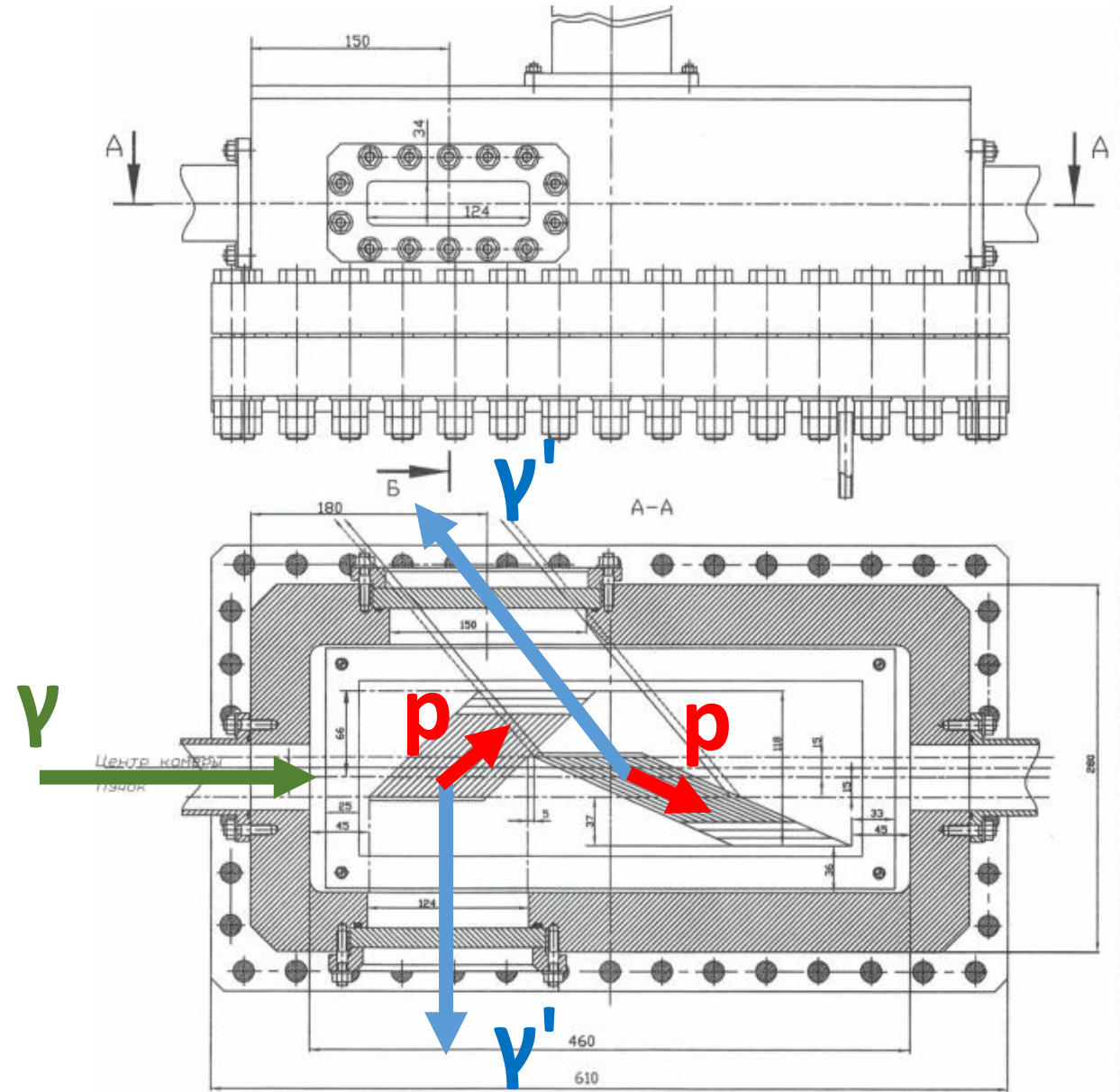
1. Преобразователь тормозного излучения и дипольный магнит;
2. Коллимационная система;
3. Сброс для электронного пучка;
4. Бетонная (+свинец, полиэтилен) защита;

6. γ -спектрометр;

Тестовый эксперимент в ТУ Дармштадт

Ионизационная камера для проекта КОМПТОН

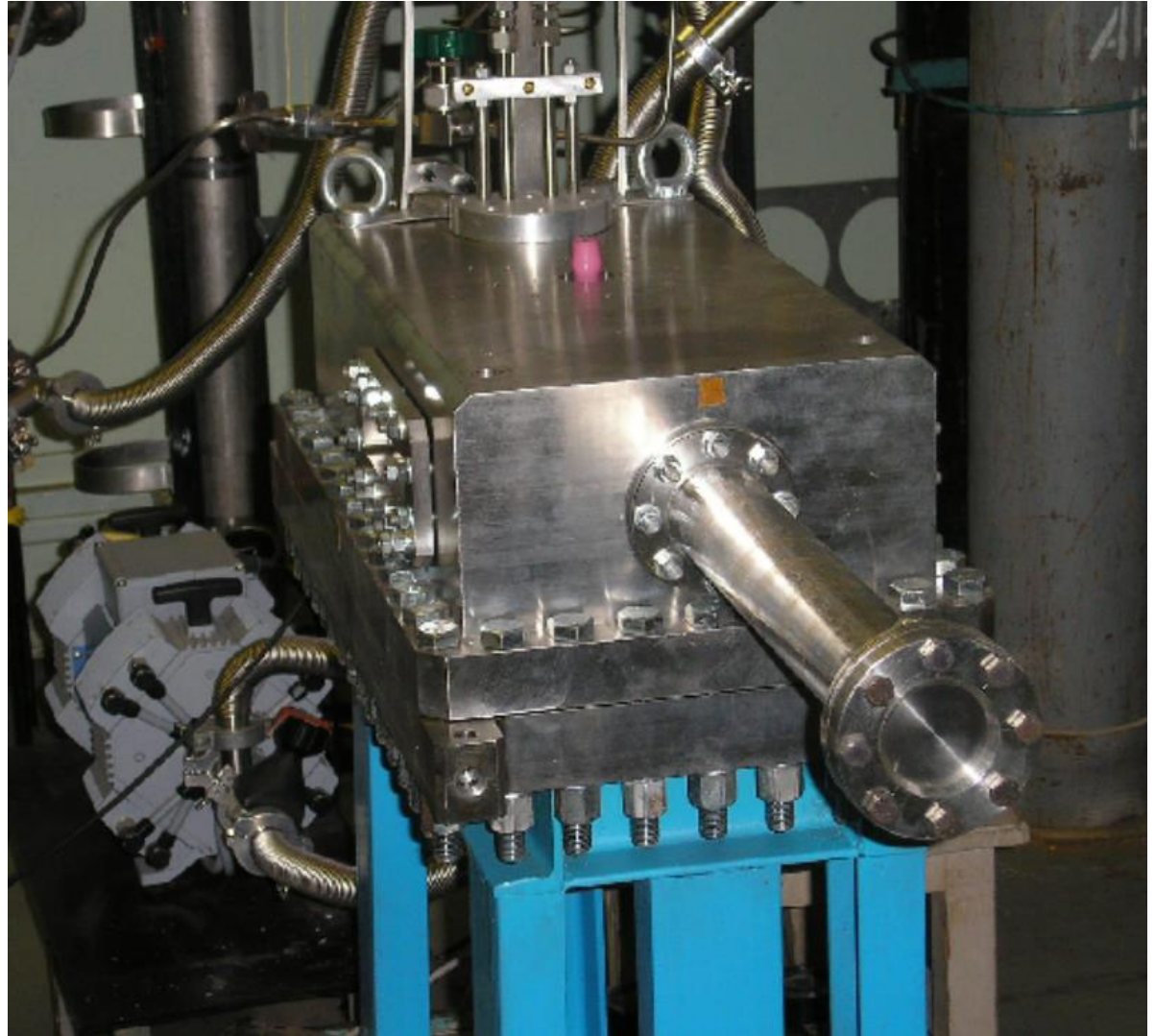
- Созданная в НИЦ «Курчатовский Институт» – ПИЯФ ИК, первоначально предполагалась использоваться на ускорителе MESA (Майнц, Германия).
- Данная камера обеспечивает необходимые требования по регистрации угла и энергии протонов отдачи, при наполнении объёма камеры до **давления ~ 75 атм**, в процессе комптоновском 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 проекциях¹²

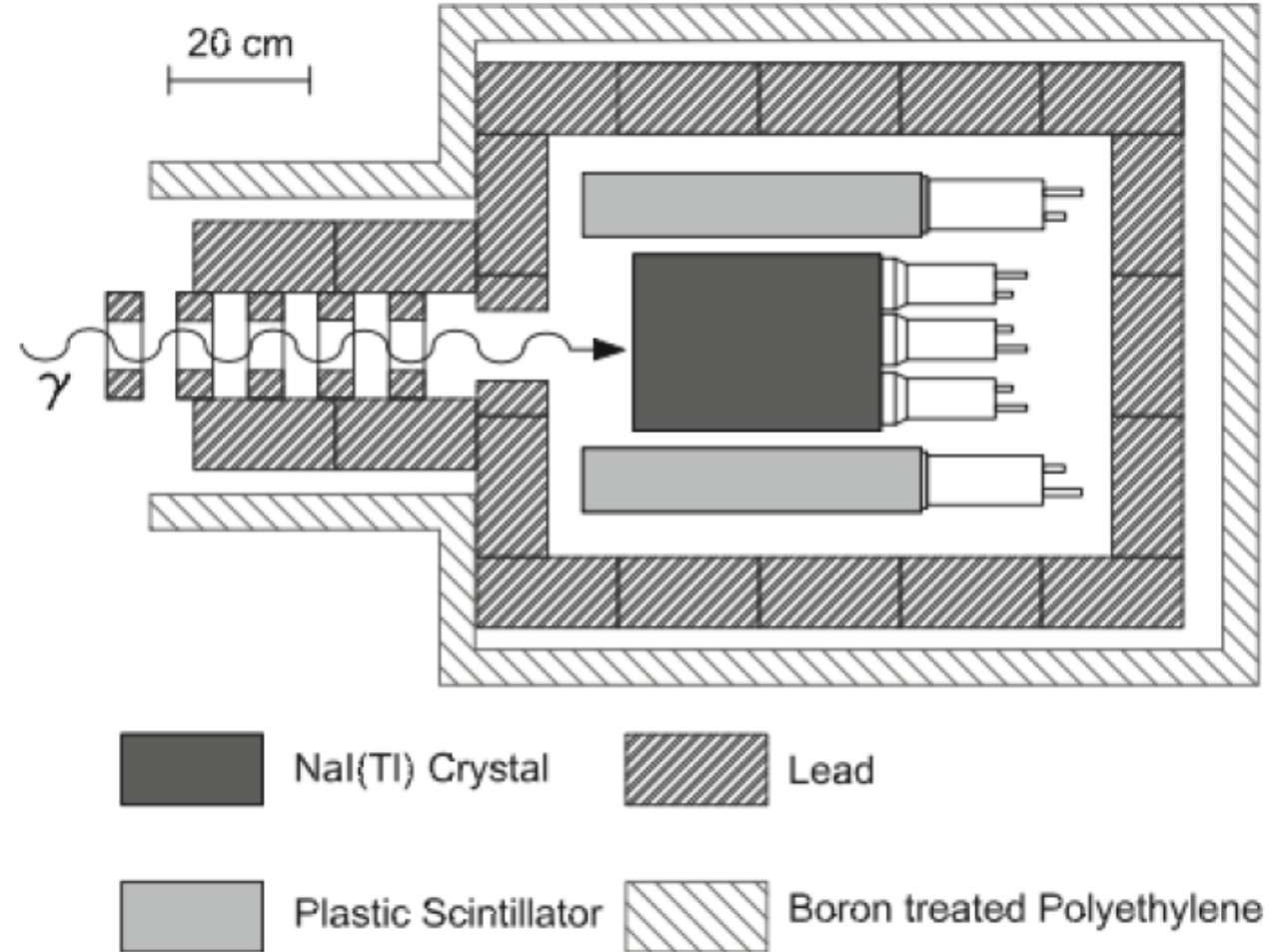
Ионизационная камера для проекта КОМПТОН

- 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.

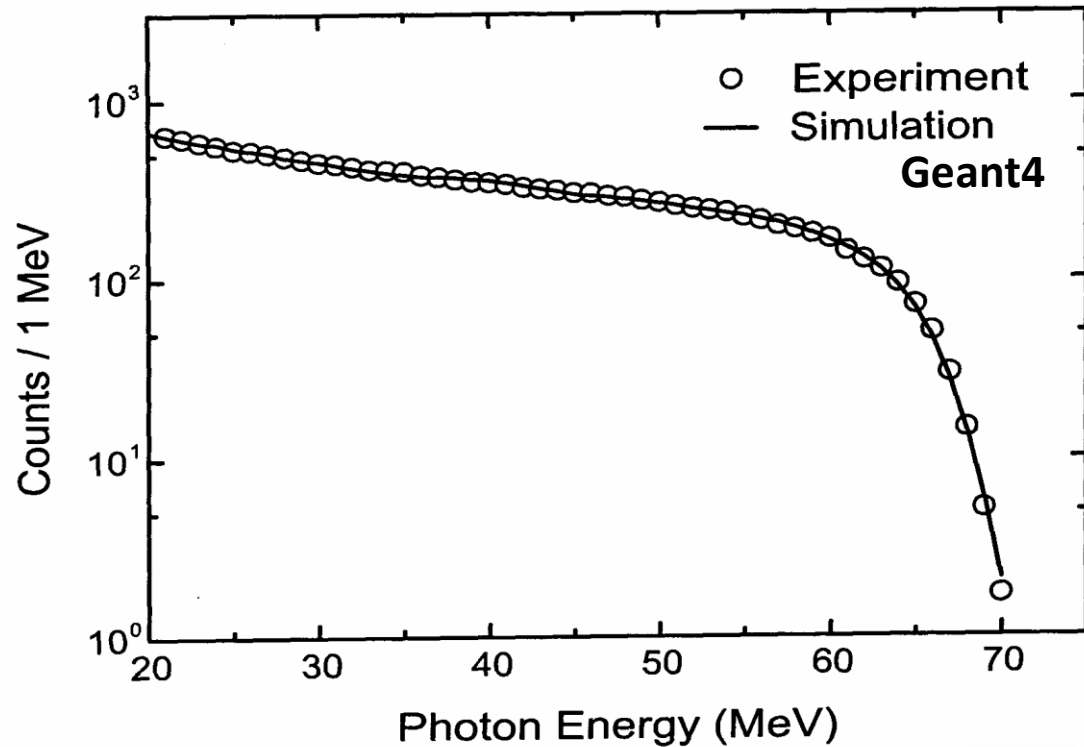


Сцинтилляционные спектрометры

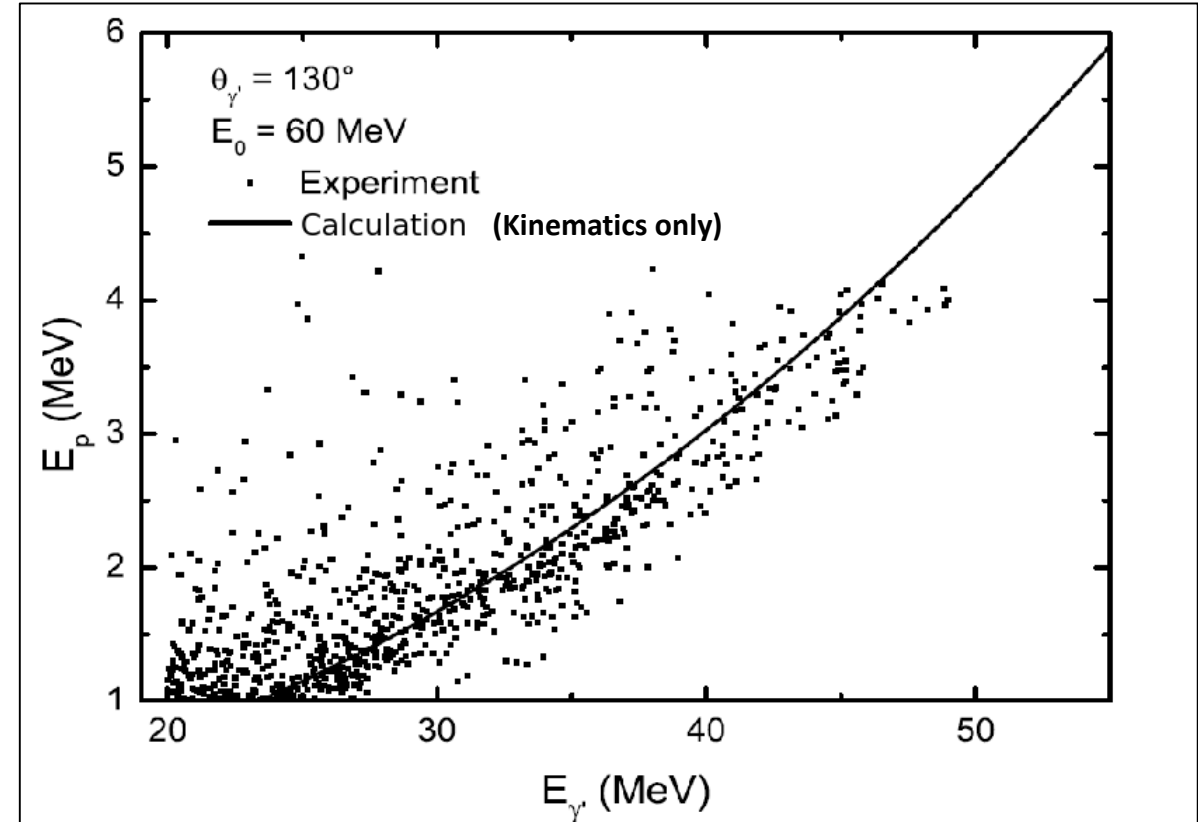
- Предполагалось, что спектрометры (NaI) будут изготовлены в Германии
- **В распоряжении ОФВЭ имеются детекторы, которые могут быть использованы для этих измерений**
- Разработка спектрометра планируется в первой половине 2025 г.



Результаты тестового измерения в Германии



Пучок фотонов, полученный из пучка электронов с энергией 70 МэВ

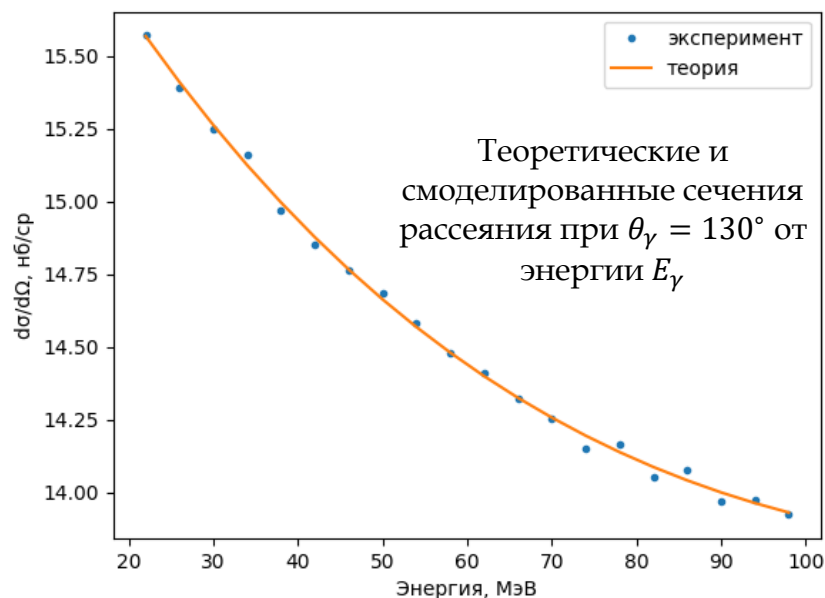


Корреляционный (тестовый эксперимент),
выполненный на фотонном пучке, полученном
из пучка электронов с энергией 60 МэВ

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

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

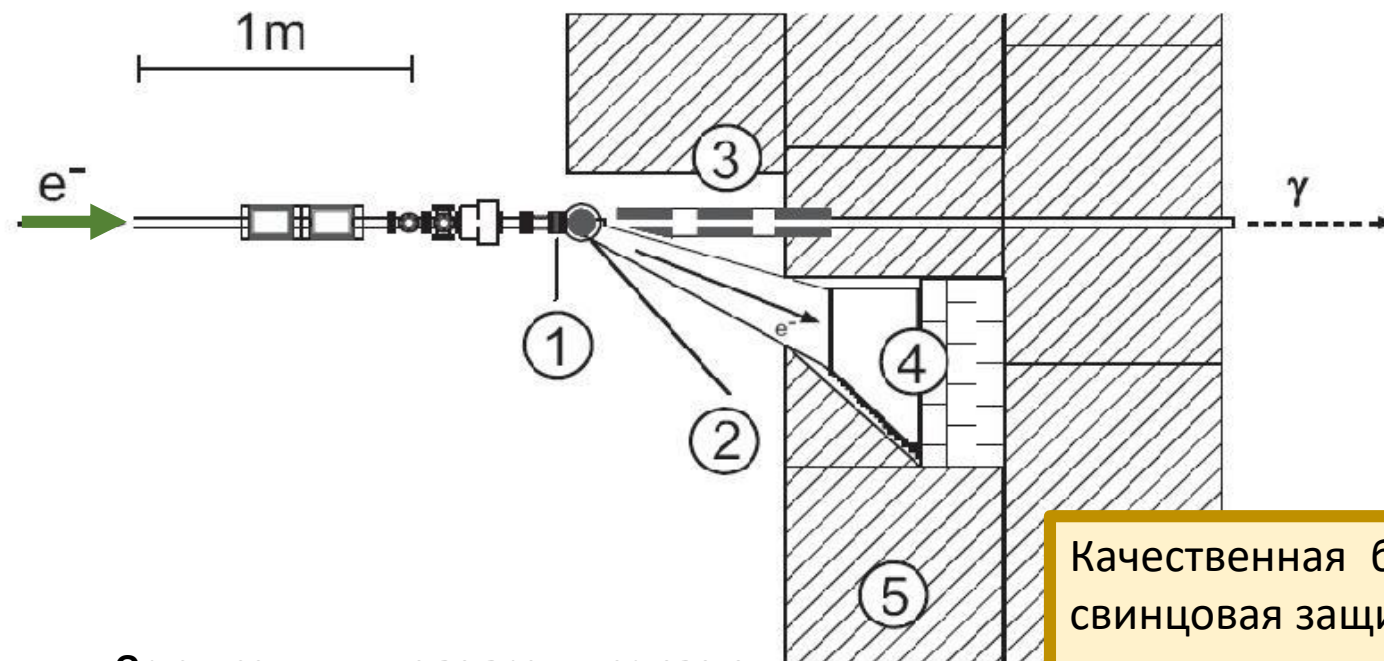
Активная мишень: $\Delta\alpha = [0.07_{stat} \pm 0.11_{syst}] \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$

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

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 → FLAP

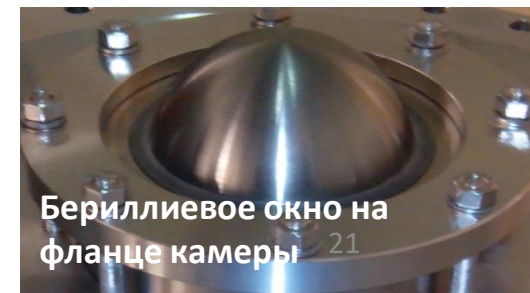
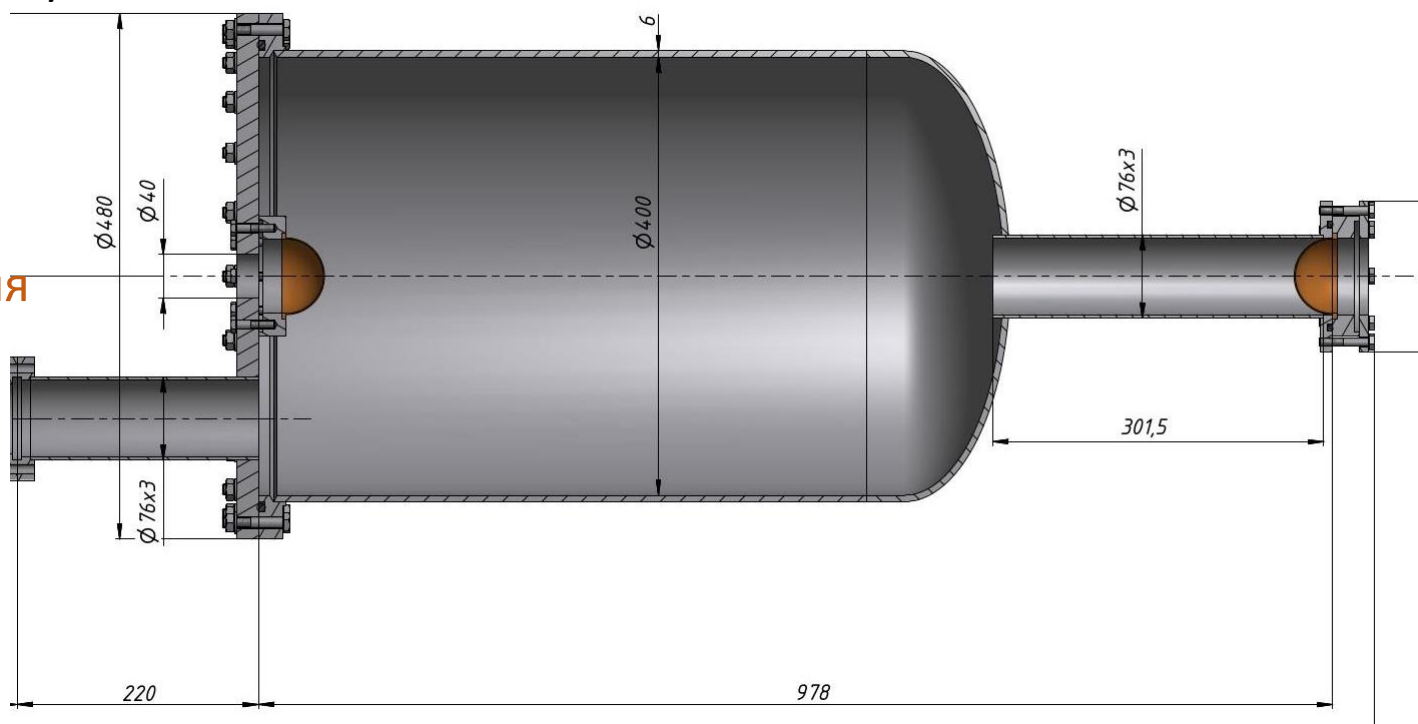
- Провести измерения электрической и магнитной поляризуемостей протона методом активной мишени
 - Статистика 10^7 набранных событий, что в 10 раз больше, чем в других экспериментах
 - Систематические ошибки будут также существенно уменьшены, так как измерения сечений будут выполнены в диапазоне энергий 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!

Другие возможные измерения при помощи метода активной мишени в физике нуклона и атомных ядер

ИК АСТАФ2

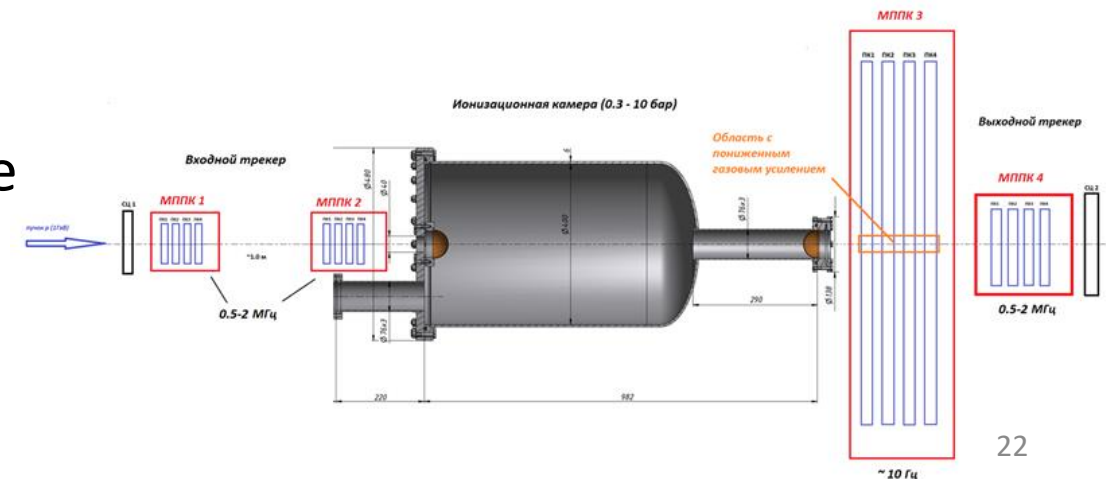
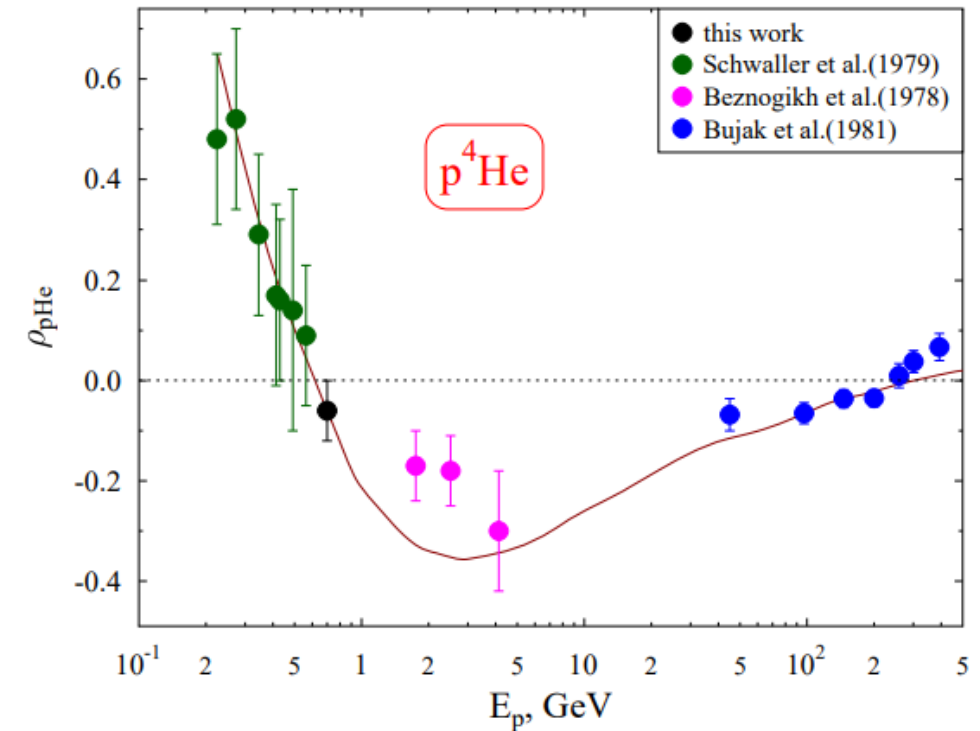
- Активная мишень АСТАФ2 была создана для изучения процессов неупругого рассеяния экзотических ядер на ядрах гелия на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Дармштадт, Германия).
 - Планировалось ее размещение внутри большого детектора гамма квантов CALIFA
- Рабочее давление 10 bar
- С помощью α -источника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

- Необходимо оснастить электроникой для съема данных (FlashADC)



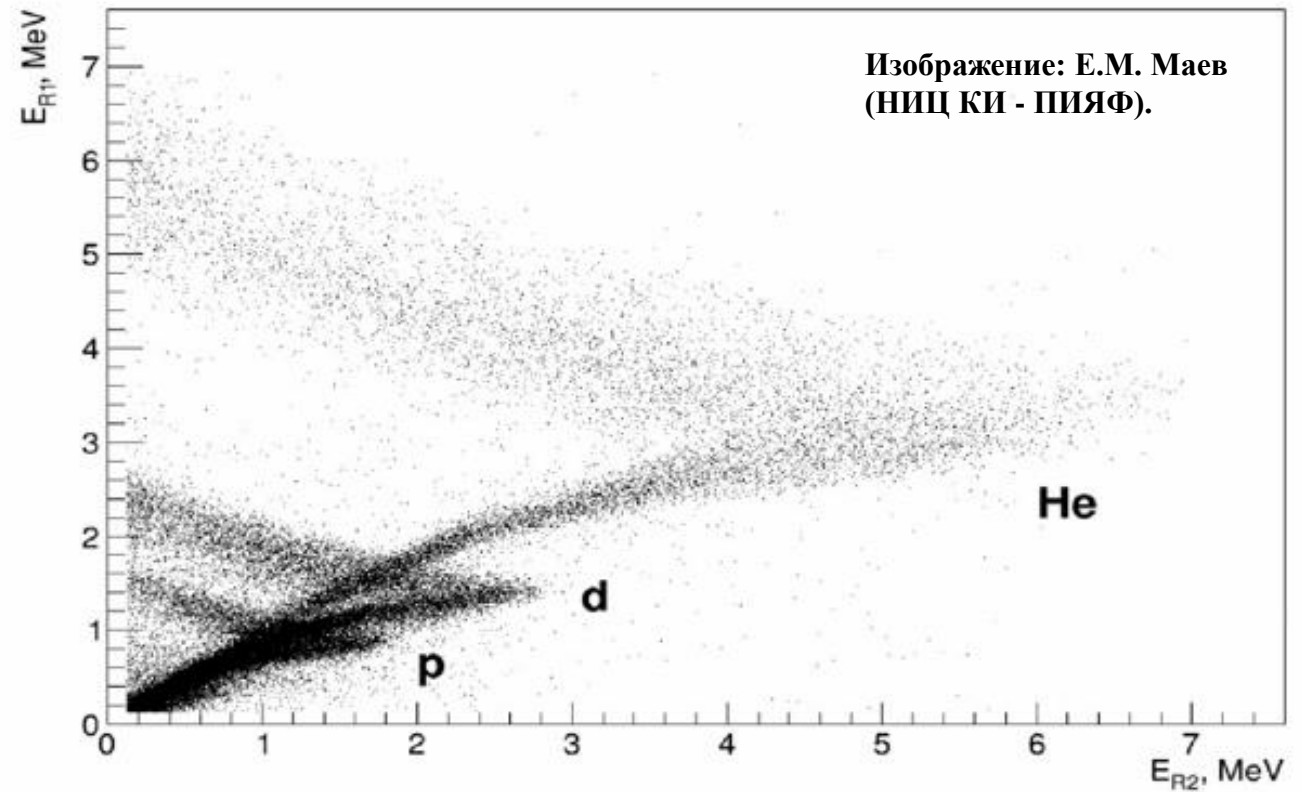
Эксперимент на СЦ1000

- 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.**)



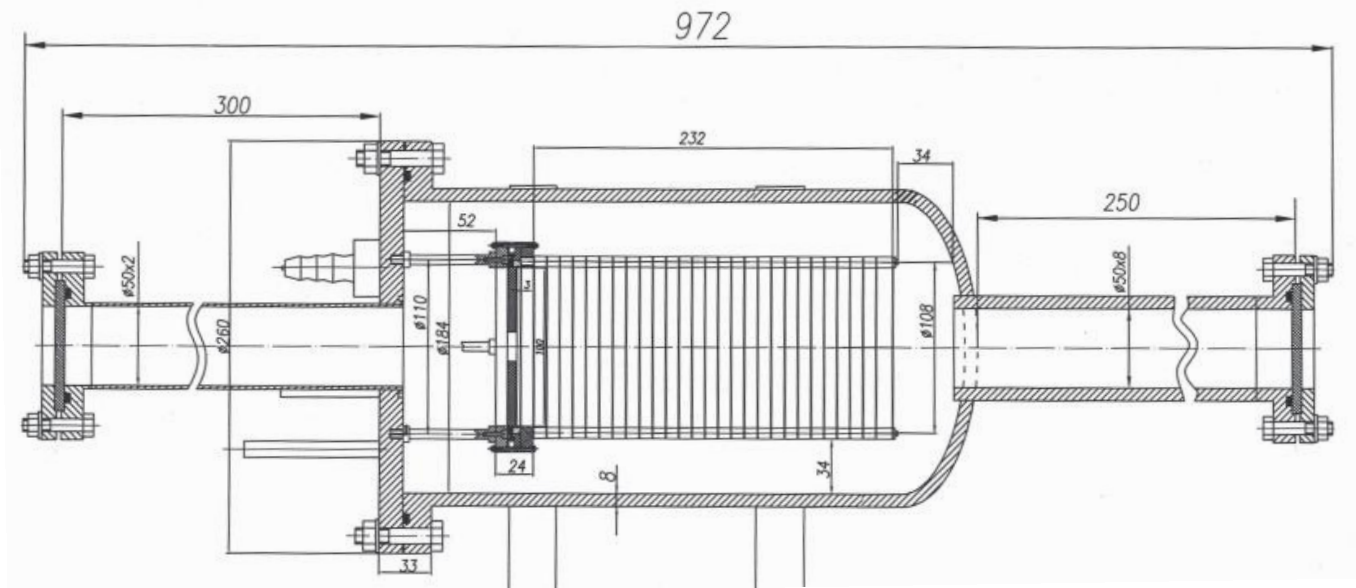
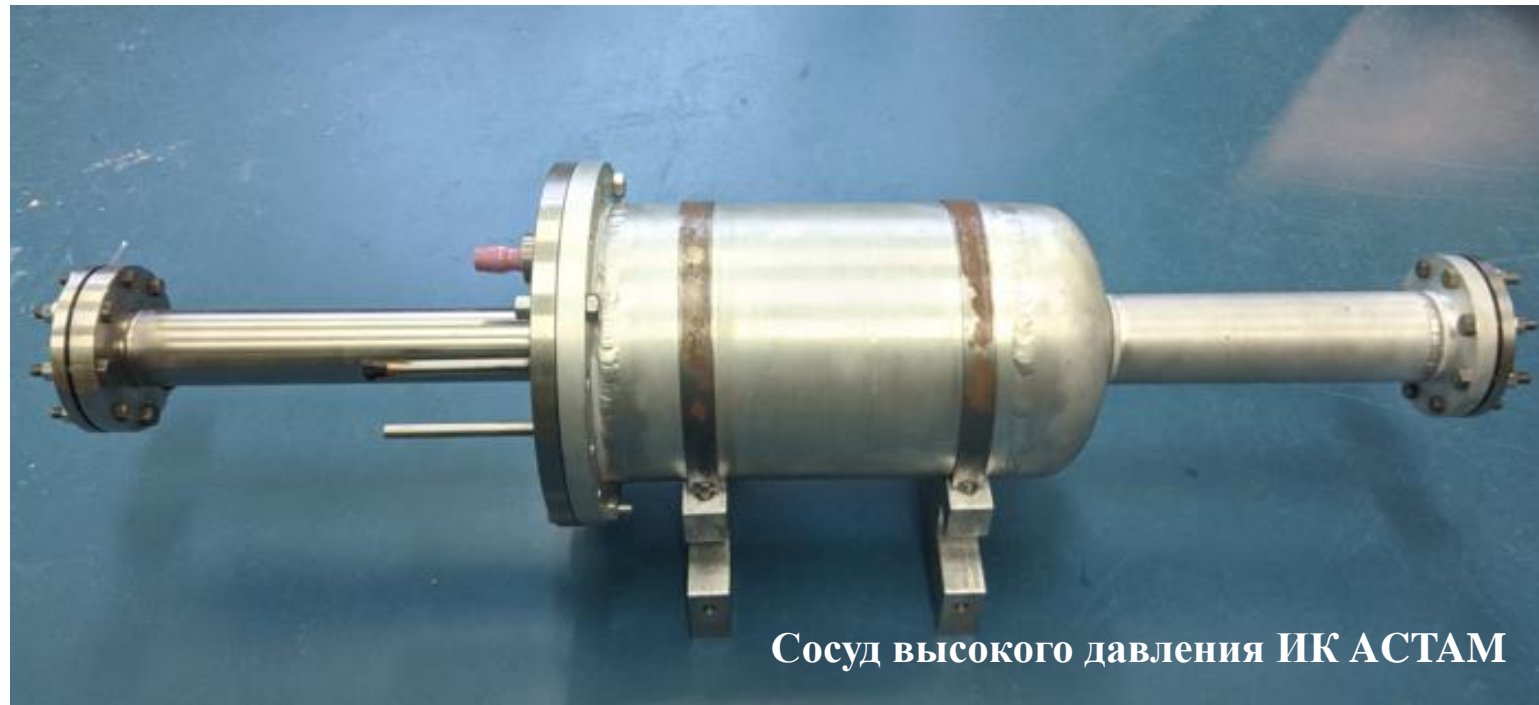
Измерение сечения выбивания нуклонов и кластеров из ядер

- 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

- Портативная ионизационная камера
- От 4 до 22 каналов считывания
 - Азимутальная сегментация
- **Внутренние элементы камеры – в процессе изготовления в ОФВЭ**

координатор О.Е. Маев

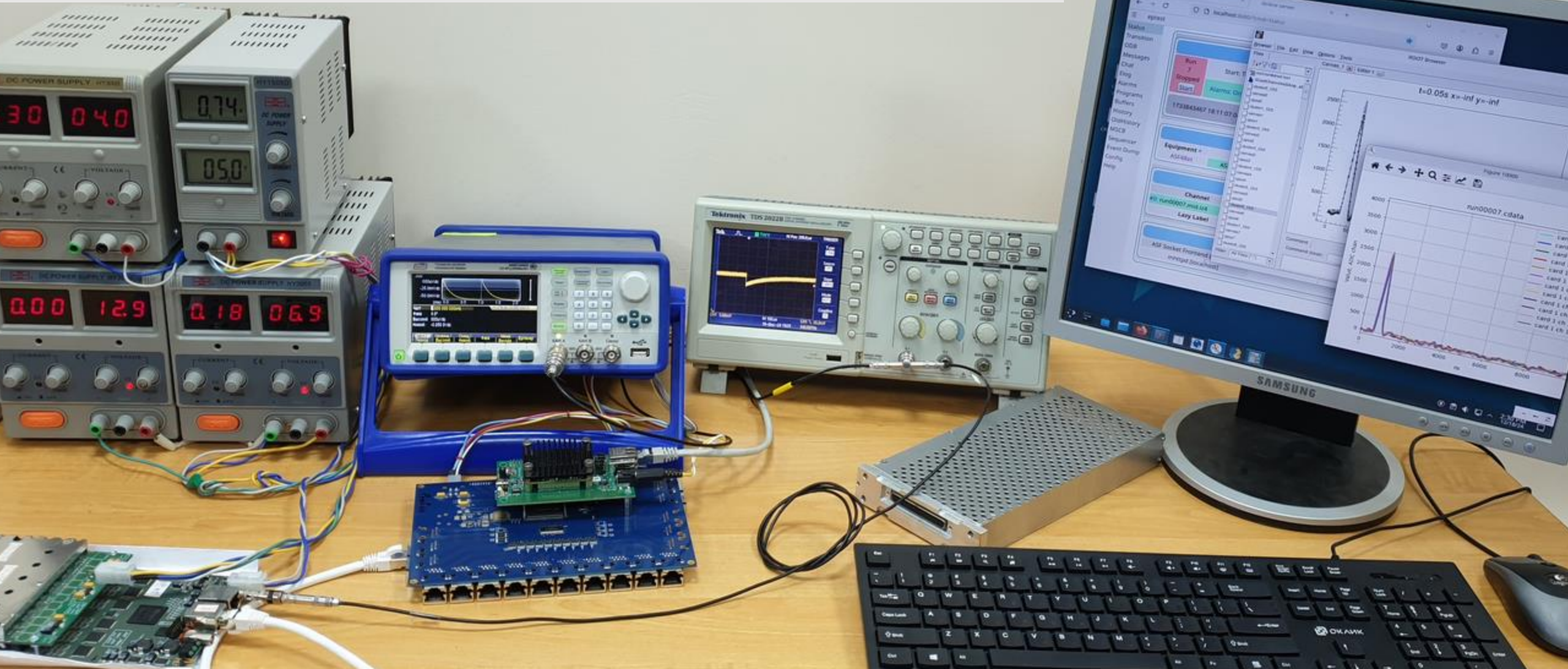
- Янв.2025 – система поддержки
- Испытания на пучке СЦ1000 в 2025 г.
- **Необходимы FlashADC!**



Здан-стенд для работы подсистемы сбора данных с камеры ТРС, включающей плату ASF12er (Ярузинский Н.) с разными предусилителями (Неустроев П.В. и Яцура В.И.) и концентратор сбора данных CB12 (Яцура В.И.).

Разработано программное обеспечение для считывания, online - мониторинга и визуализации полученных данных на базе системы MIDAS (Фотьев В.).

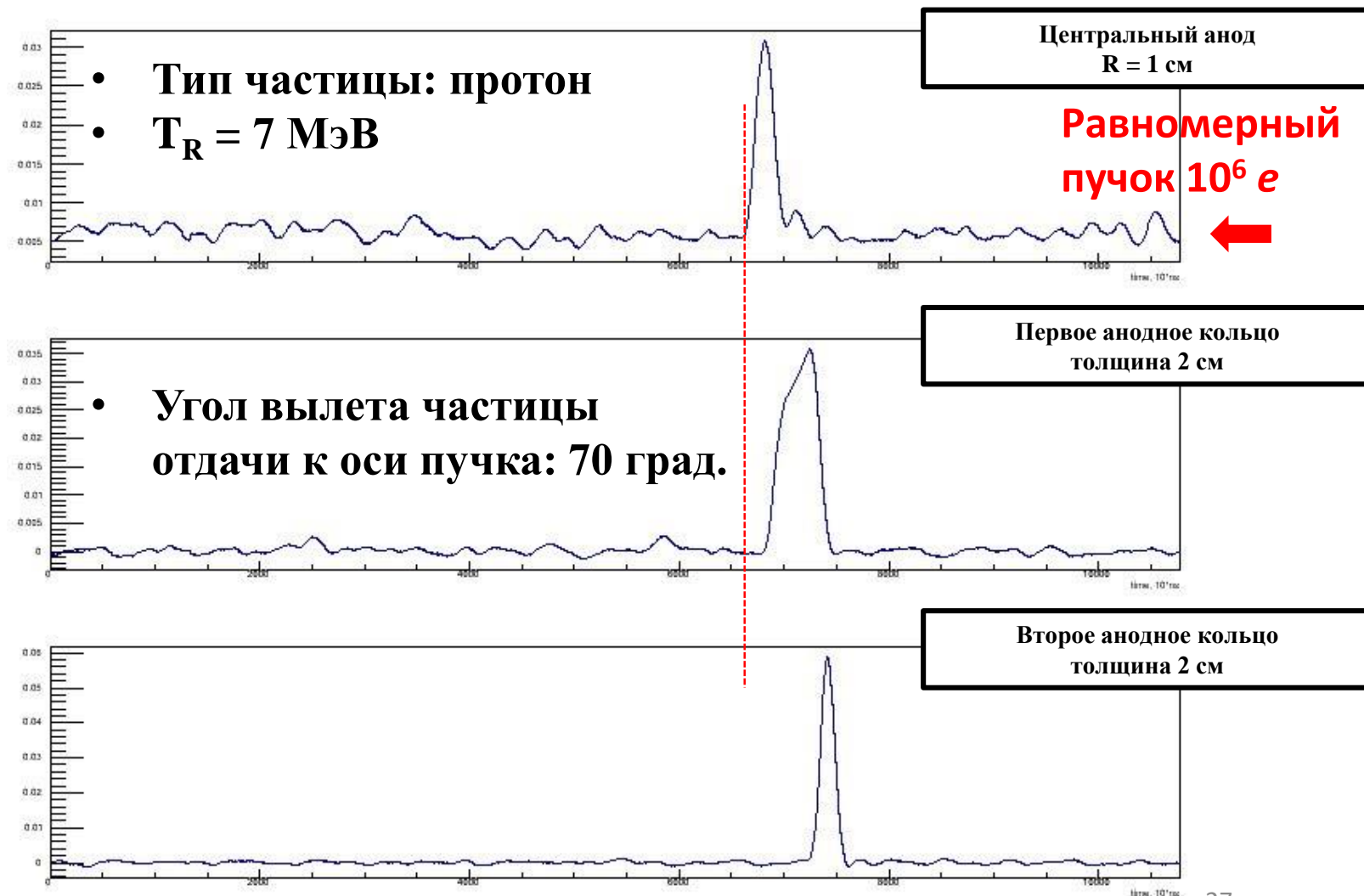
Планировано тестирование данной электроники на существующей камере ТРС, предоставленной лабораторией барионной физики (Маев Е.М., Маев О.Е. и Дзюба А.А.) с возможностью последующей адаптации под их задачи и взаимовыгодным сотрудничеством.



Пример моделированного события

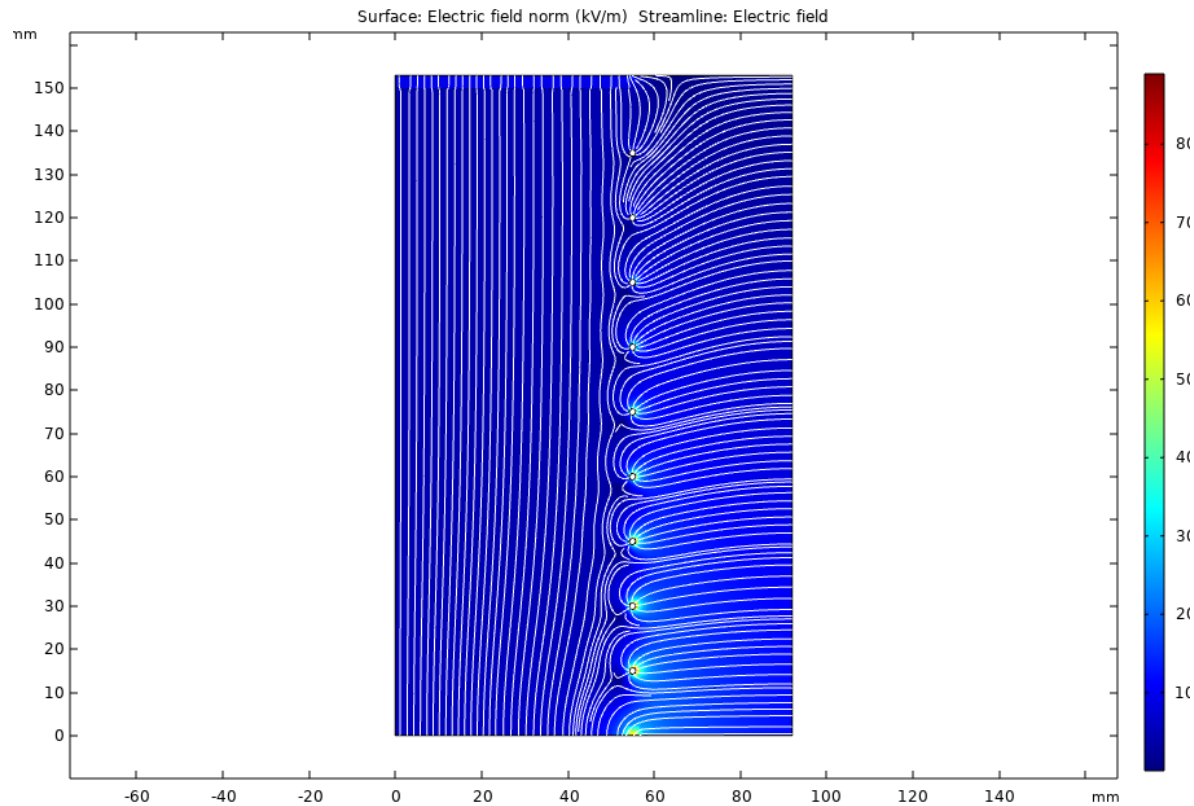
Построена компьютерная Монте-Карло модель ИК АСТАМ, учитывающая физические процессы формирования сигнала частицей отдачи, а также сопутствующие шумы (электронический и шум, наведенный пучком электронов).

Измерения с ИК АСТАМ могут быть прекрасным тестовым экспериментом

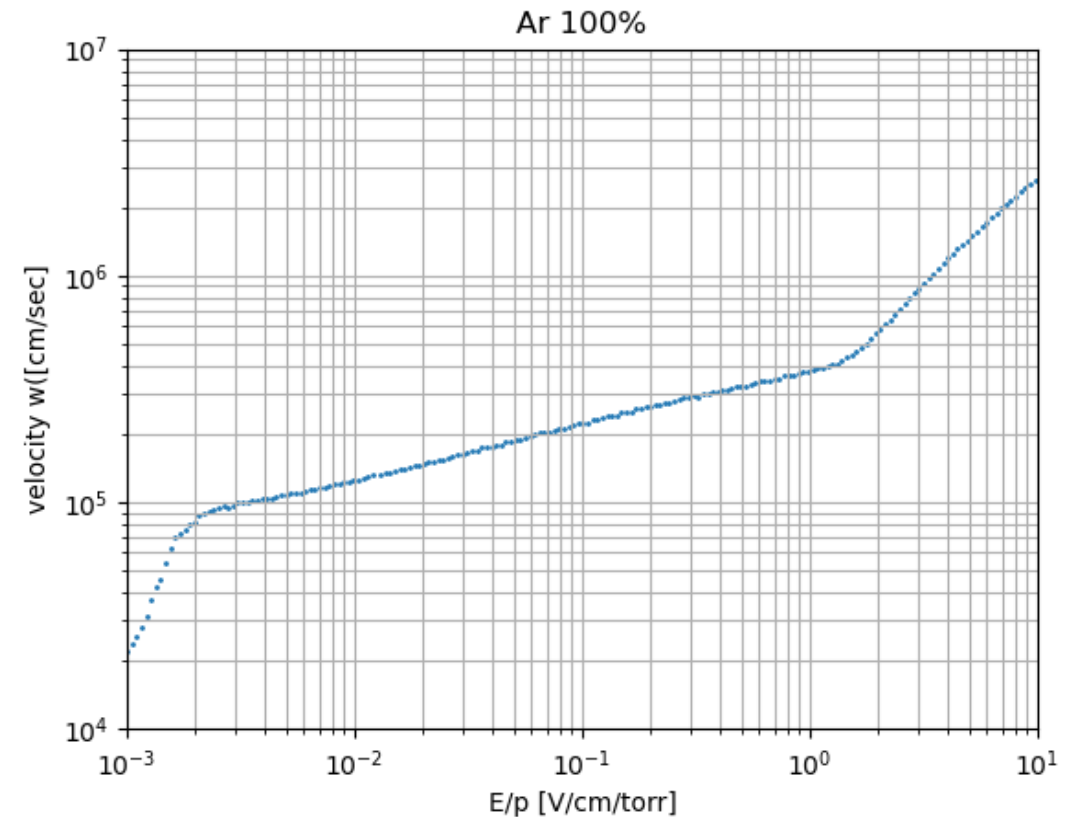


Расчет полей и транспортных свойств газов

Расчет электрических полей (COLMSOL)



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



Сохранение технологии ионизационных камер

- Чрезвычайно важно сохранить многолетний опыт ОФВЭ в области создания и эксплуатации активных мишеней
- Неоценимый вклад и помощь Германа Александровича Королёва в этом начинании.
- **Сердечно поздравляем Германа Александровича с юбилеем!**



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.

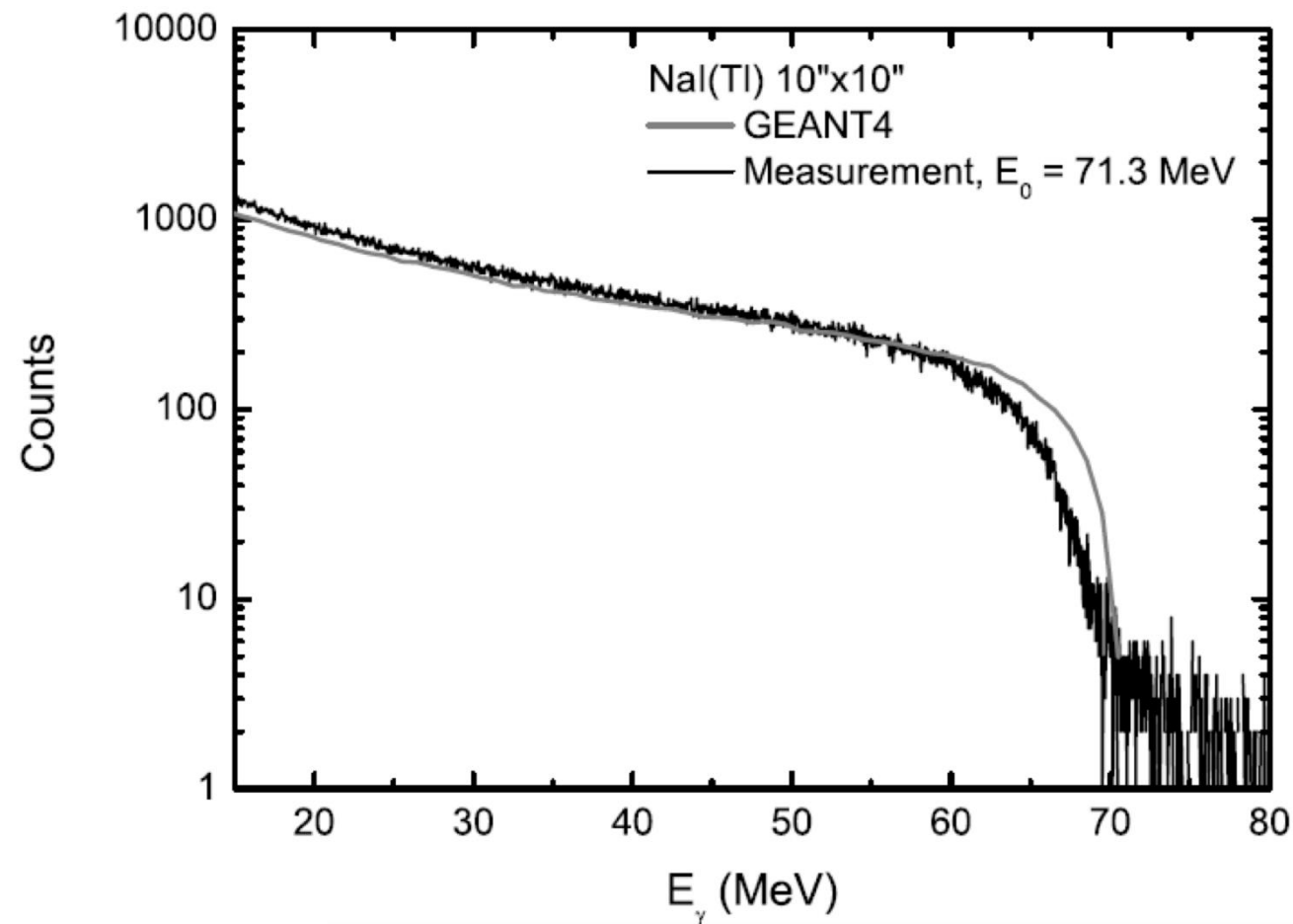


Рис. N Сравнение спектра, измеренного в детекторе с кристаллом 10''x10'' при 0° (черная линия), с моделируемым нормированным спектром (серая линия) при $E_0 = 71.3$ МэВ. Время измерения составило 40 минут при токе электронного пучка 200 пА.

