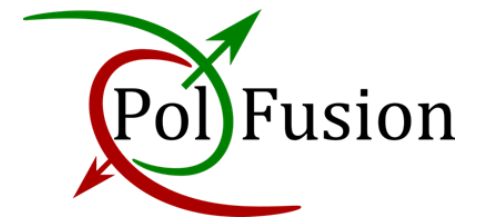




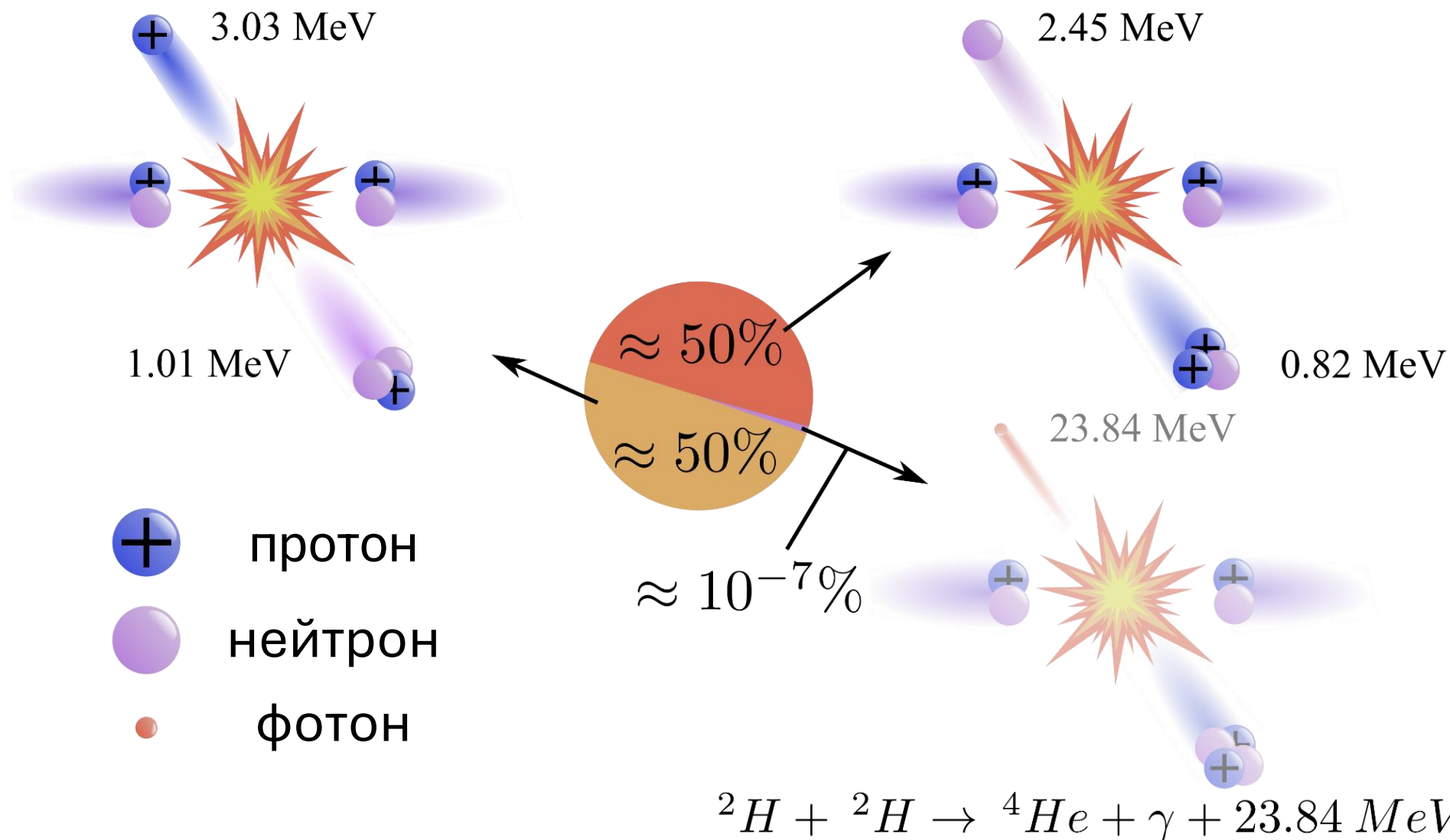
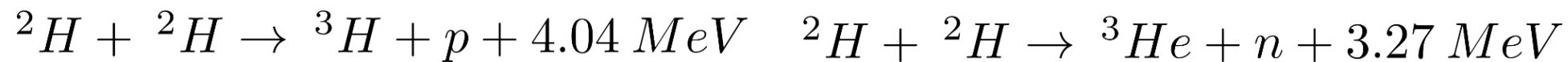
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

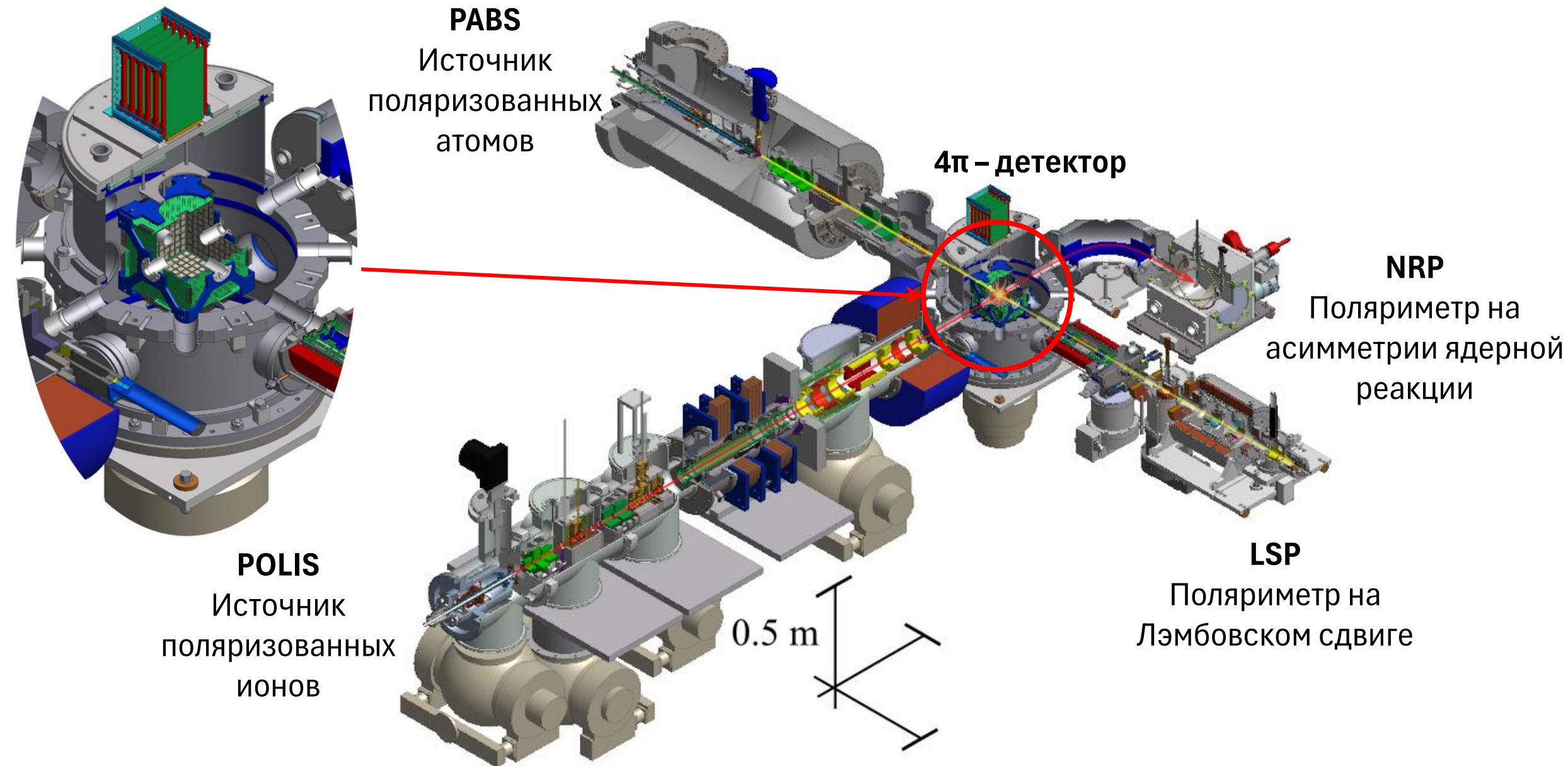
Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова

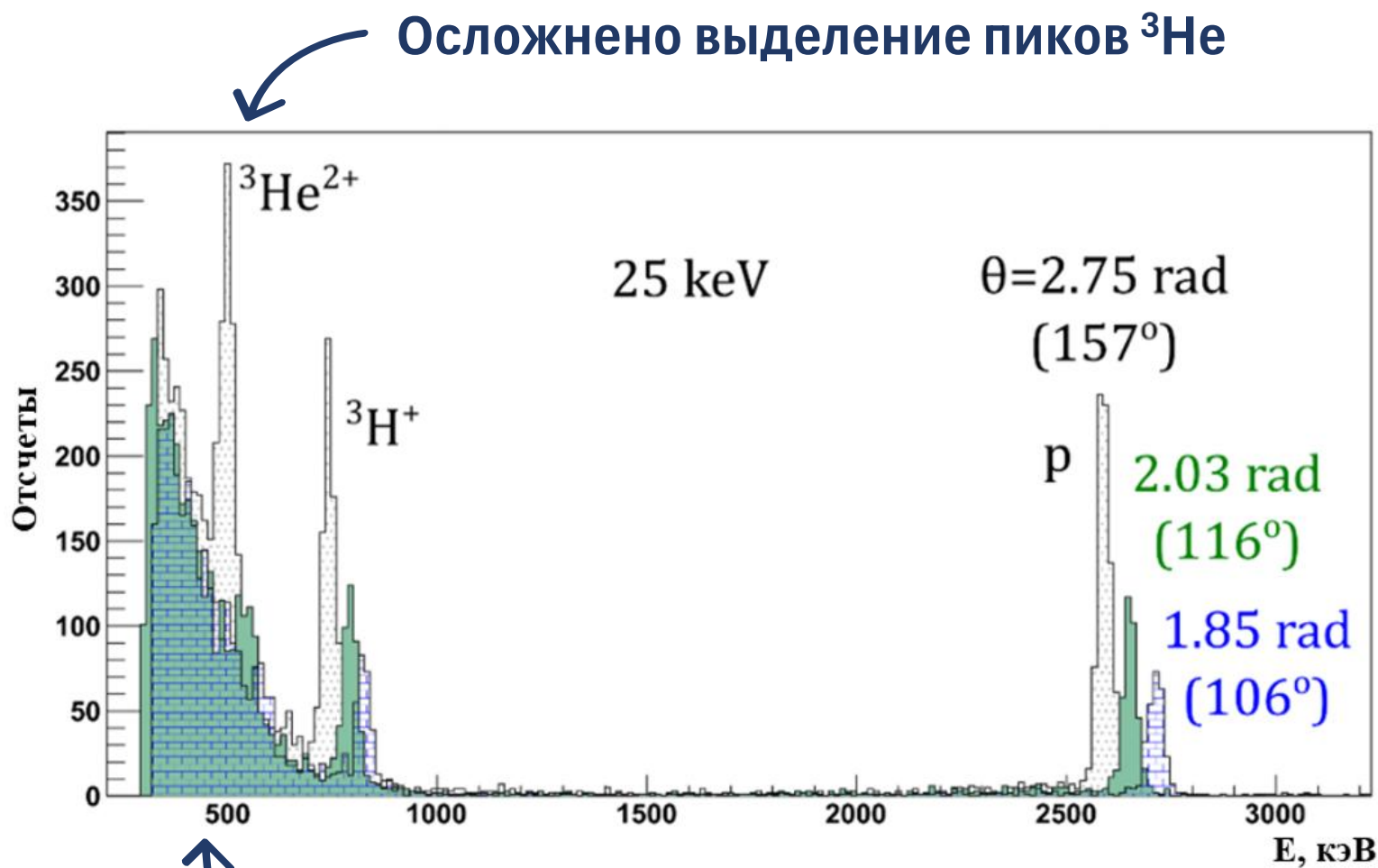


Разработка системы сцинтилляционных детекторов для подавления космического излучения в рамках проекта по исследованию реакции ядерного dd -синтеза с поляризацией исходных частиц при низких энергиях (PolFusion)

Рождественский А.Ю.
аспирант 4-го курса
ПИЯФ, ОФВЭ, ЛКСТ

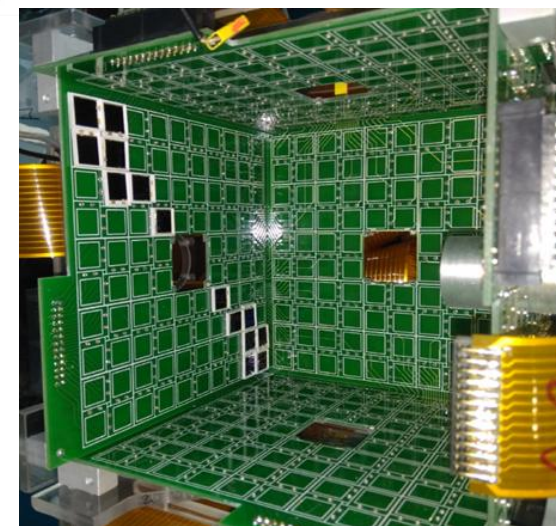
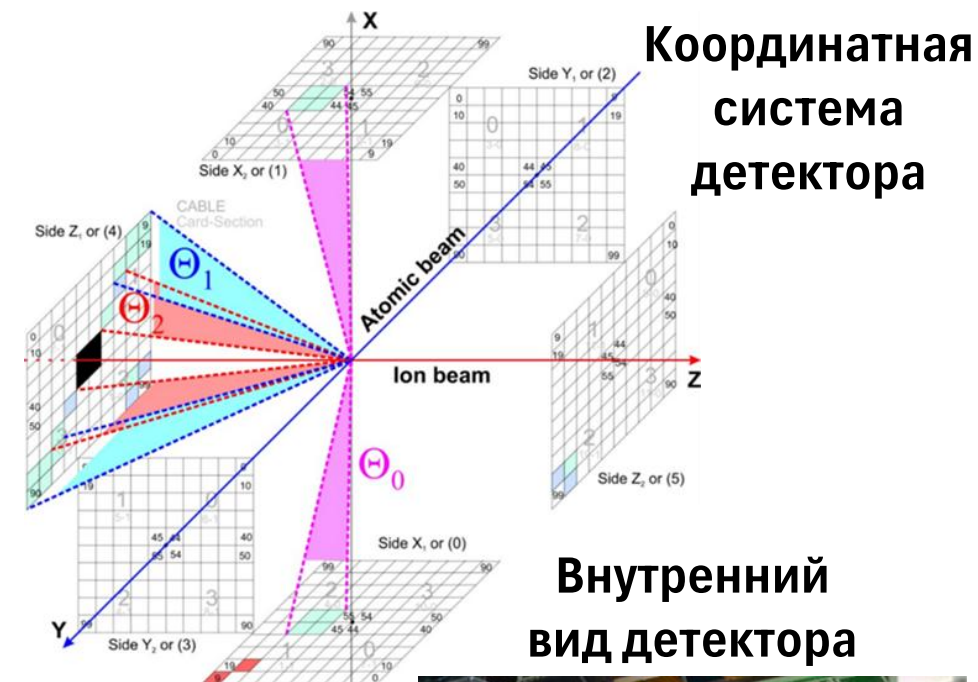


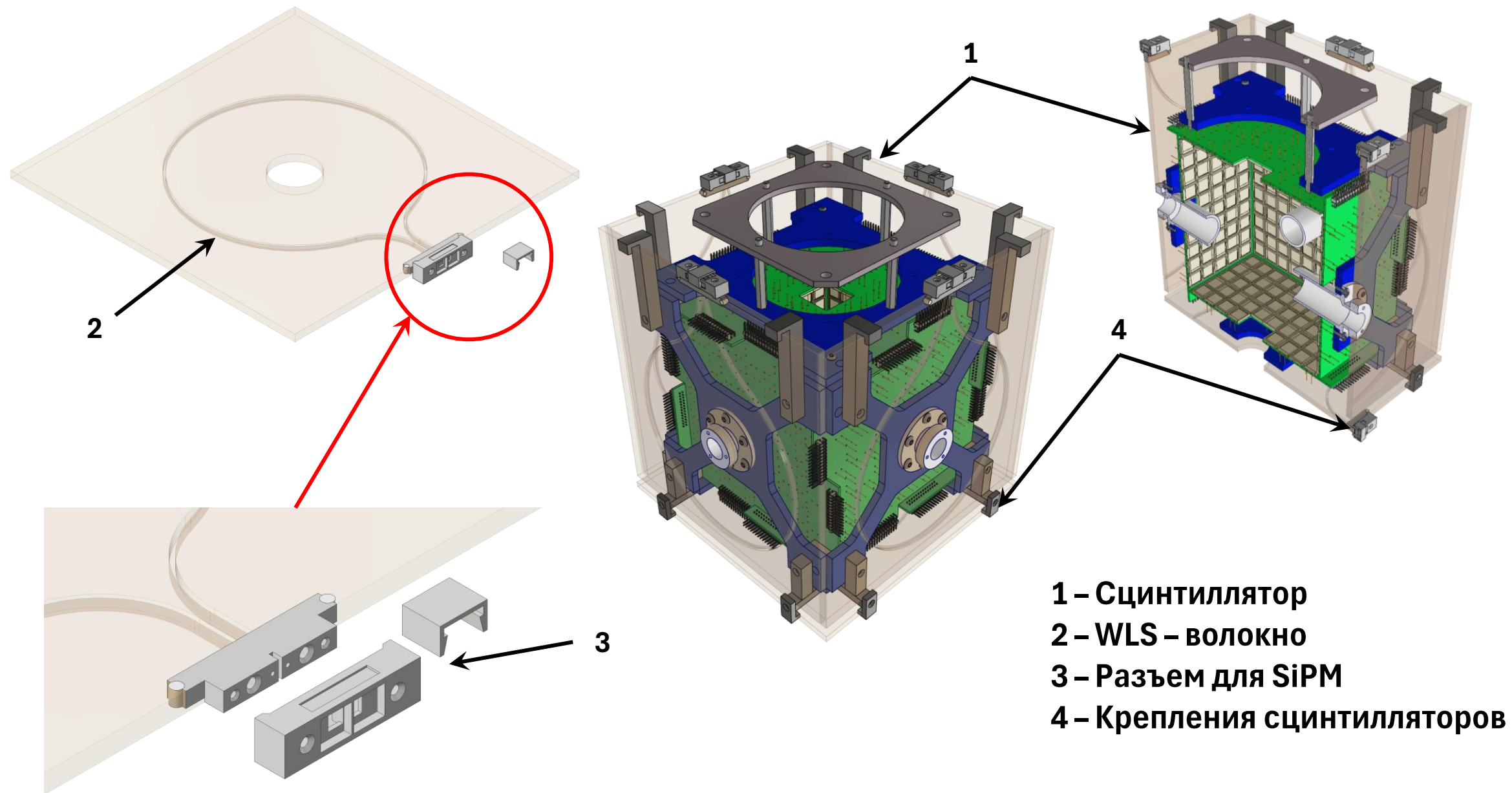


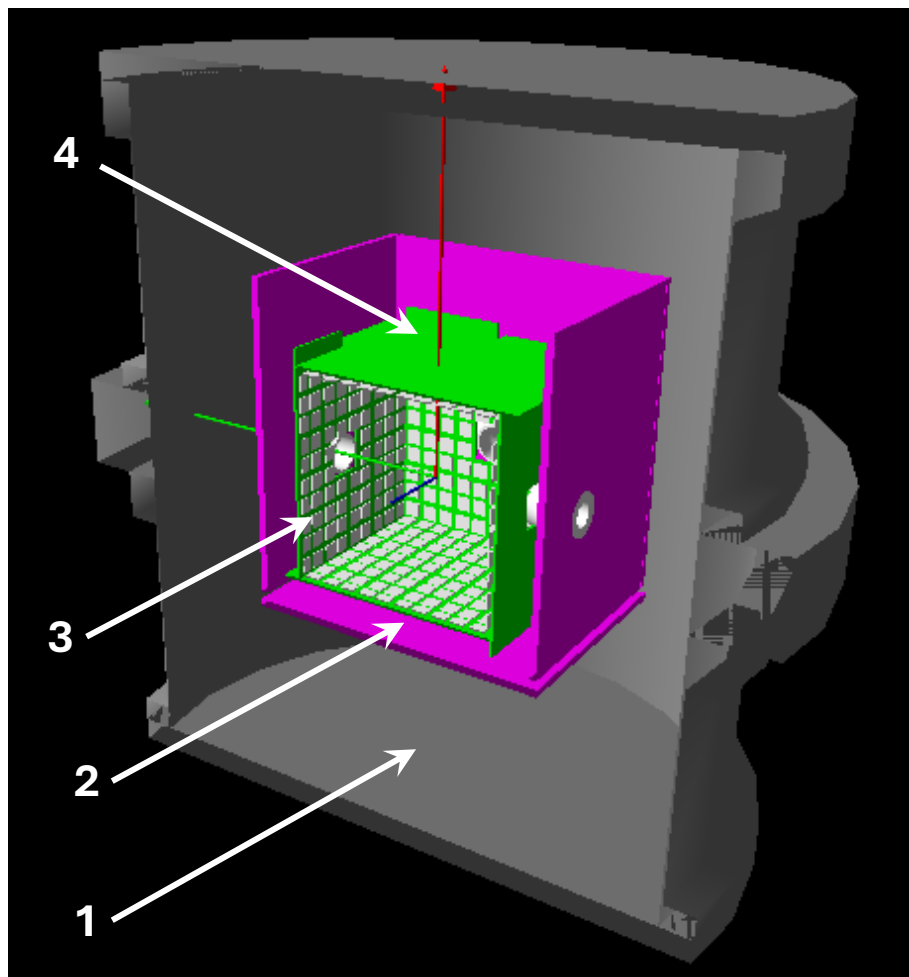


Фон космического
излучения

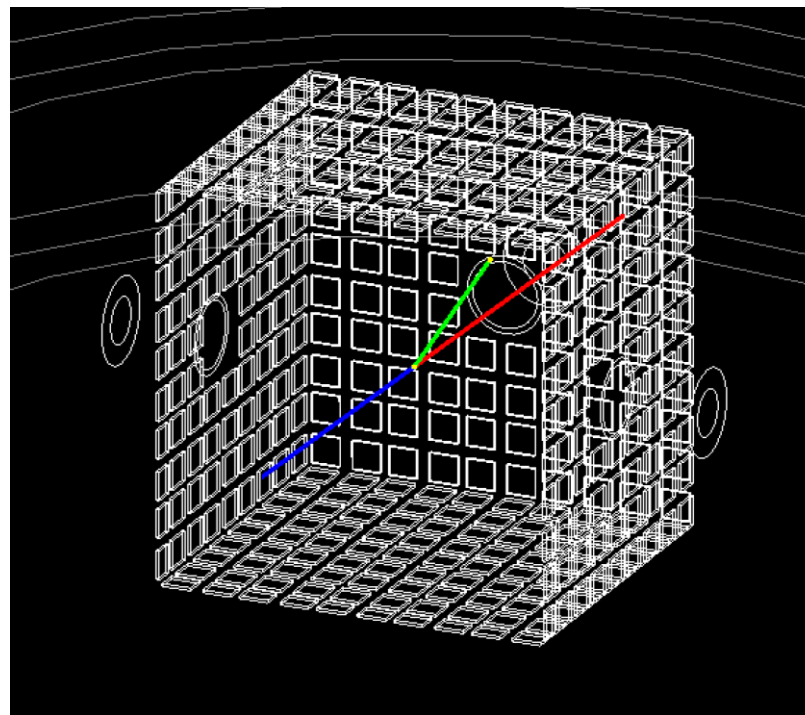
Система
сцинтилляционных
детекторов





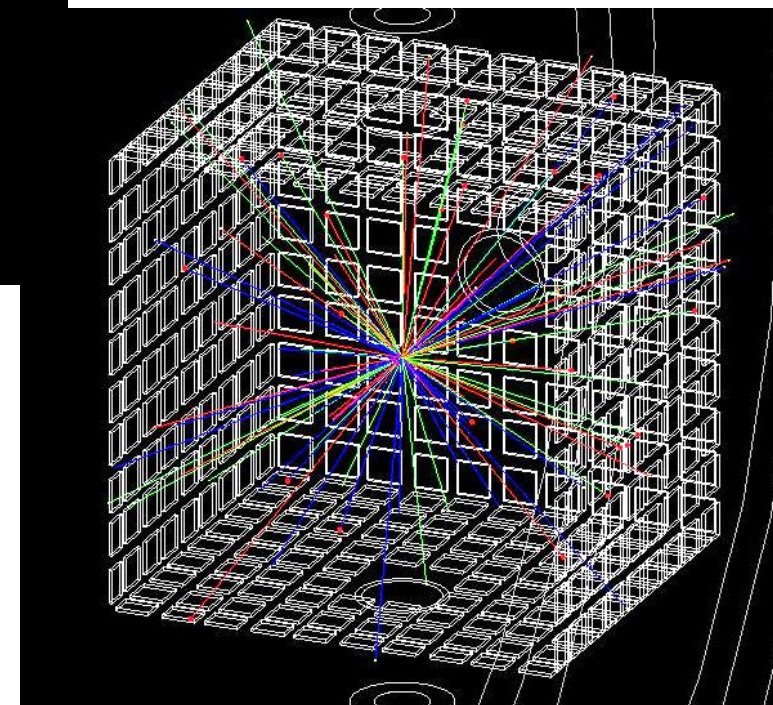


Геометрия детектора в Geant 4



- 1 – Вакуумная камера
- 2 – Сцинтилляторы
- 3 – PIN - диоды
- 4 – Печатные платы

Красный - p
Синий – t
Зеленый – He3

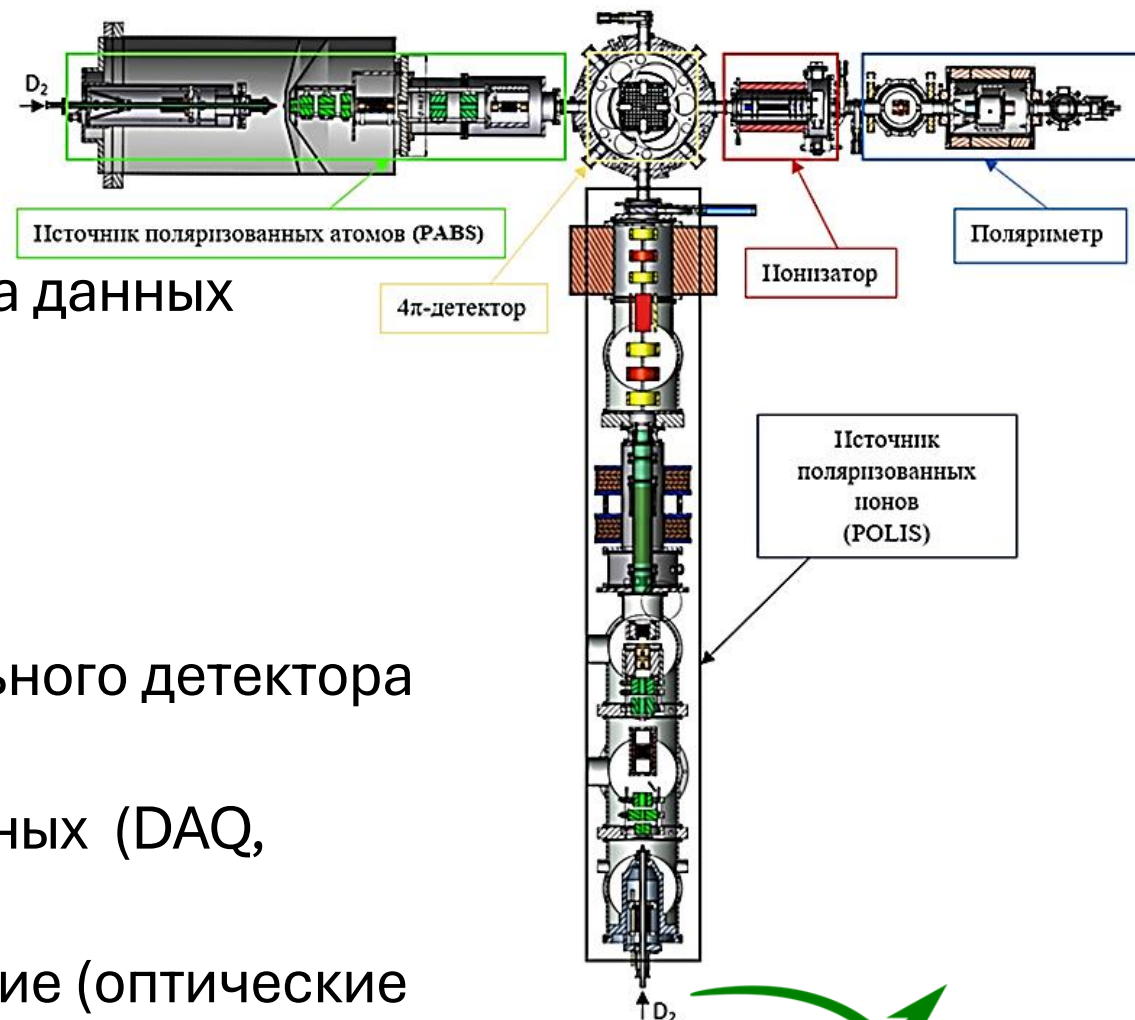


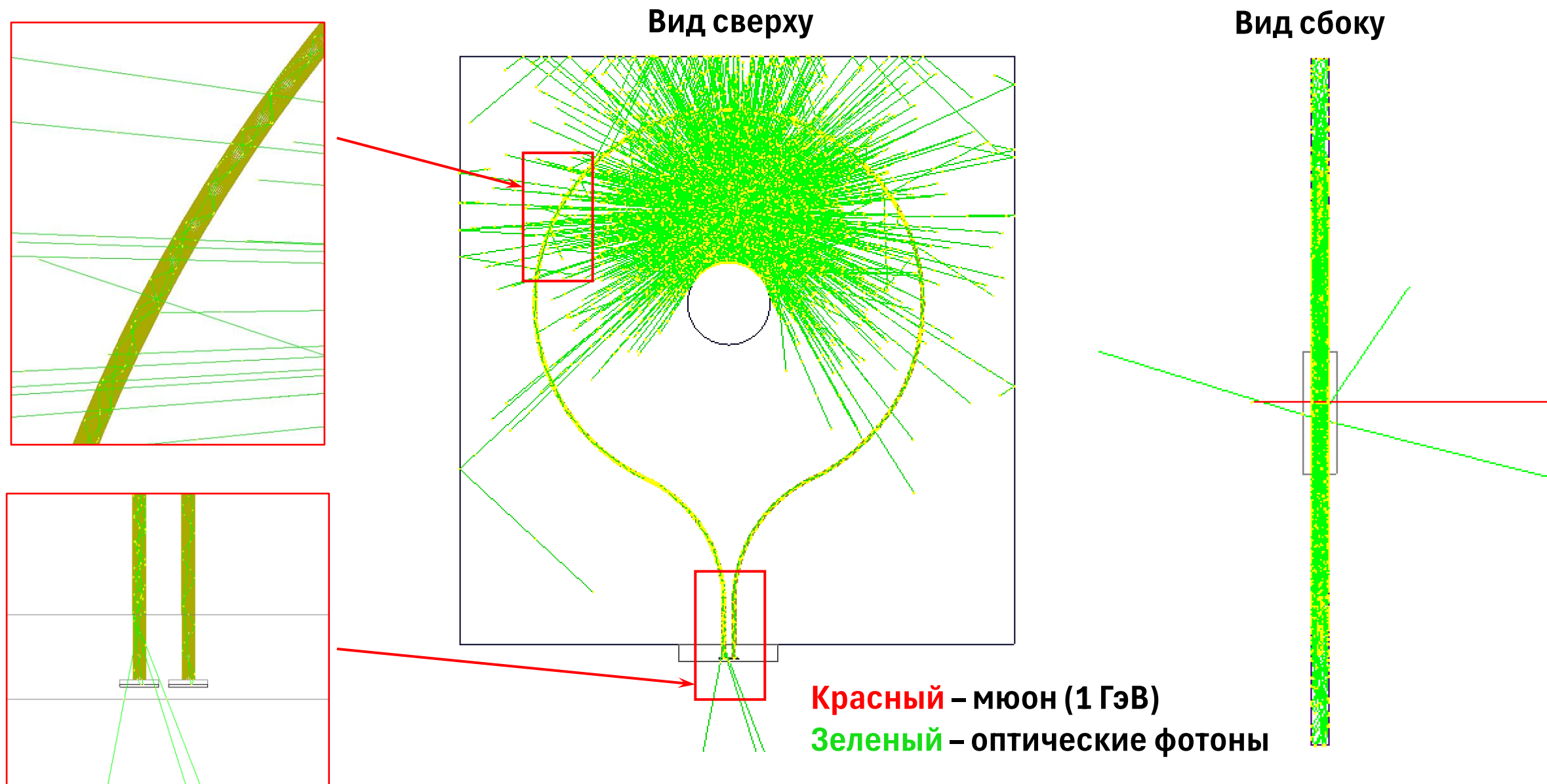
Выполнено:

- Новая электроника
- Сборка системы вне вакуумной камеры
- Подключение системы к общей системе сбора данных
- Набор статистики космического излучения (ведется в настоящее время)

План работ:

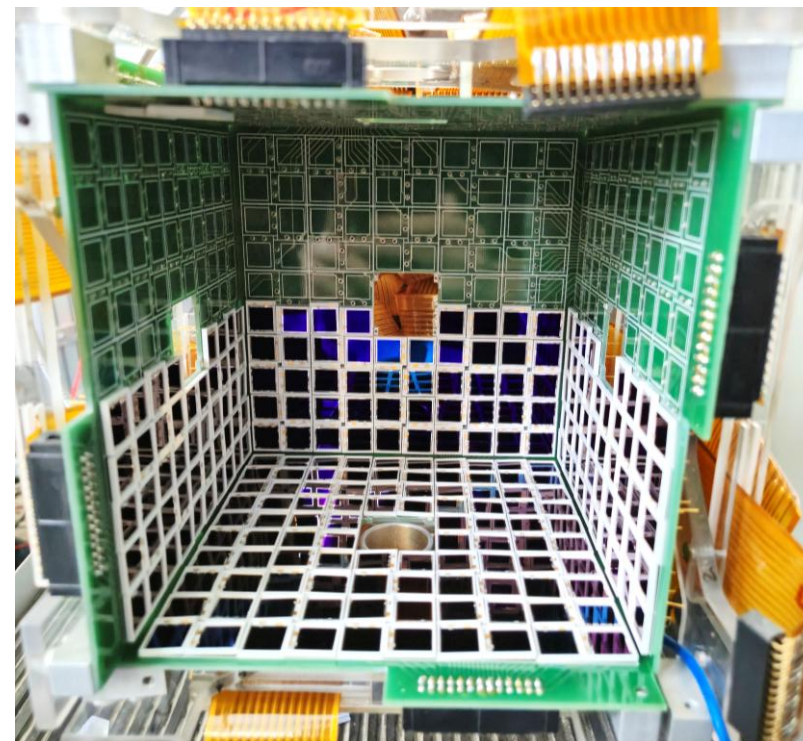
- Сборка системы в вакуумной камере центрального детектора
- Проведение тестов на космических мюонах
- Разработка пакета программ для анализа данных (DAQ, формат сырых данных, online-analysis,...)
- Добавление новой физики в MC моделирование (оптические фотоны)
- Тестовый сеанс на неполяризованном ионном пучке с паровой мишенью



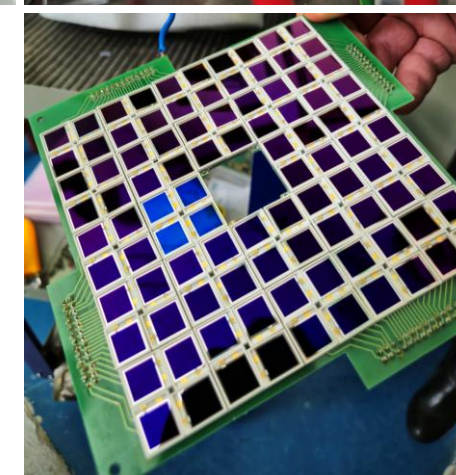




Подготовка к физическому сеансу



- 28 PIN-диодов -> 291 PIN-диод
- Новая земельная шина





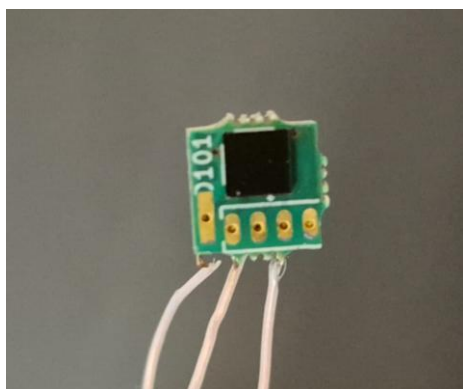
Система сцинтилляционных детекторов



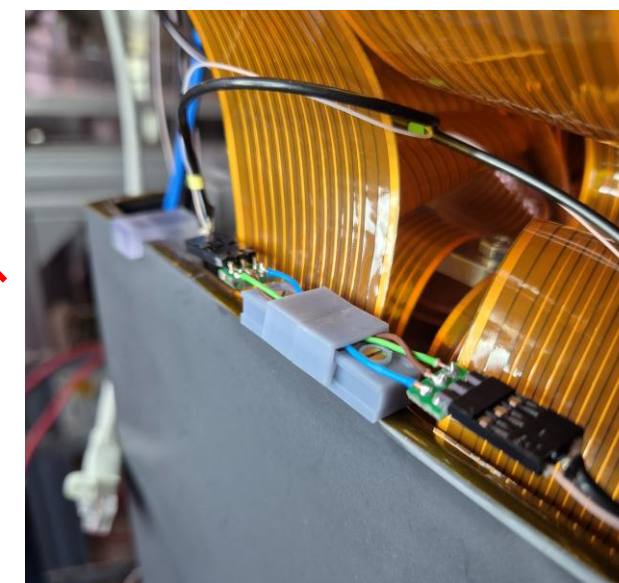
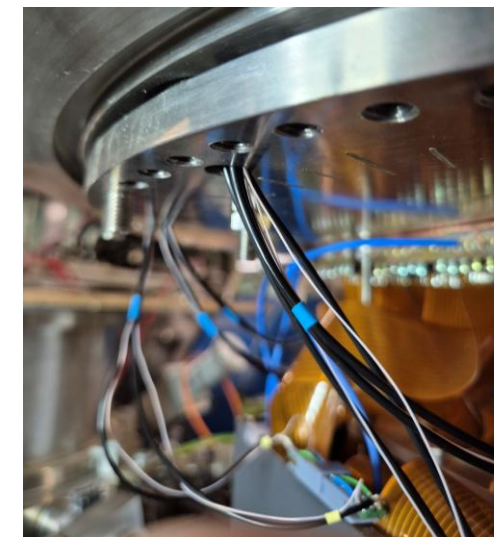
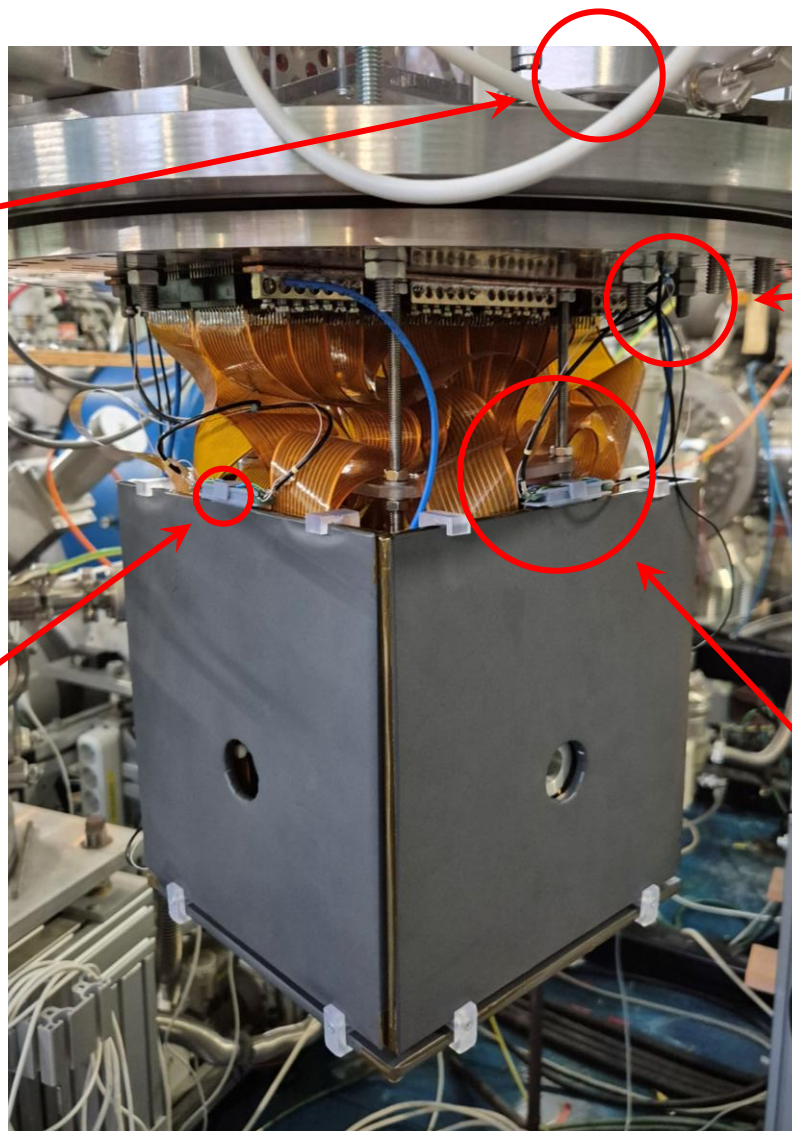
Вакуумный разъем



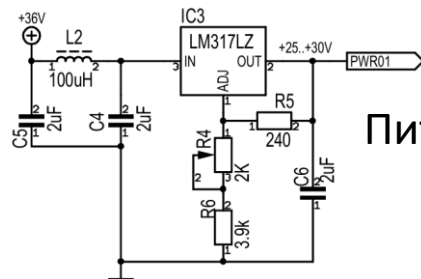
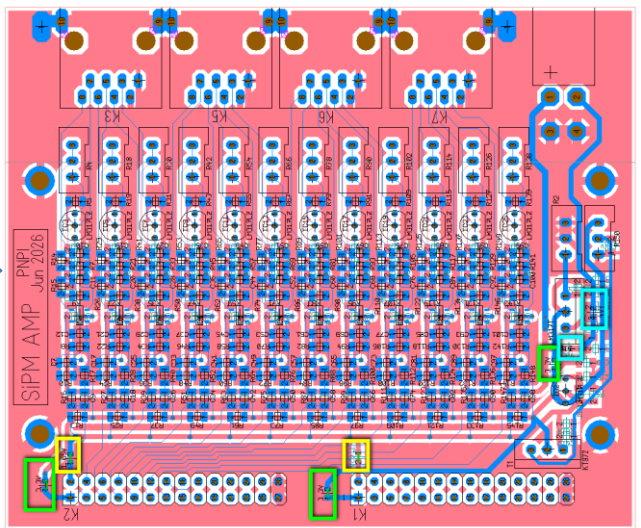
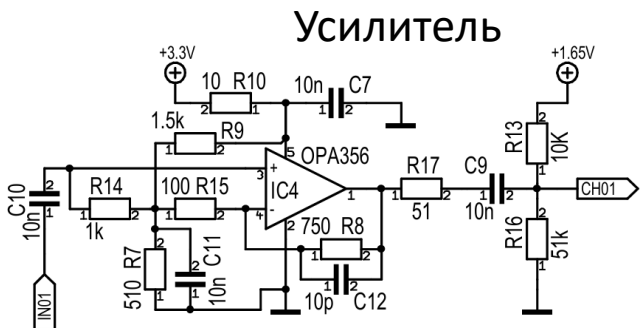
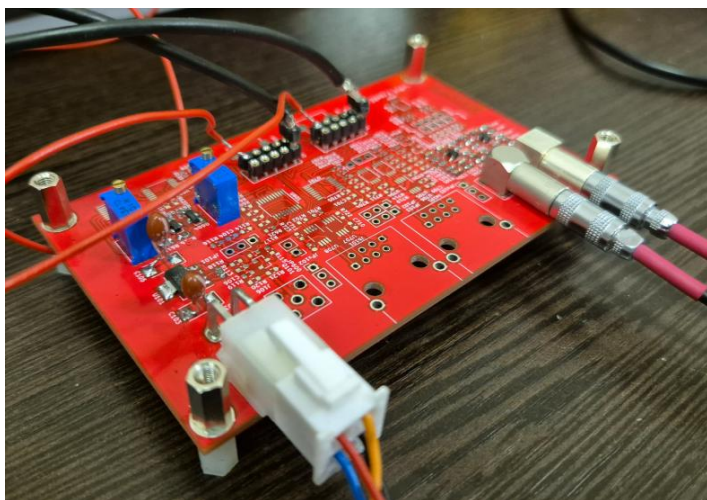
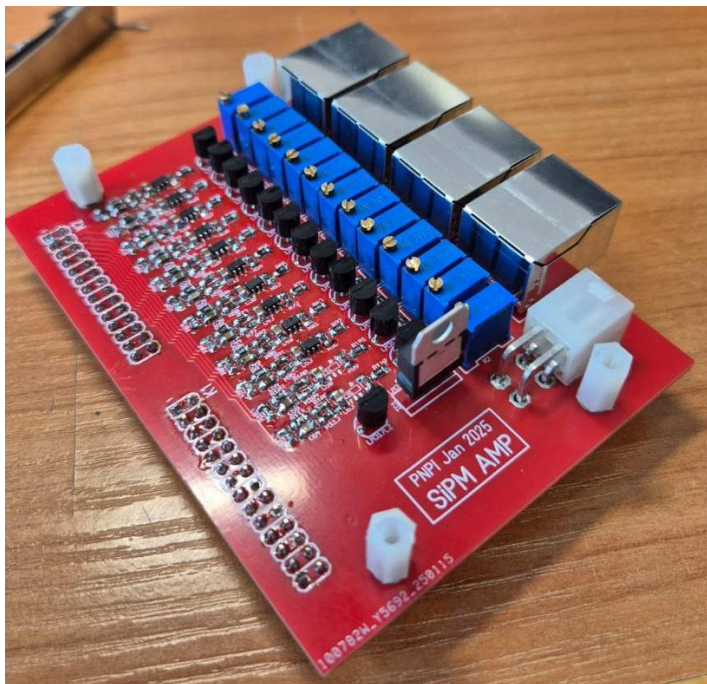
WLS волокно



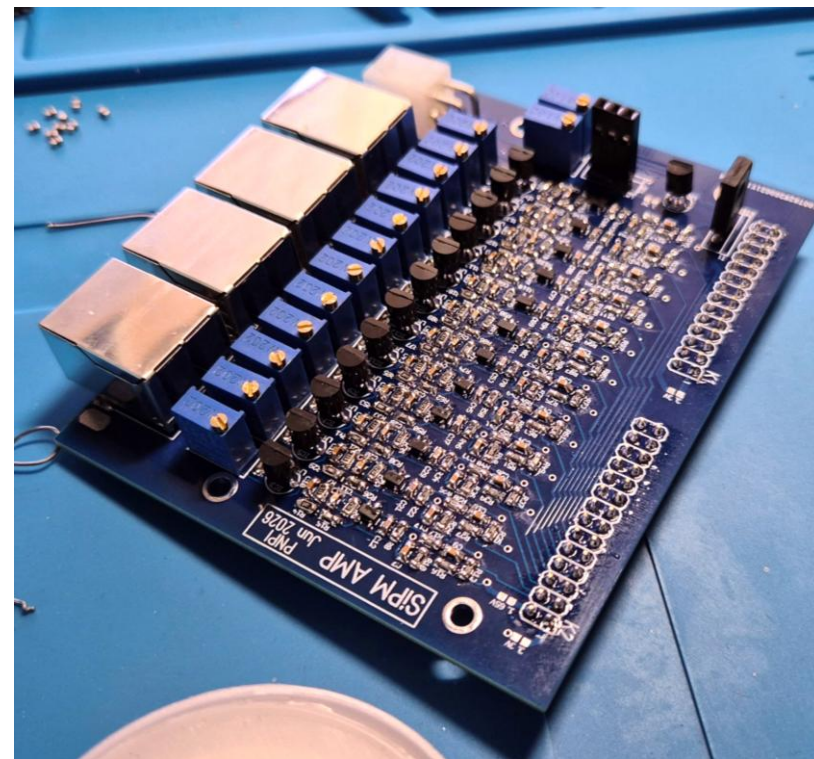
SiPM Onsemi MicroFJ-30035-TSV



Разъем для SiPM



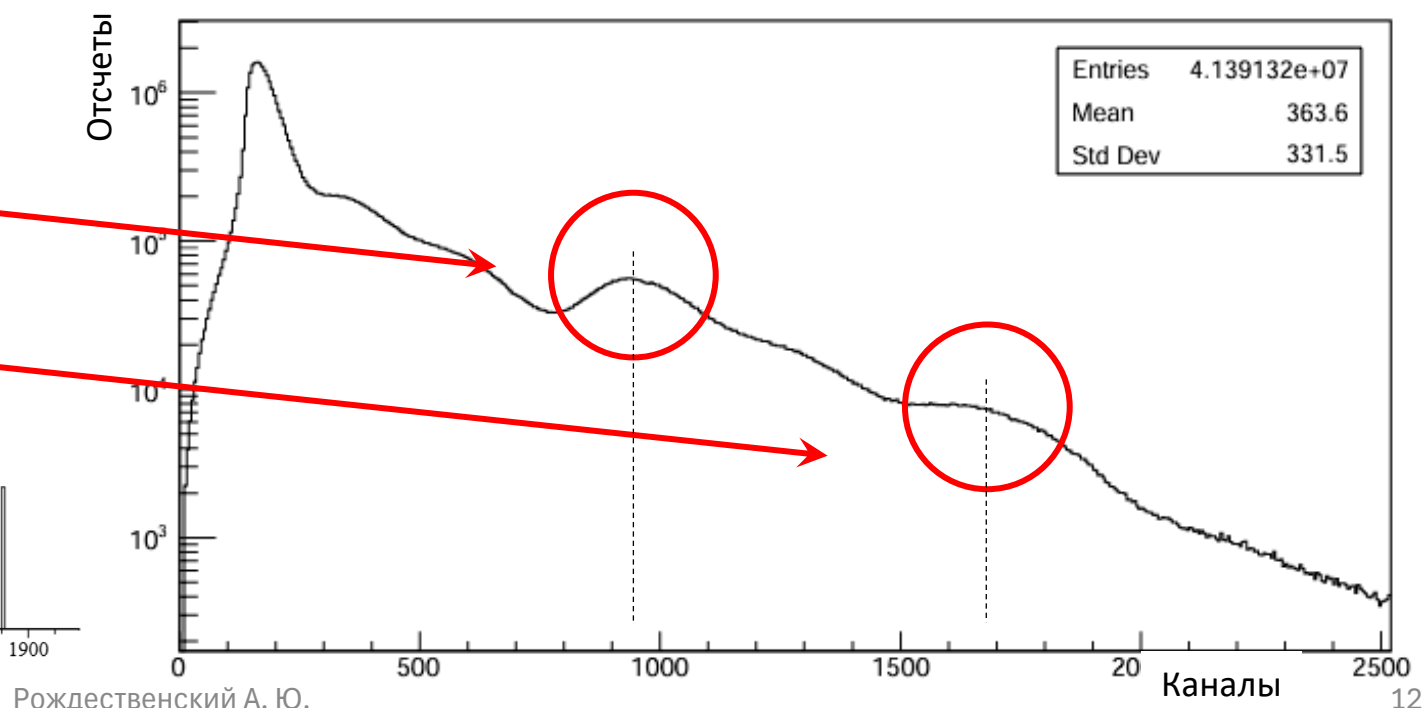
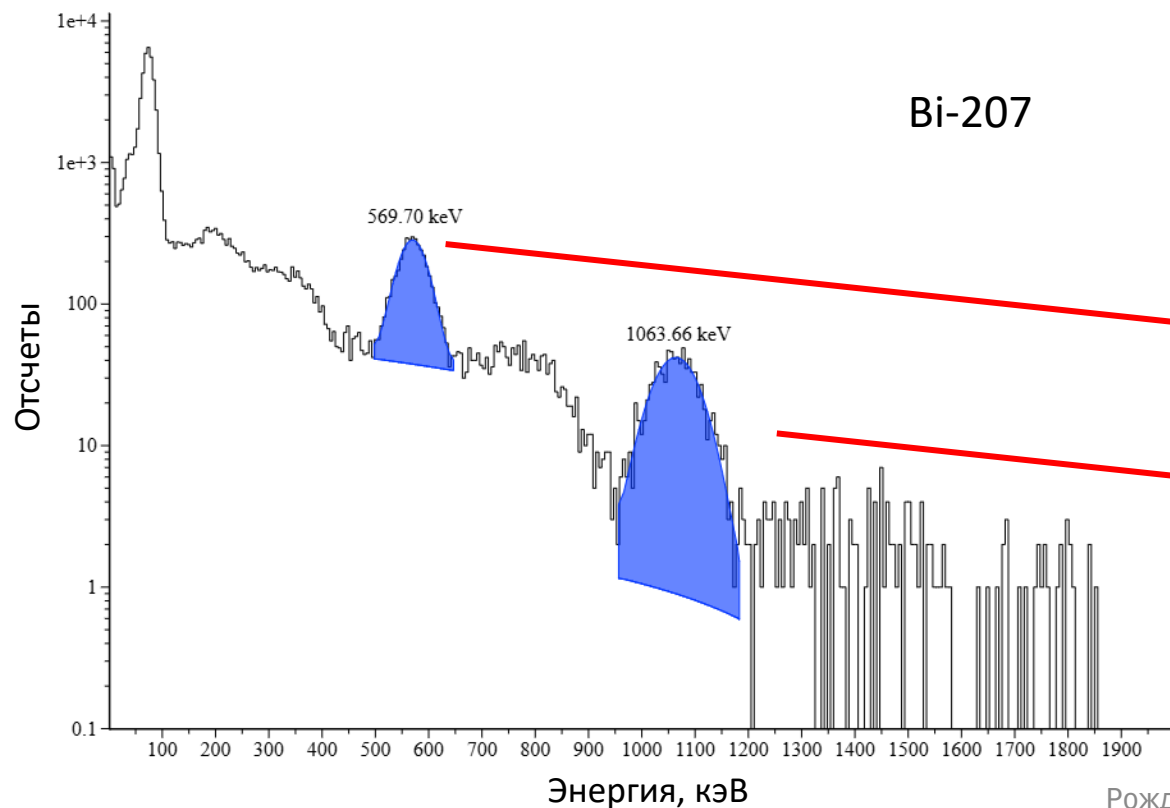
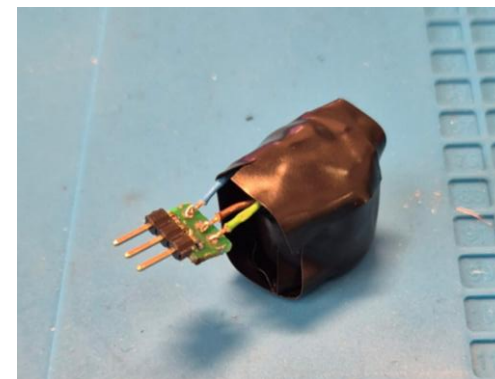
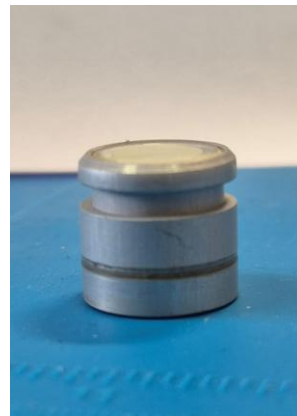
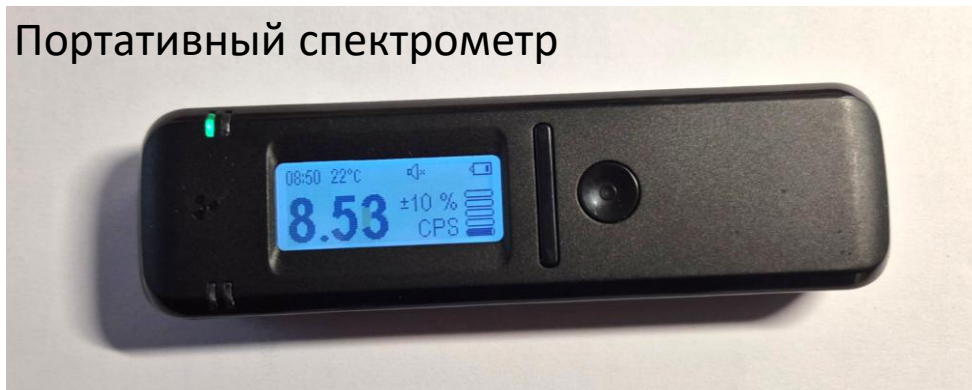
12-ти канальная плата
питания и усиления





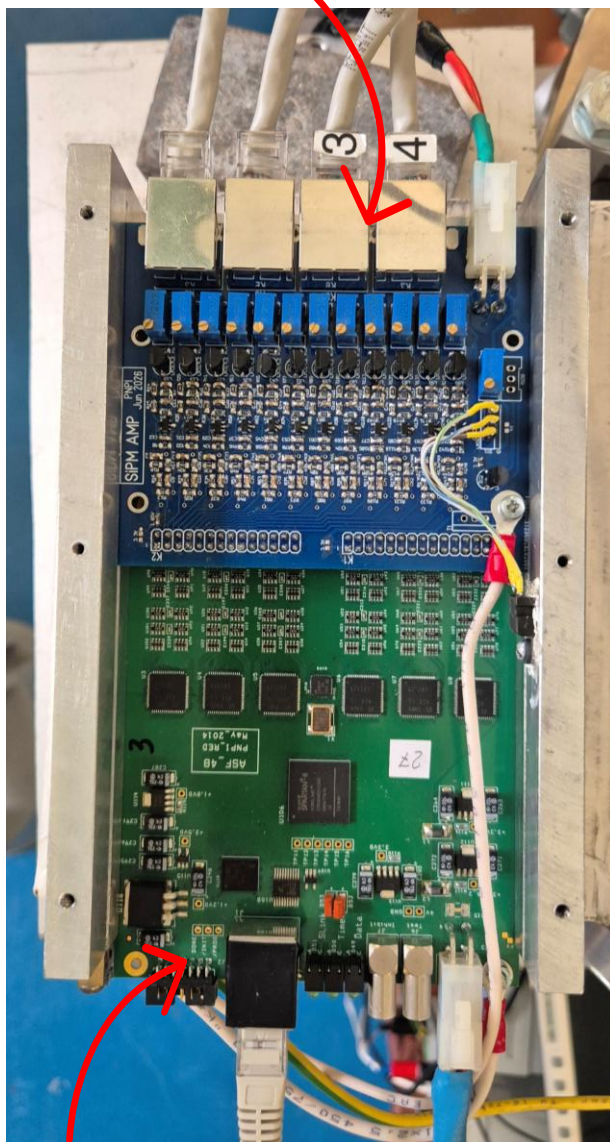
Radiacode 102

Портативный спектрометр

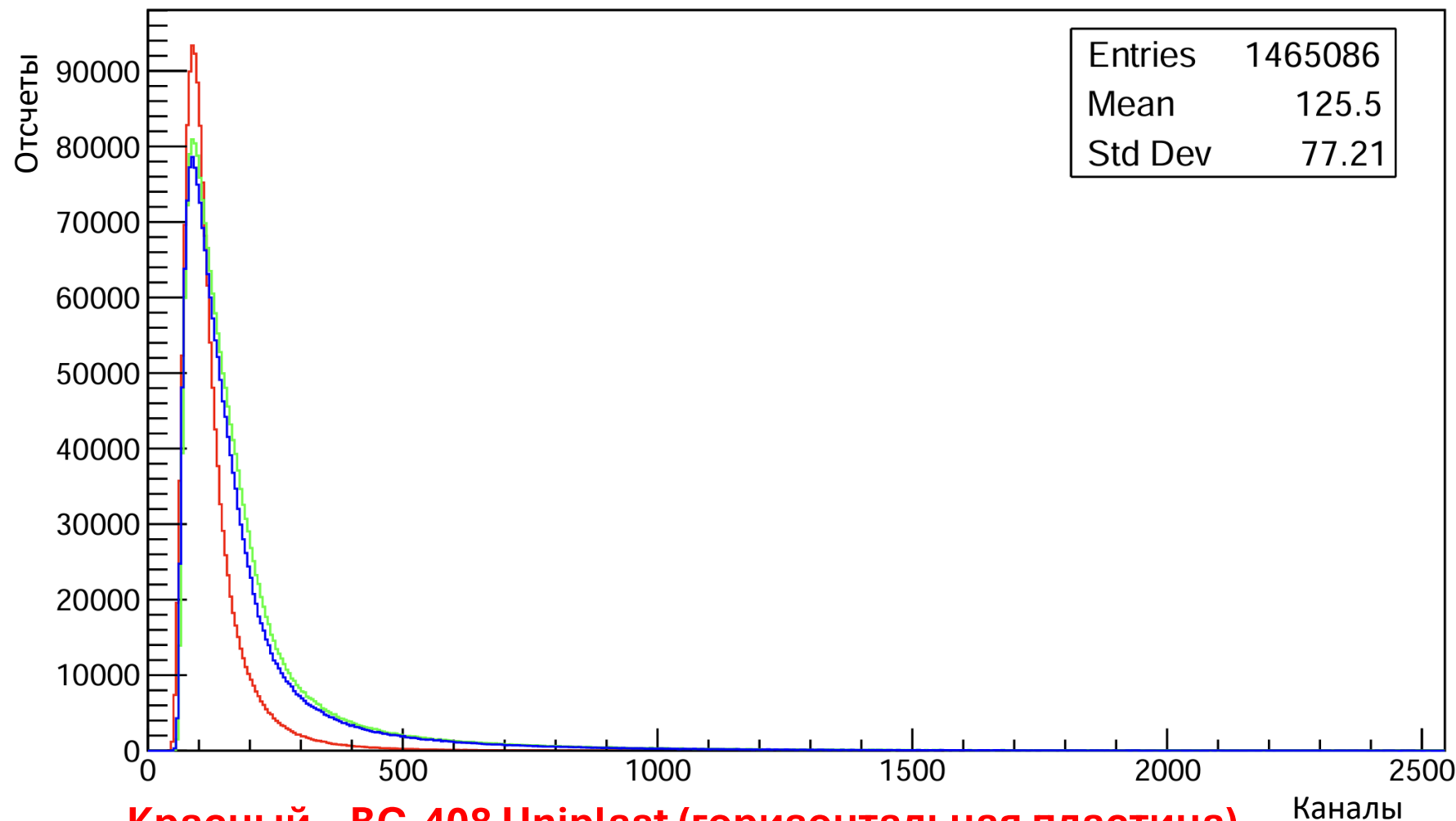




Плата SiPM



ASF 48



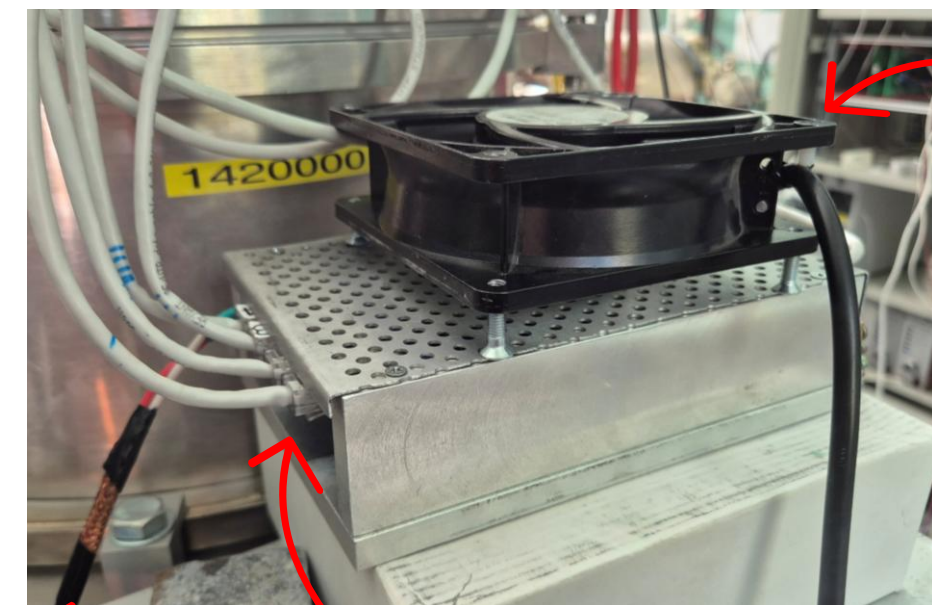
Красный – BC-408 Unioplast (горизонтальная пластина)

Синий - BC-408 Saint-Gobain (вертикальная пластина)

Зеленый - BC-408 Saint-Gobain (вертикальная пластина)

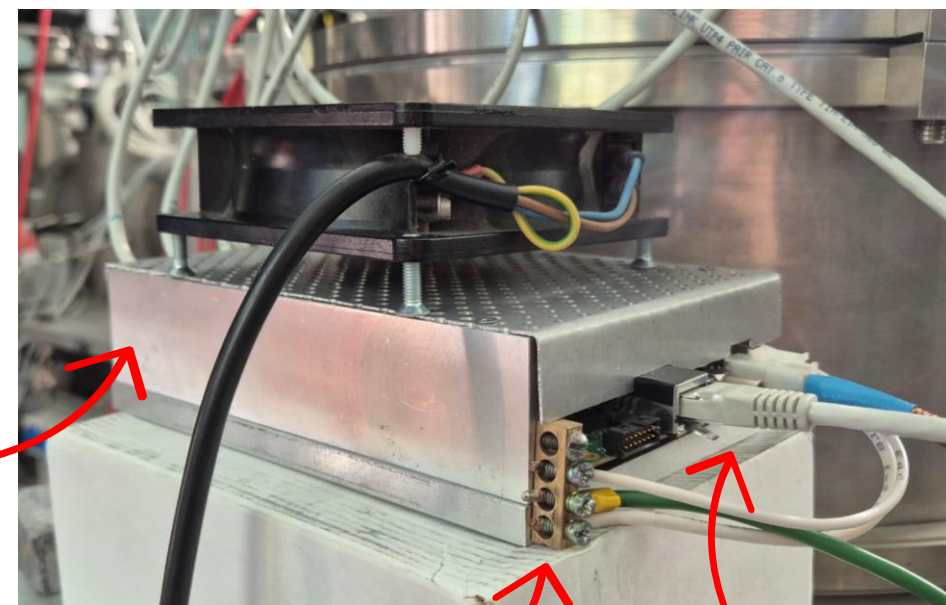


Экранировка зарядочувствительной части



Вентилятор
охлаждения

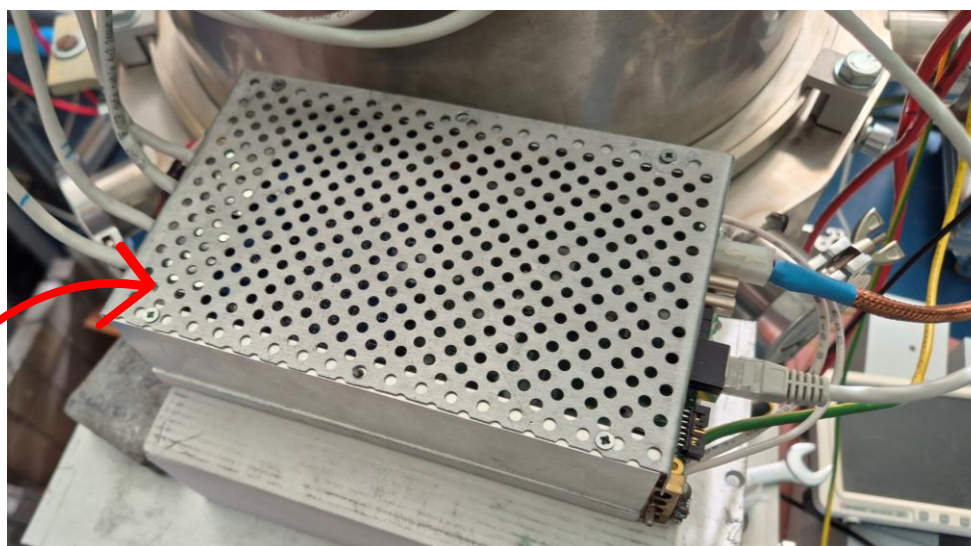
Экранирующая
коробка



Разъемы питания и съема
сигнала SiPM

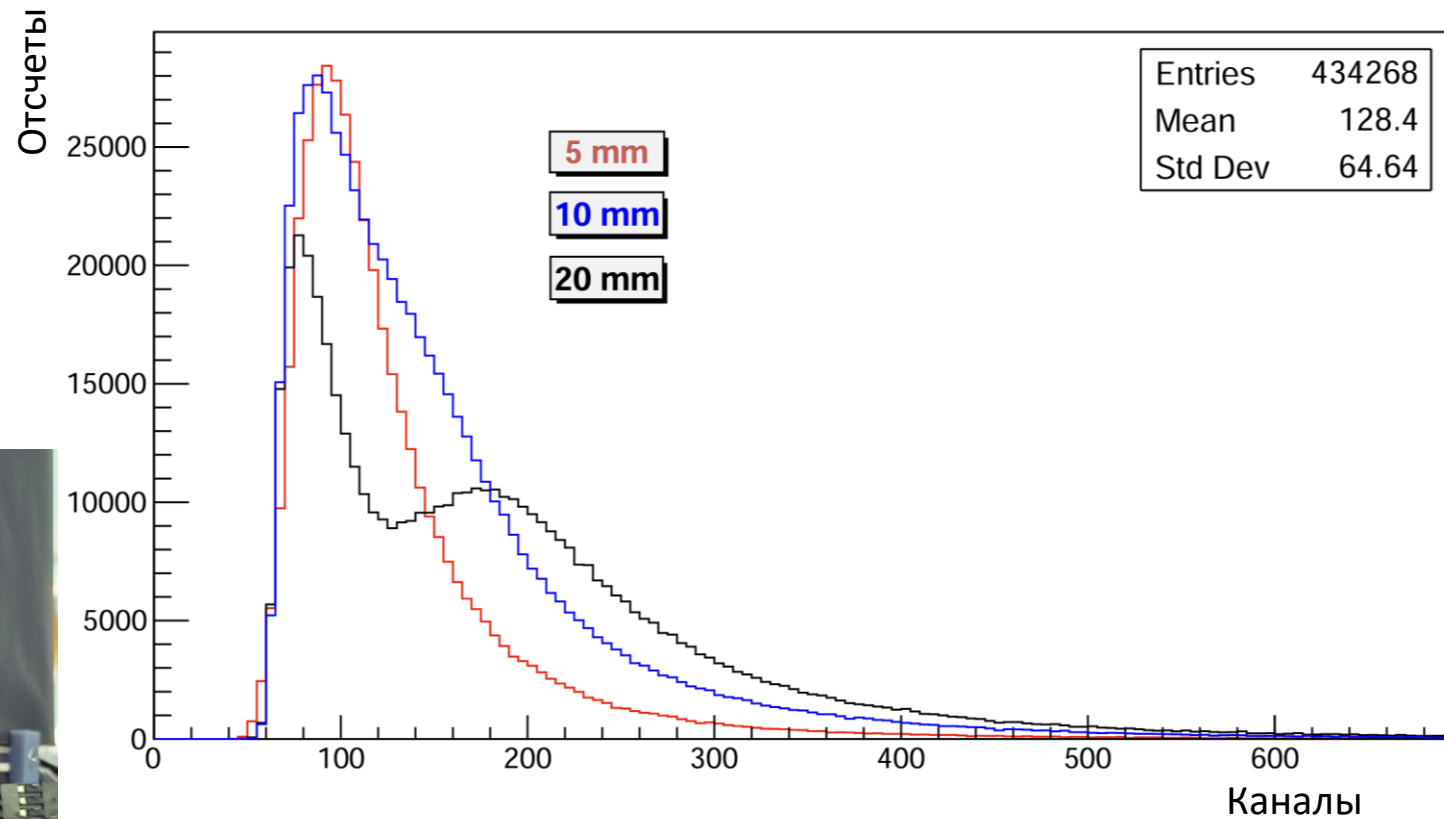
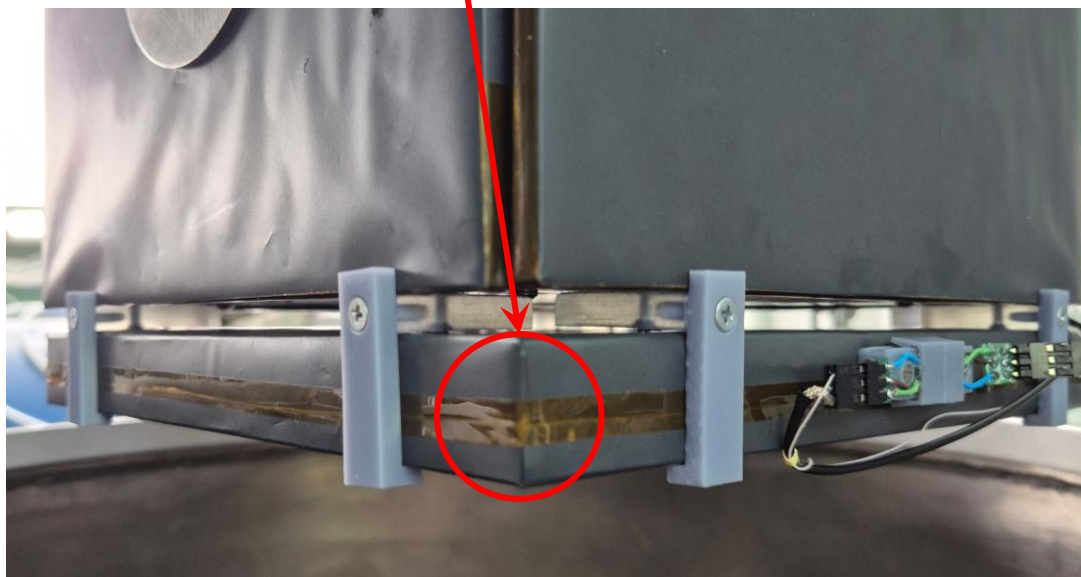
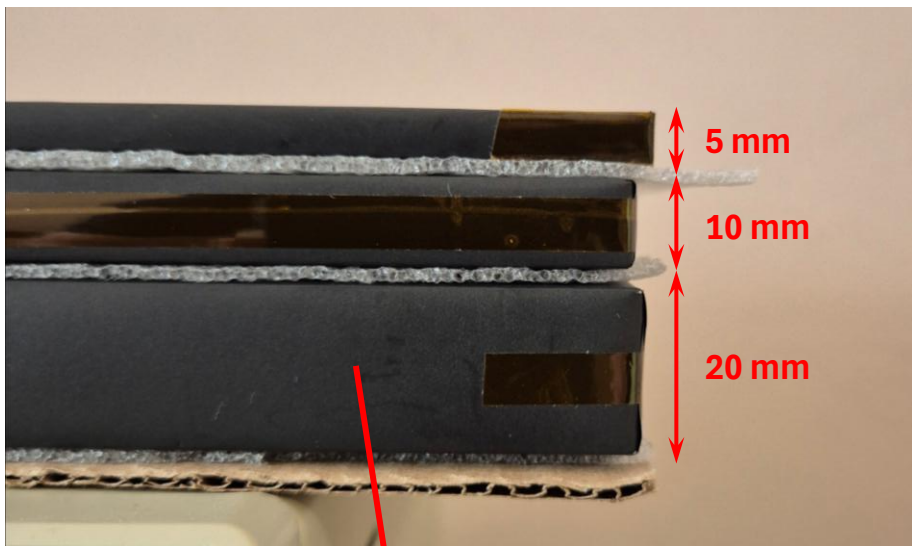
Экранированный
кабель питания

Перфорированная
крышка для
отвода тепла



Земельная
шина

Разъемы
питания и
съема сигнала
ASF 48



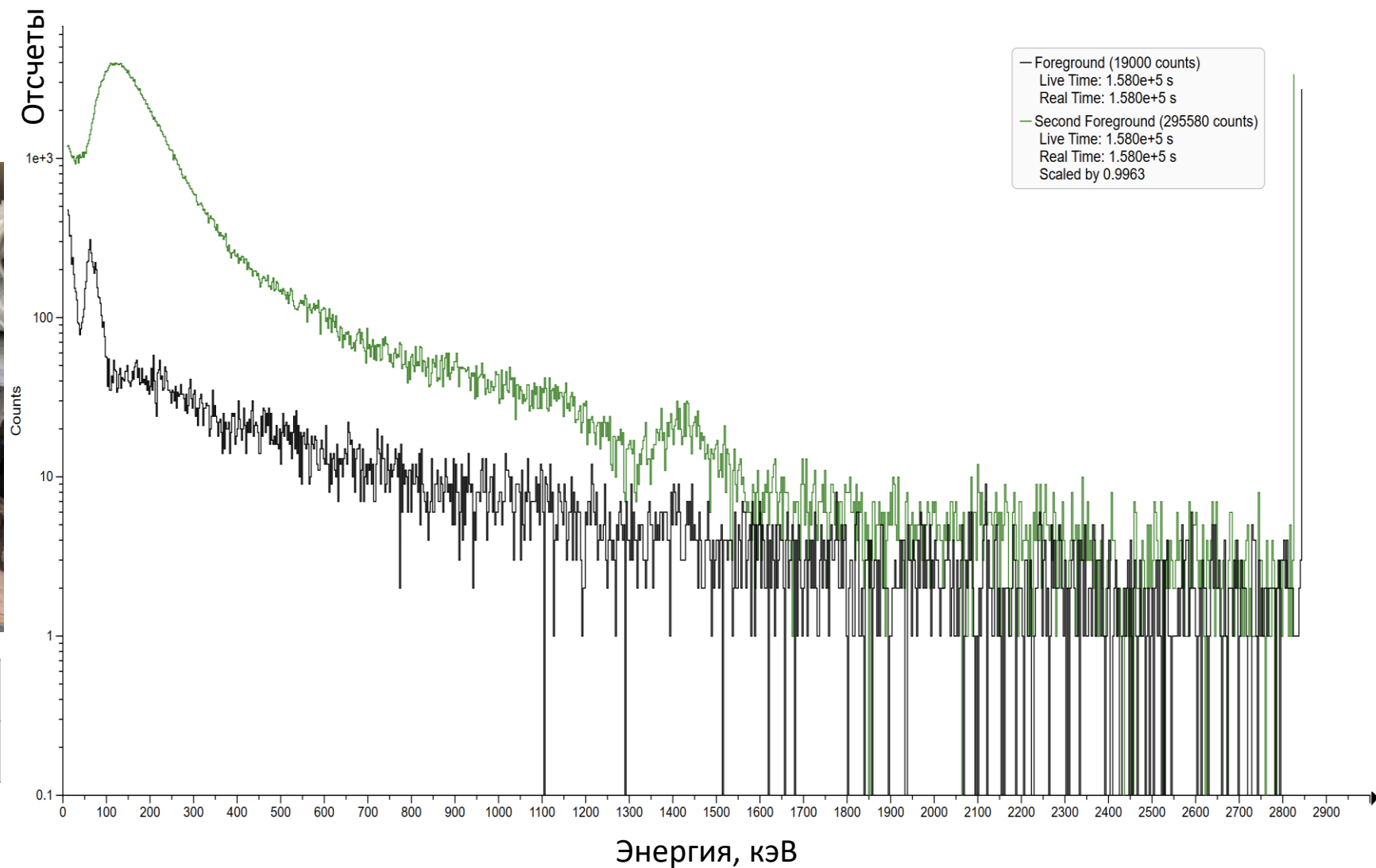


5 см свинца



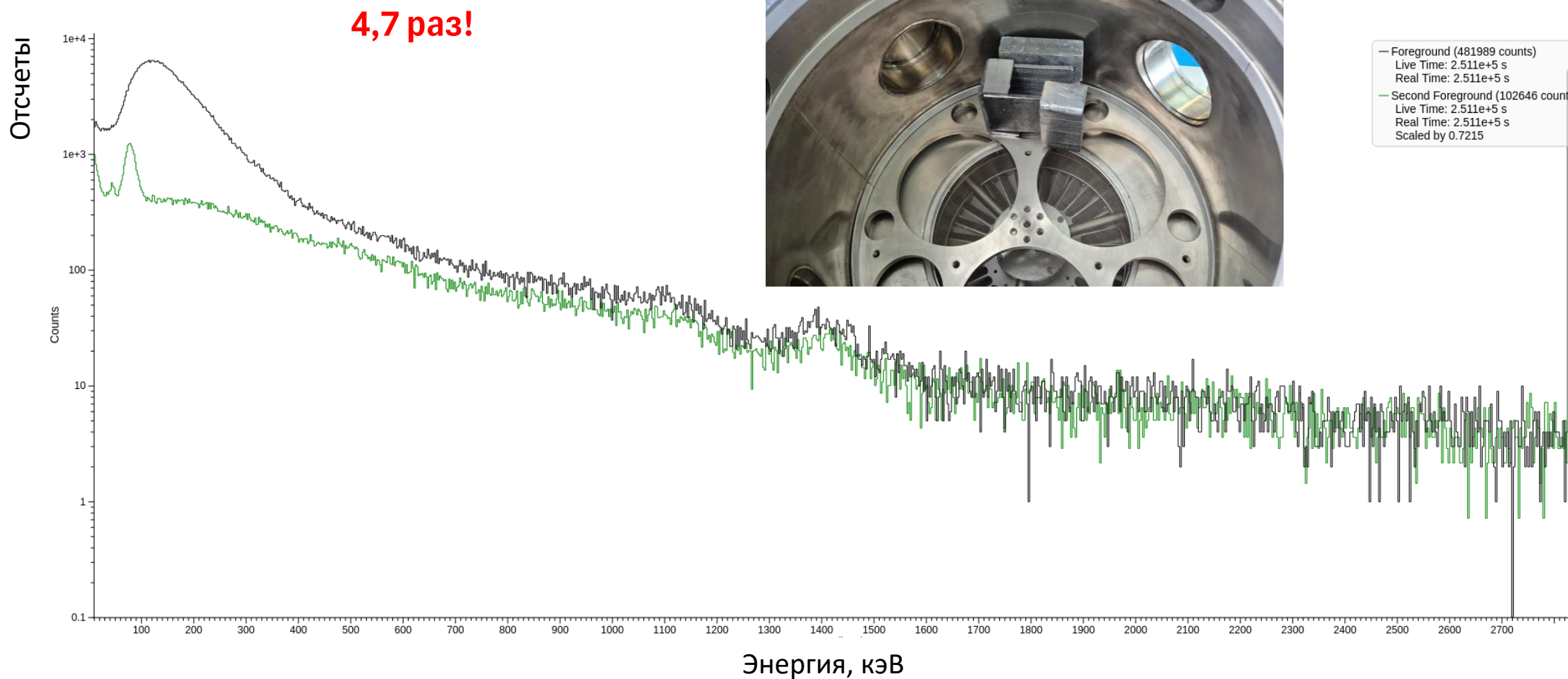
Без свинца	Со свинцом
295580	19000

15,5 раз!



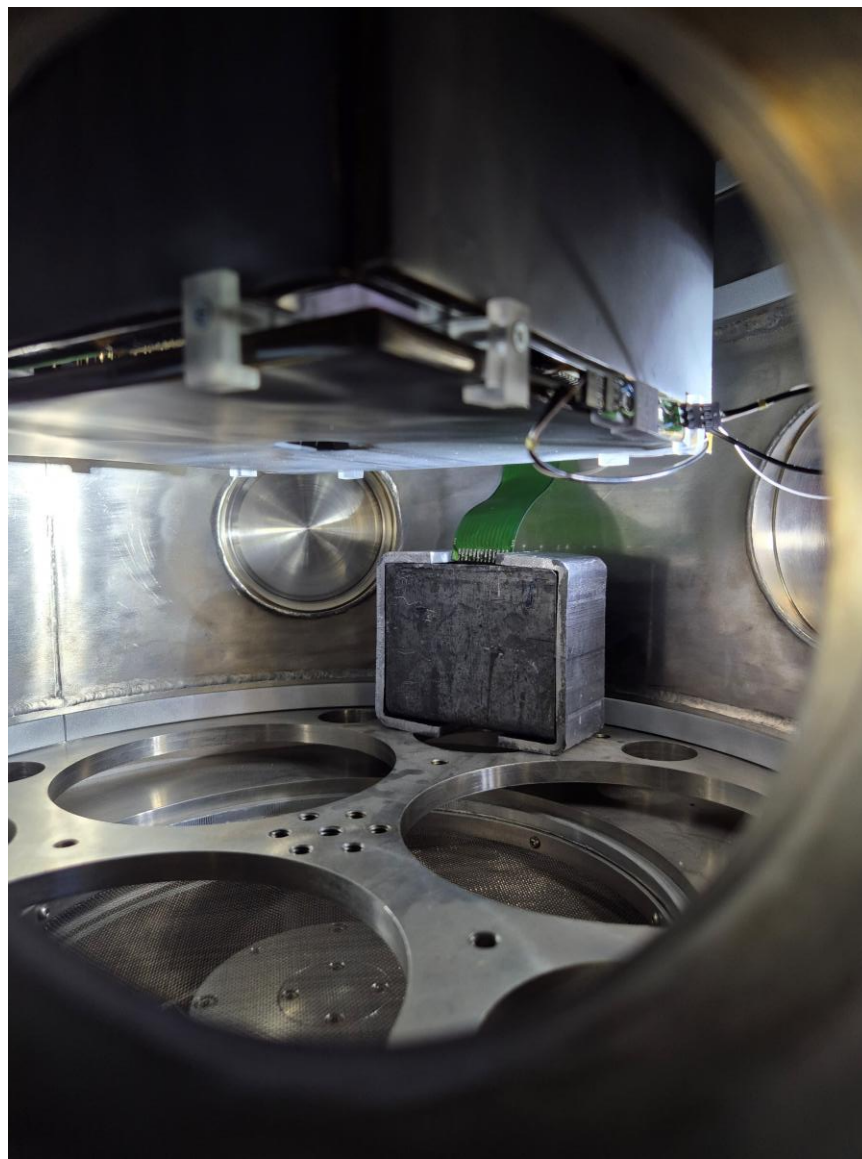
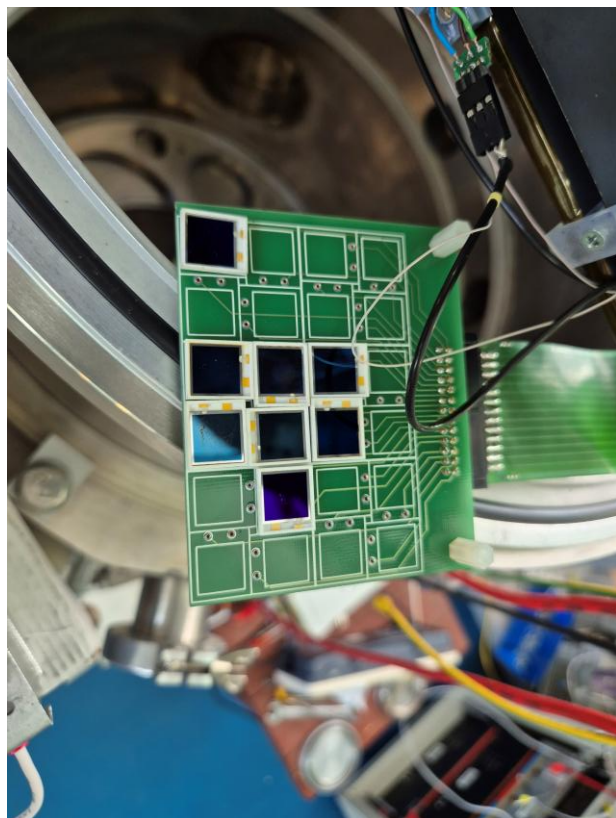


Без свинца	Со свинцом
481989	102646

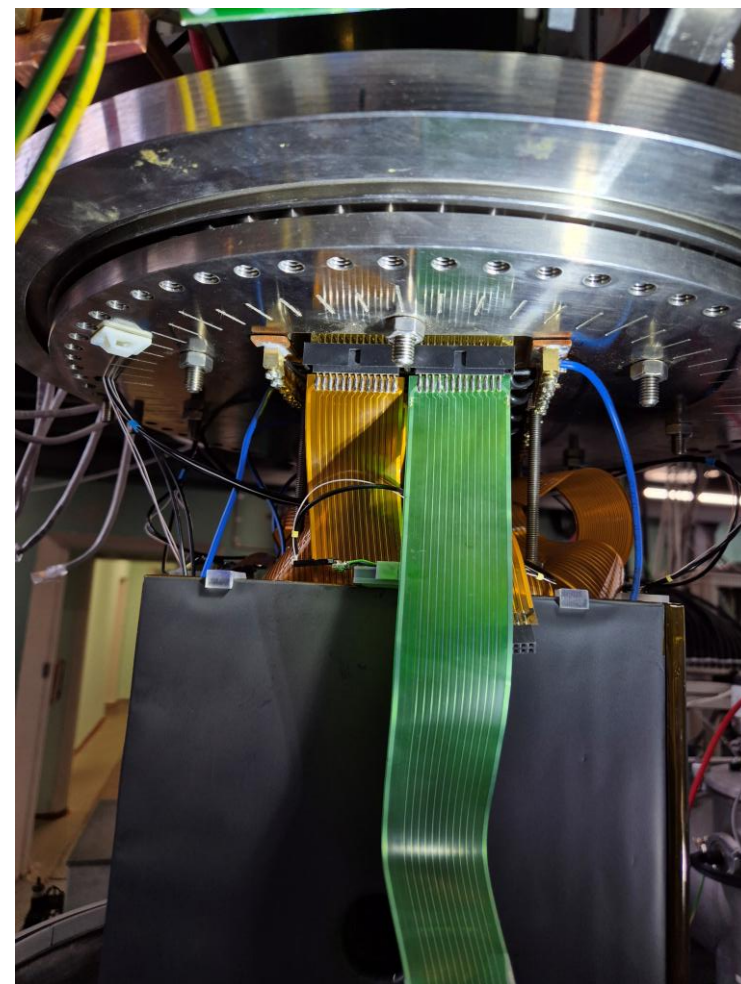




Тестовая плата с PIN-
диодами



Шлейф тестовой платы





Выполнено:

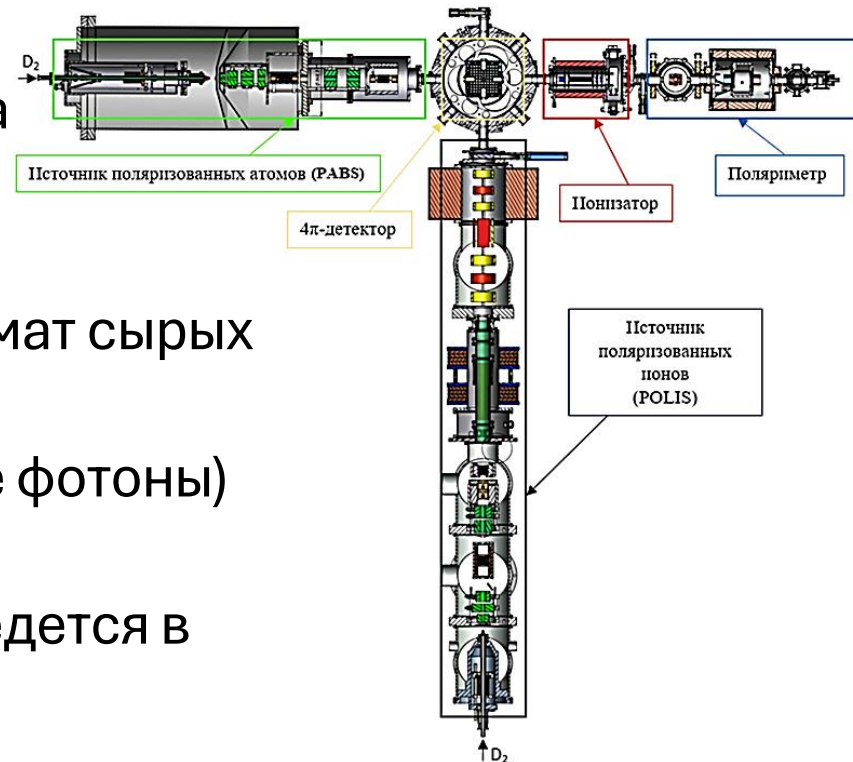
- Сборка системы в вакуумной камере центрального детектора
- Проведение тестов на радиоактивном источнике
- Проведение тестов на космических мюонах
- Разработка пакета программ для анализа данных (DAQ, формат сырых данных, online-analysis,...)
- Добавление новой физики в MC моделирование (оптические фотоны)
- Подготовка детектора к тестовому сеансу
- Оценка необходимости пассивной защиты от гамма фона (ведется в настоящее время)

План работ:

- Тестовый сеанс на неполяризованном ионном пучке с паровой мишенью

По теме работы был представлен устный доклад:

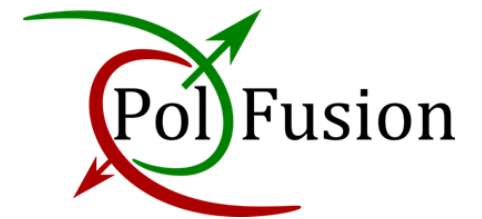
- DSPIN, ОИЯИ, Дубна, Россия (7 по 11 сентября 2026 г)





НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова



Спасибо за внимание!



Астрофизика

- Big bang
- Hydrogen burning
- Helium burning
- Advanced burning
- (carbon/neon/oxygen/silicon)
- s-process (neutron sources)
- p-process

Теория ядерного взаимодействия

- Широкий спектр моделей
- Сложности при описании прямых/непрямых измерений

Термоядерная энергетика

- Использование поляризованного топлива
- Увеличение сечения
- Управление угловым распределением вылета продуктов реакции
- Реакторы с малым выходом нейтронов

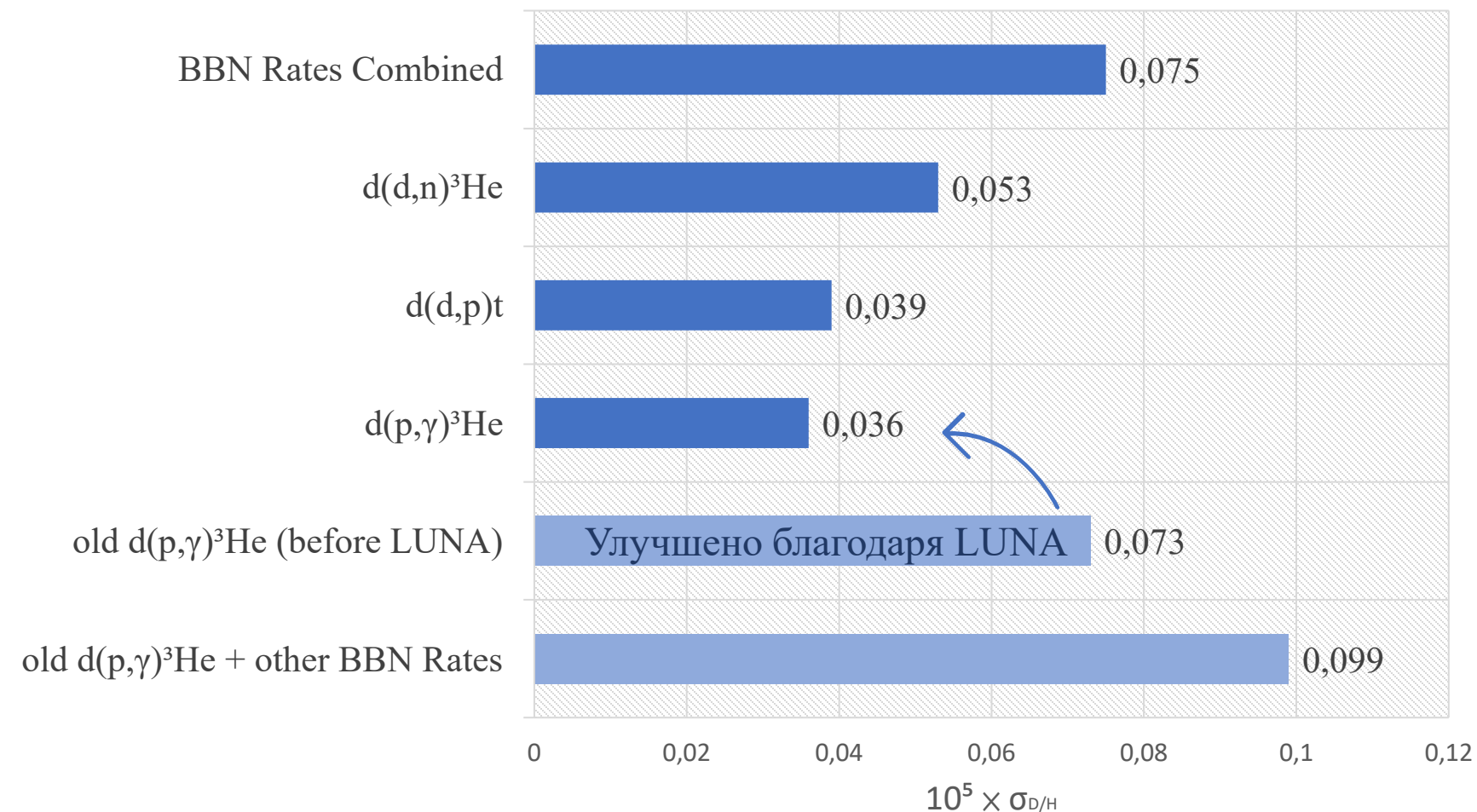
Прикладные аспекты

- Нарботка трития и гелия-3
- ^3He -ориентированная технология газоразрядных детекторов
- Источник нейтронов для наработки медицинских изотопов $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$



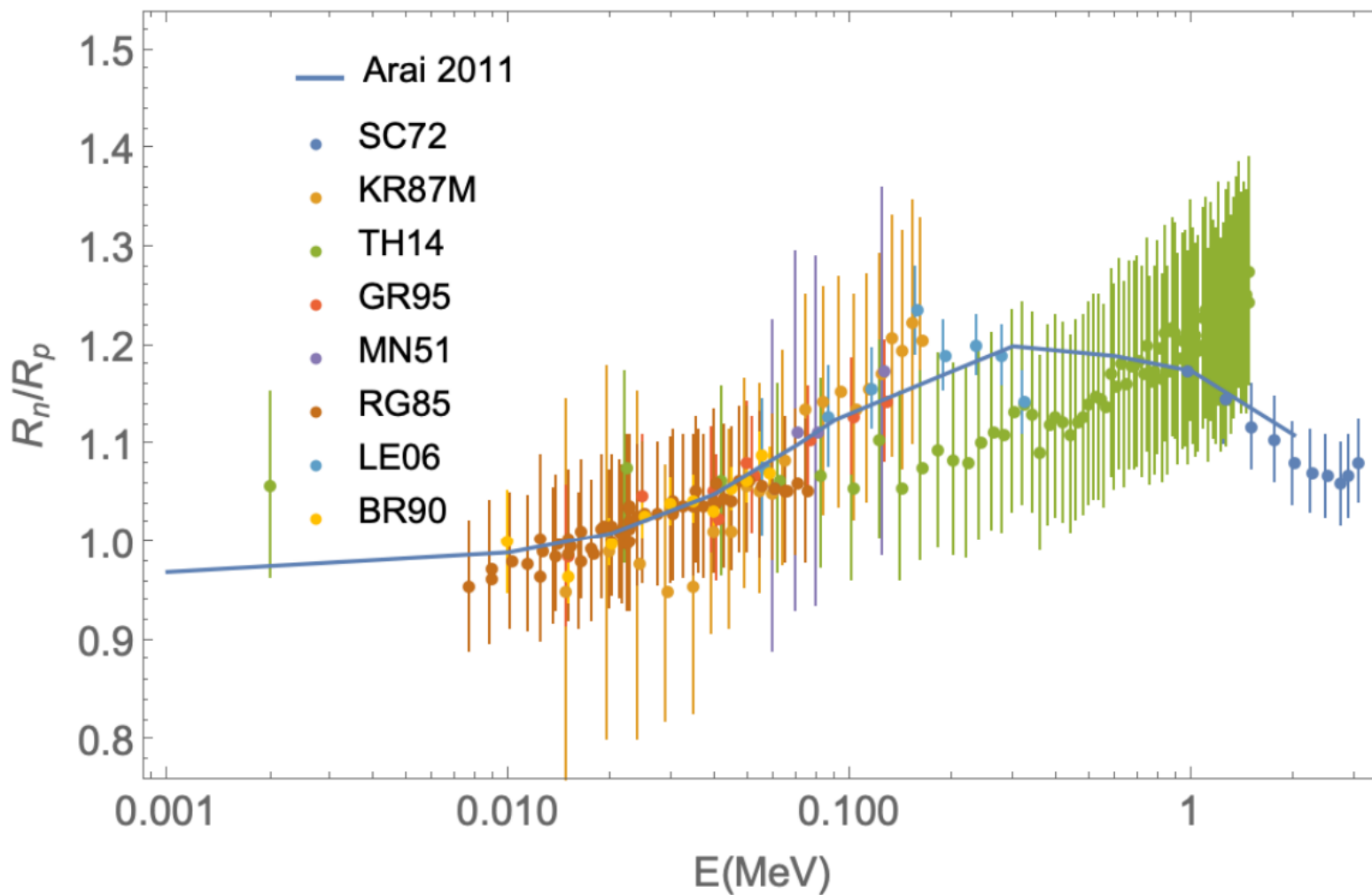
Big Bang нуклеосинтез → Первичное распределение изотопов D/H

Вклад ошибки в первичное распределение



**Необходимы
более точные
данные по dd-
синтезу!**

Global BBN Analysis: Tsung-Han Yeh, Keith Olive, Brian Fields (2021)



Отношения сечений процессов $d(d, n)^3\text{He}$ к $d(d, p)^3\text{H}$ из экспериментов (точки) и теории (сплошная линия).

Необходимы новые измерения сечения реакции неполяризованного dd-синтеза по обоим каналам!

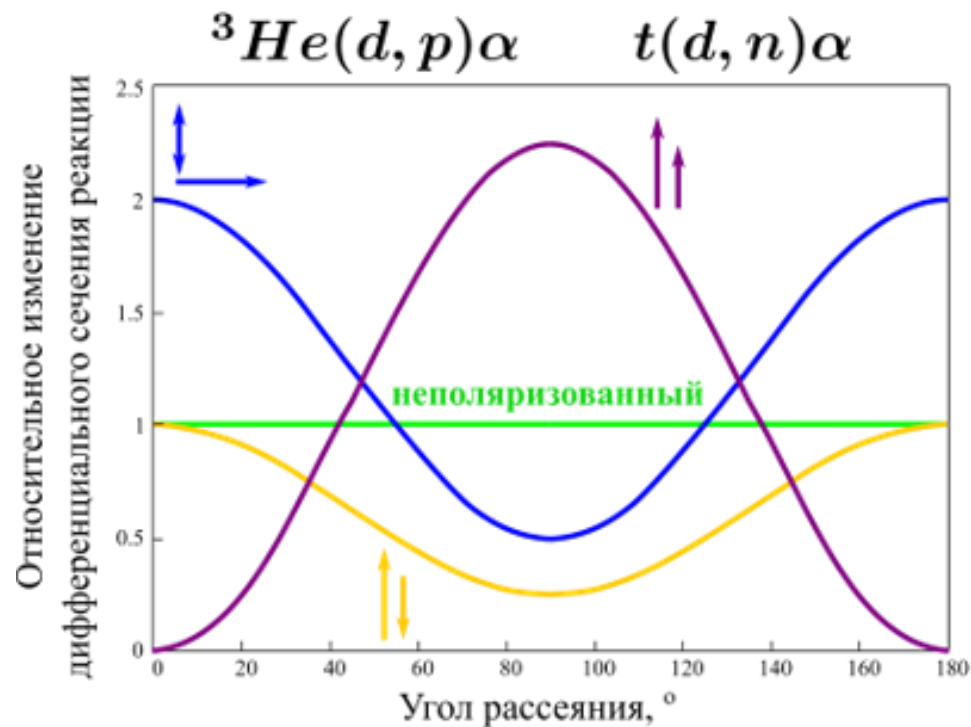
Теоретическое предсказание:
K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont, and D. Baye Phys. Rev. Lett. 107, 132502 (2011)

Ofelia Pisanti, Gianpiero Mangano, Gennaro Miele, and Pierpaolo Mazzella
Primordial Deuterium after LUNA: concordances and error budget (2020)



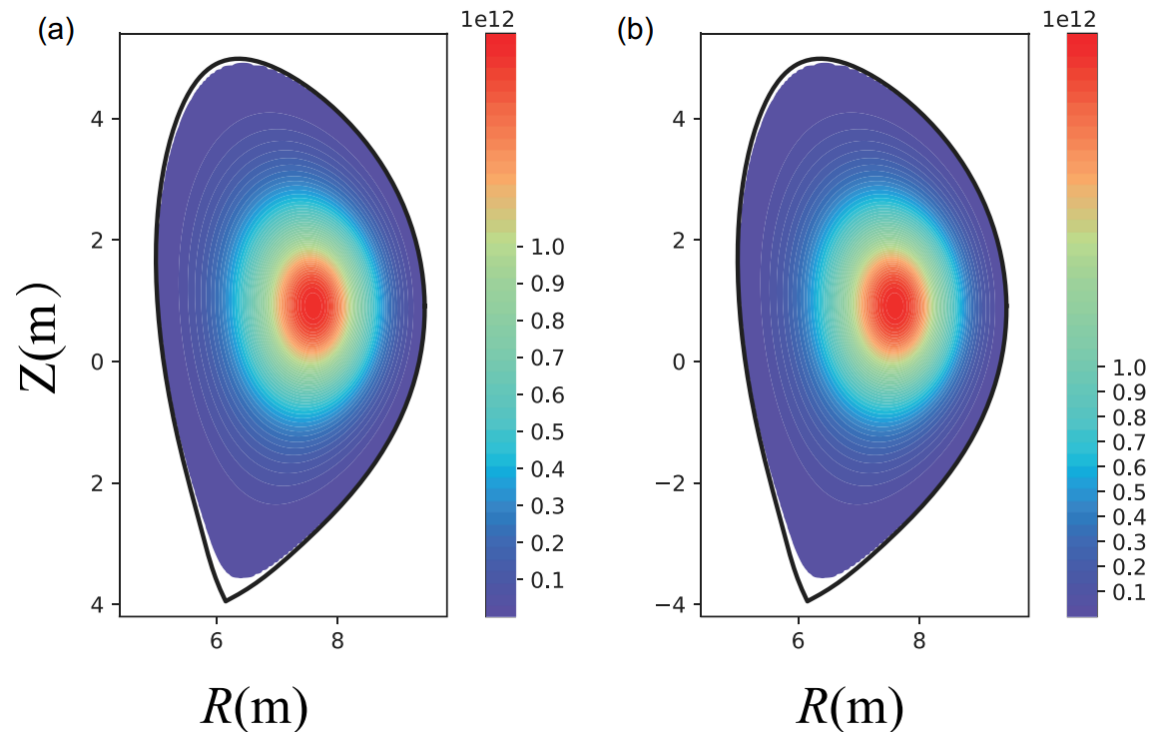
Термоядерный синтез и прикладные аспекты

- Увеличение сечения реакции
- Контроль над направлением разлета продуктов реакции
- Подавление нейтронного канала



Exp.: Ch. Leemann et al., *Helv. Phys. Acta* **44**, 141 (1971)
Theor.: G. Hupin et al. *Nature Com.* **10**, 321 (2019)

Распределения источников нейтронов в координатах (R, Z) для (а) неполяризованного случая и (б) случая полной параллельной поляризации.



W.Yang, G.Li, X.Gong, X.Gao, X.Li, H.Li... Effect of the Fusion Fuels' Polarization on Neutron Wall Loading Distribution in CFETR (2021)
<https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1969064> (China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR))



История изучения реакции ядерного dd-синтеза

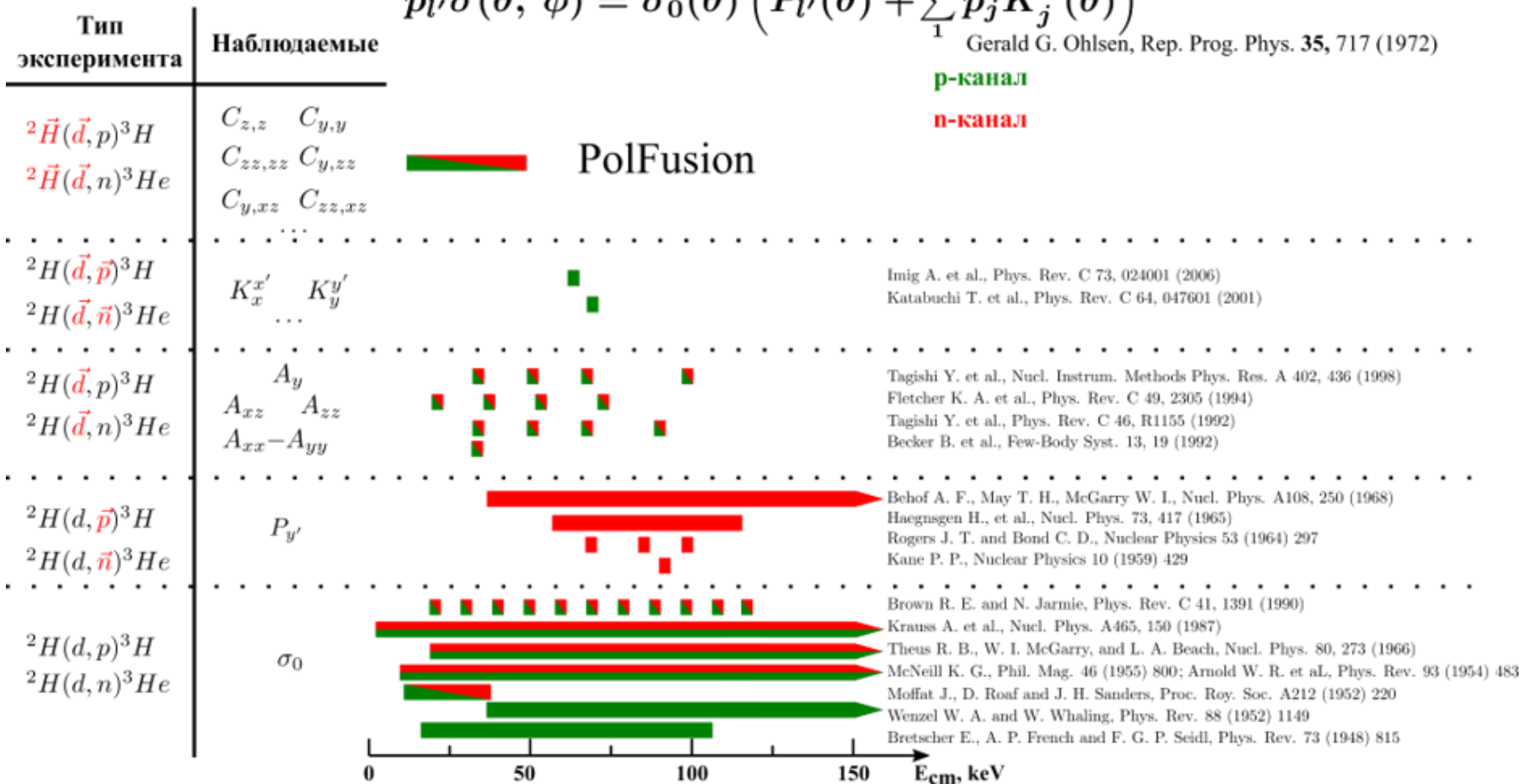
$$\sigma(\theta, \phi) = \sigma_0(\theta) \left(1 + \sum_1^9 p_j^b A_j^b(\theta) + \sum_1^9 p_j^t A_j^t(\theta) + \sum_1^9 \sum_1^9 p_j^b p_k^t C_{j,k}(\theta) \right)$$

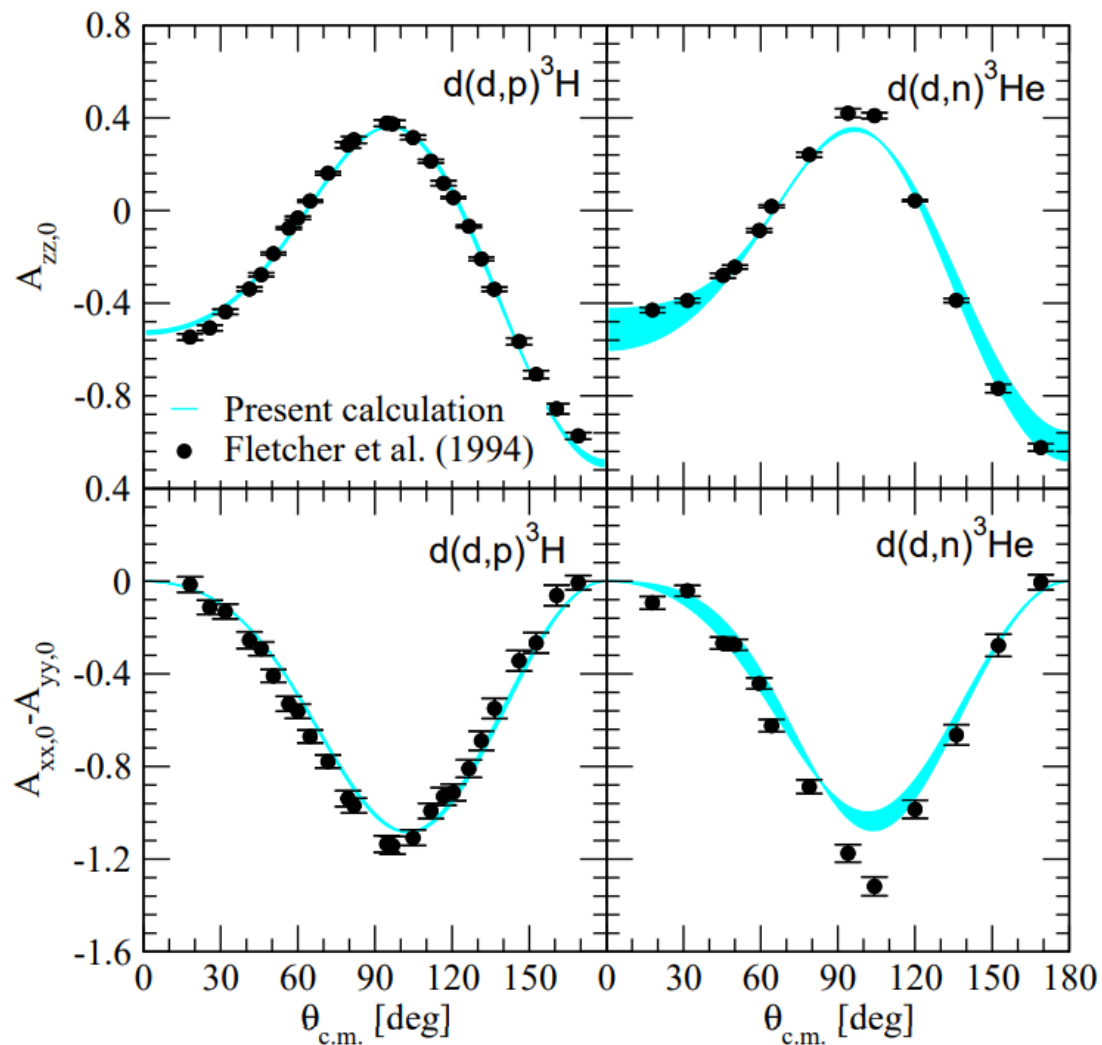
$$p_{l'} \sigma(\theta, \phi) = \sigma_0(\theta) \left(P_{l'}(\theta) + \sum_1^9 p_j K_j^{l'}(\theta) \right)$$

Gerald G. Ohlsen, Rep. Prog. Phys. **35**, 717 (1972)

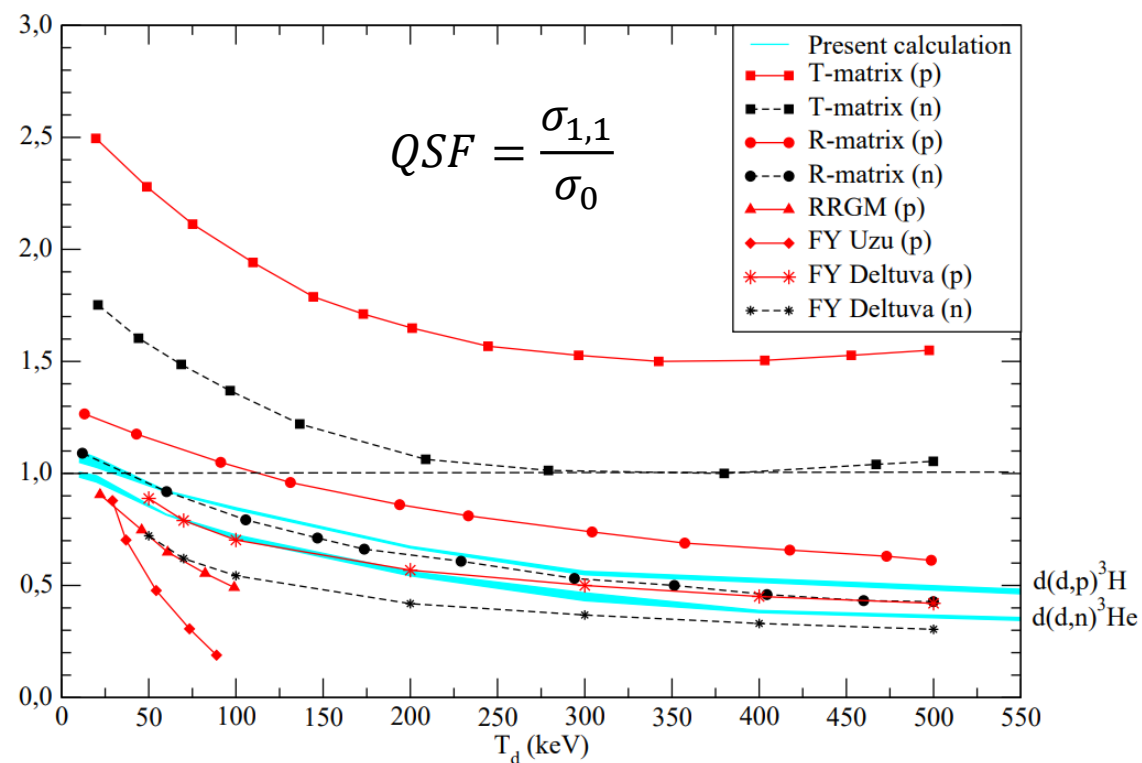
р-канал

п-канал





Наблюдаемые $A_{zz,0}$ и $A_{xx,0} - A_{yy,0}$ для реакций $\vec{d}(d, p)^3\text{H}$ и $\vec{d}(d, n)^3\text{He}$ при $T_d = 21$ keV. Голубые полосы показывают результаты настоящих расчетов.

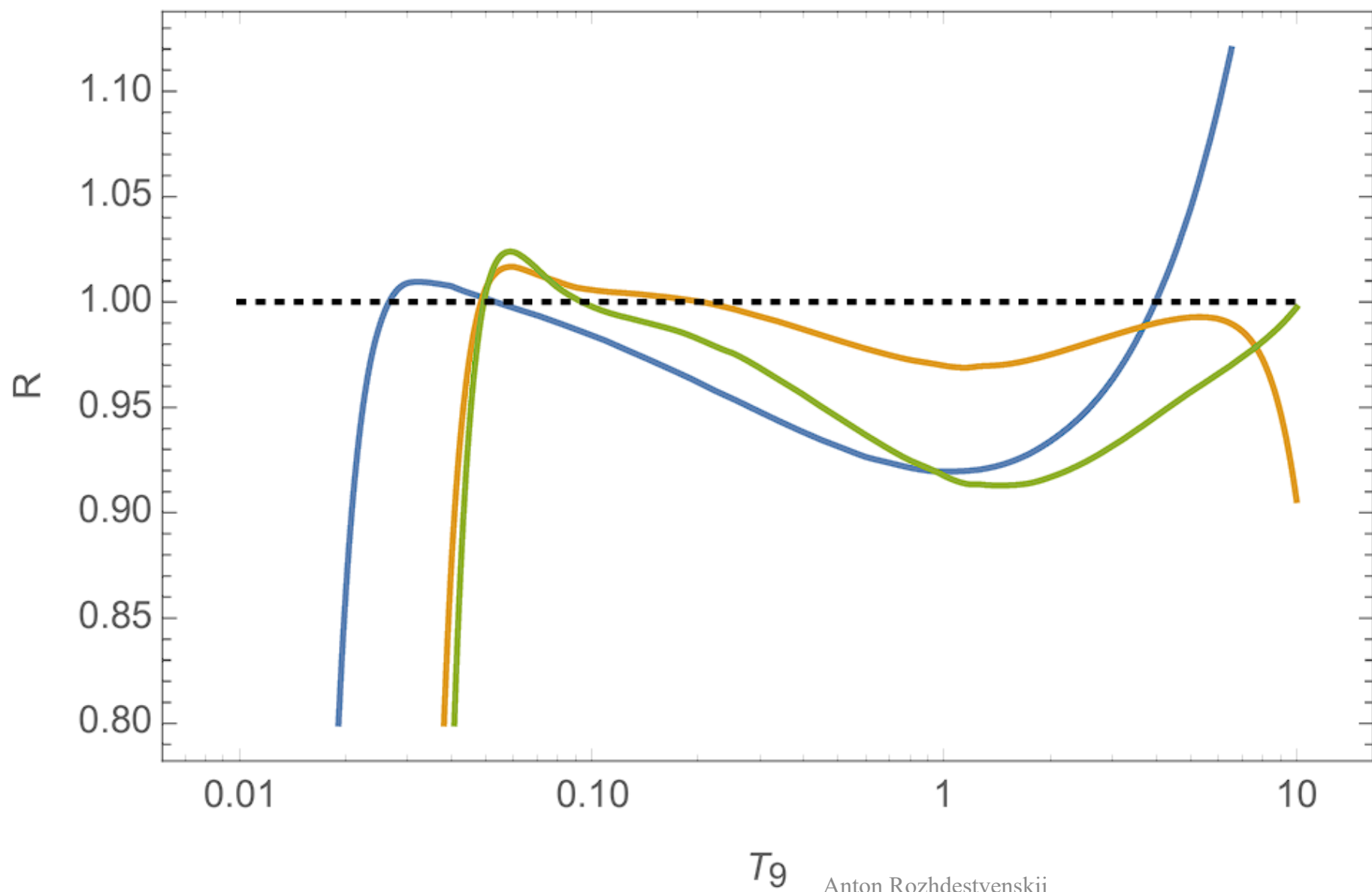


QSF для реакций $d(d, n)^3\text{He}$ и $d(d, p)^3\text{H}$.



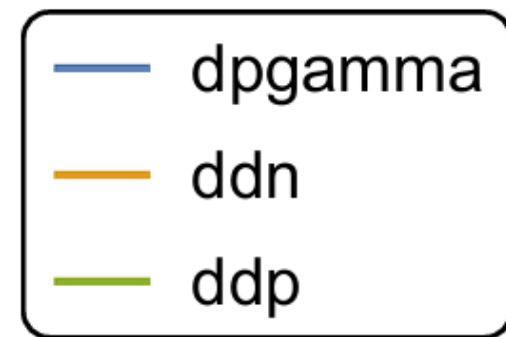
Положения на защиту

1. Установлен характер структуры фонового излучения в эксперименте PolFusion при одновременной регистрации нейтронного ($d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$) и протонного ($d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$) каналов dd-реакции в области энергий 10–100 кэВ. Показано, что на качество регистрации нейтронного канала dd-синтеза сильное влияние оказывают мюон-индуцированная компонента фона и гамма-излучение от естественной радиоактивности, что определяет требования к методам защиты.
2. Предложена методика активного подавления фона и модель компактной veto-системы на основе пластического сцинтиллятора, интегрированной непосредственно в вакуумный объем детекторной камеры PolFusion. В отличие от стандартных решений, размещаемых вне детекторной сборки (водные черенковские veto в CONUS, водно-сцинтилляционные veto в COSINUS), предложенная система использует свободное пространство вокруг 4π-геометрии кремниевого детектора и не требует увеличения габаритов вакуумной камеры.
3. Предложена комбинированная модель для описания процесса регистрации продуктов реакции ядерного dd-синтеза и частиц от источников фоновых излучений. Модель реализована в виде программного обеспечения, включающего в себя генераторы основного (угловое распределение продуктов реакции ядерного dd-синтеза) и фоновых процессов (гамма-излучение от естественной радиоактивности и мюонную компоненту космического излучения), учет геометрии 4π-детекторной сборки и veto-системы, их характеристик и описание откликов детекторов.
4. Реализована предложенная компактная veto-система на основе пластического сцинтиллятора BC-408, интегрированная в вакуумный объем детекторной камеры PolFusion. Система включает сцинтилляционные элементы BC-408, WLS-волокно для светосбора и кремниевые фотоумножители. Показано, что реализованная конфигурация соответствует геометрии, описанной в комбинированной модели, и обеспечивает штатный режим работы совместно с PIN-диодами главного детектора без взаимных помех и без ухудшения энергетического разрешения.
5. Экспериментально установлена зависимость эффективности подавления фонового излучения от углового распределения потока космических мюонов при одновременной регистрации нейтронного и протонного каналов dd-реакции. Показано, что эффективность подавления составляет 50%, что позволяет обеспечить выделение нейтронного канала, без потери статистически значимых экспериментальных данных.



Dr. Ryan Cook, Durham University
Ratio of two BBN model codes

$T_9 = 1 \sim 86 \text{ keV}$



POLIS

Источник
поляризованных
ионов

Ионный пучок
10-50 кэВ
 $1.2 \cdot 10^{16}$ атомов/с

Сопло:
 $d = 1.3$ мм
 $T = 65$ К

4π – детектор

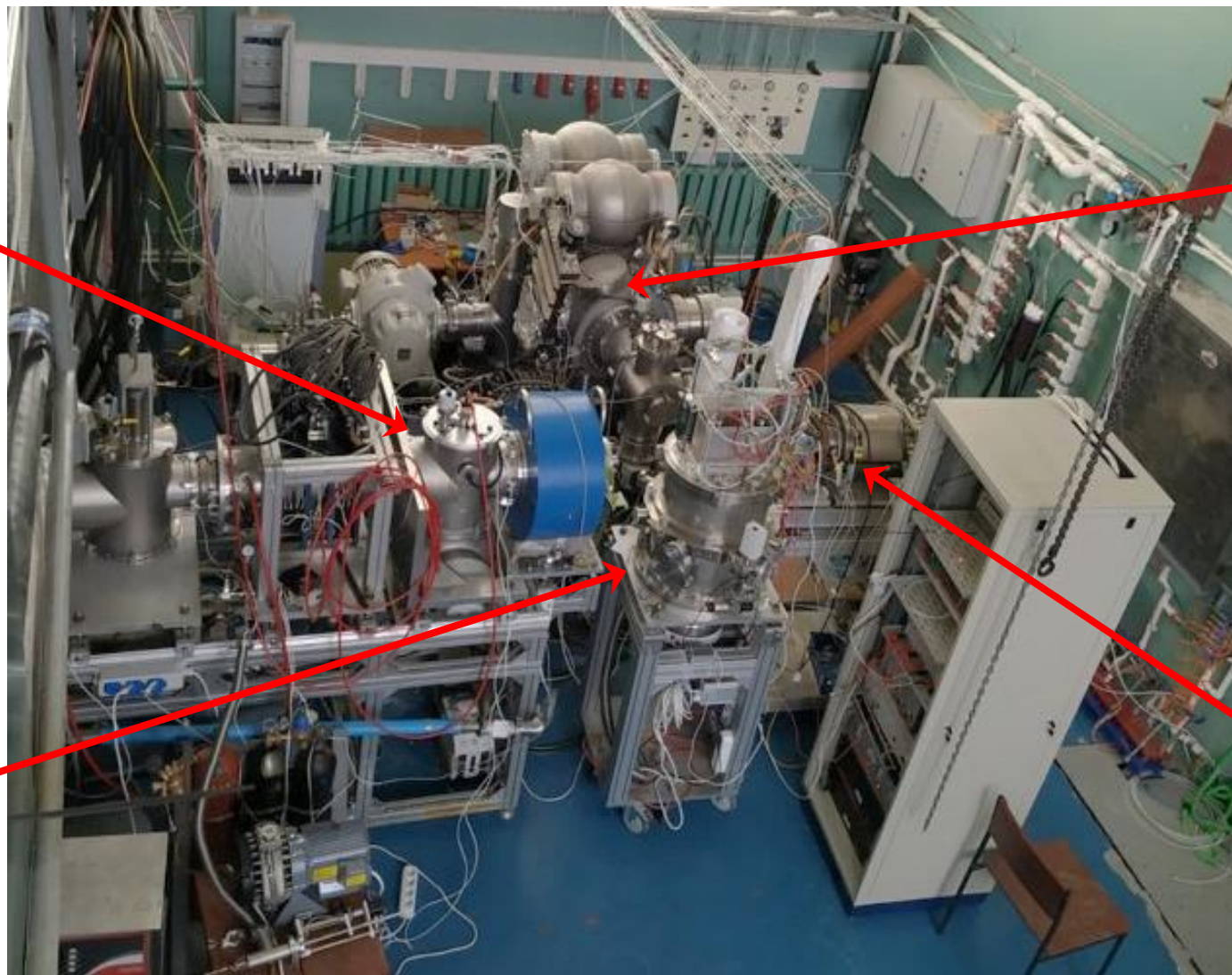
PABS

Источник
поляризованных
атомов

Атомарный пучок
0.01 эВ
 $4 \cdot 10^{16}$ атомов/с

Сопло:
 $d = 2$ мм
 $T = 65-85$ К

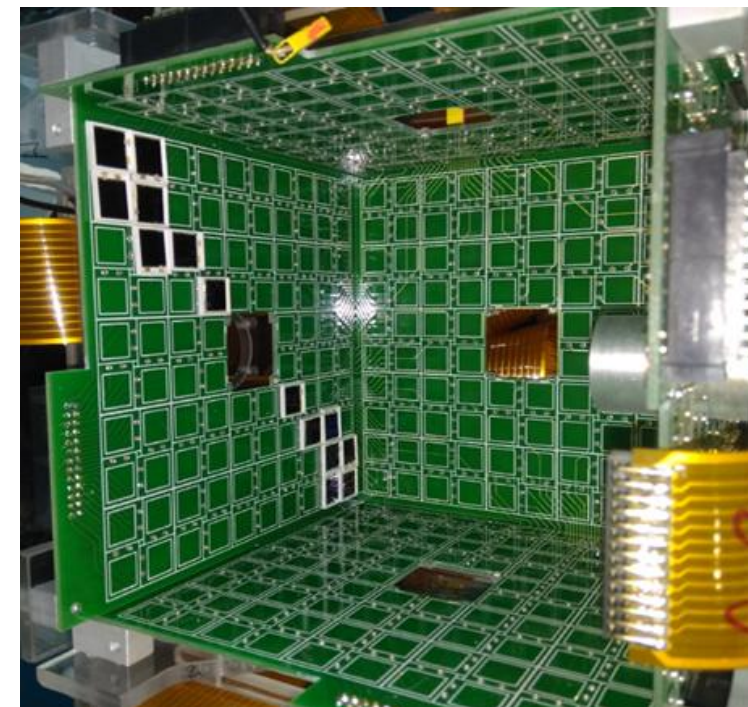
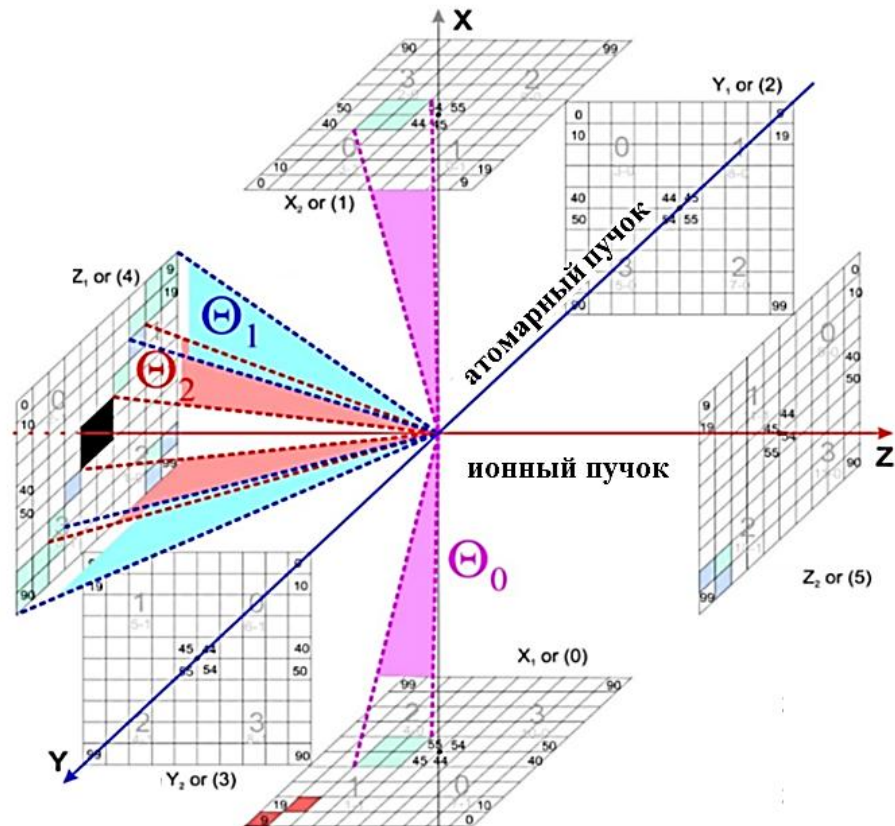
Поляриметр





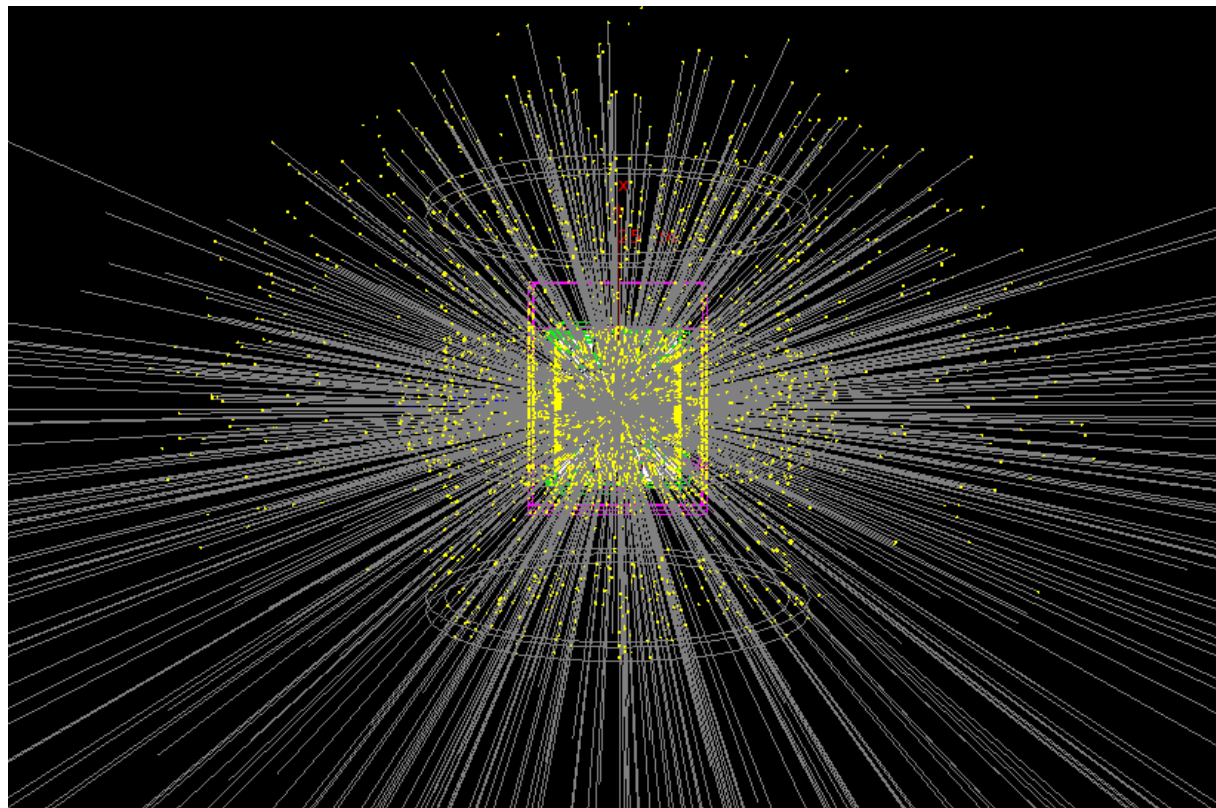
Детекторная система

Координатная система детектора

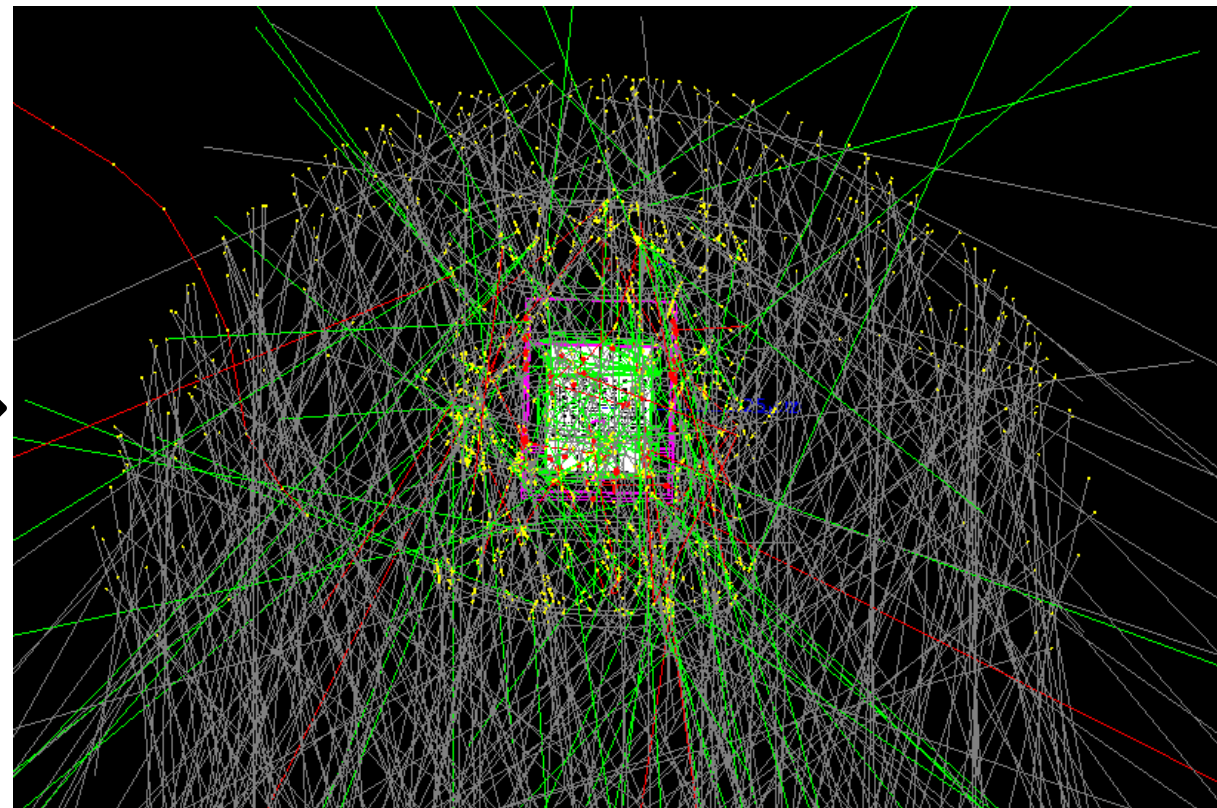


Внешний вид детектора

Внутреннее устройство
детектора



Старый генератор



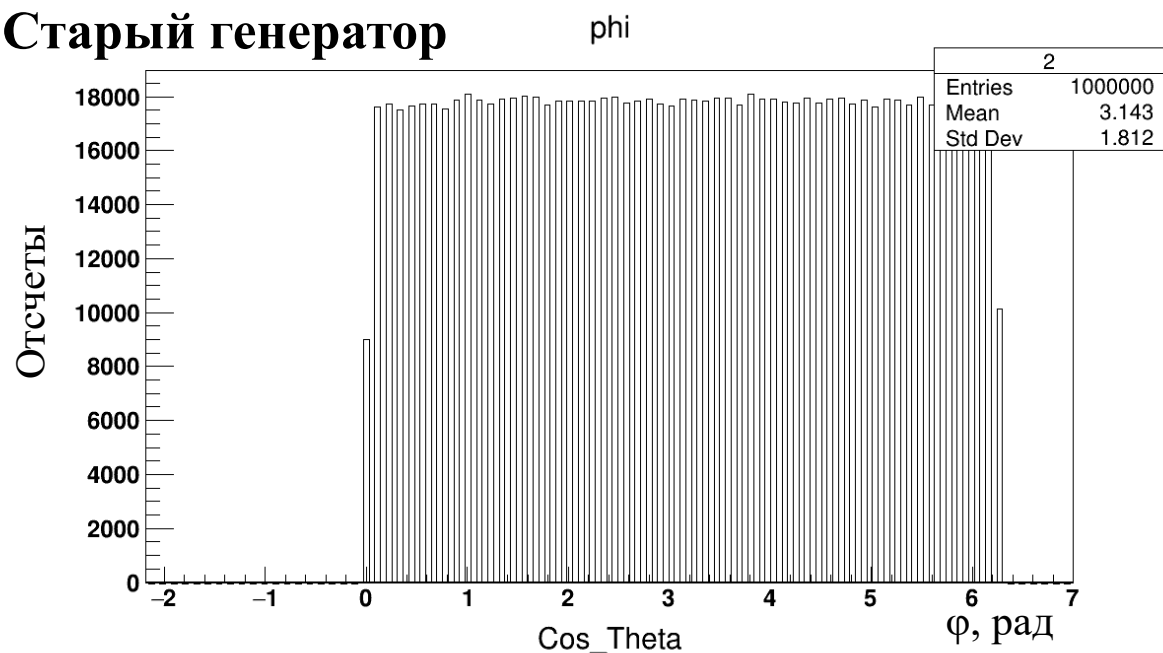
Генератор EcoMug

D. Pagano, G. Bonomi, A. Donzella, A. Zenoni, G. Zumerle, N. Zurlo,
EcoMug: An Efficient COsmic MUon Generator for cosmic-ray muon applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1014, 2021, 165732, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165732>.

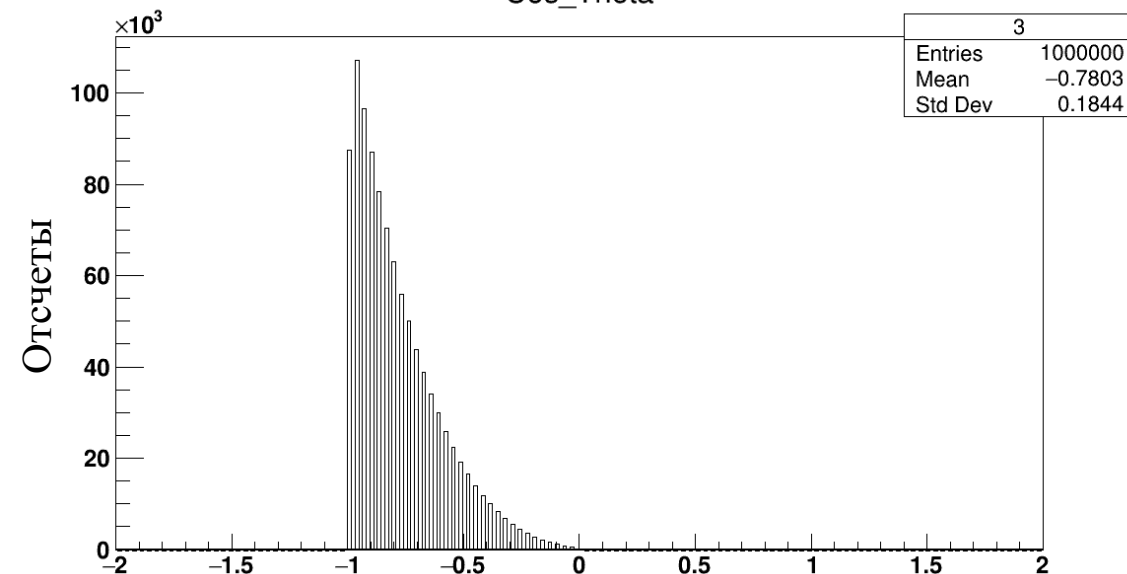
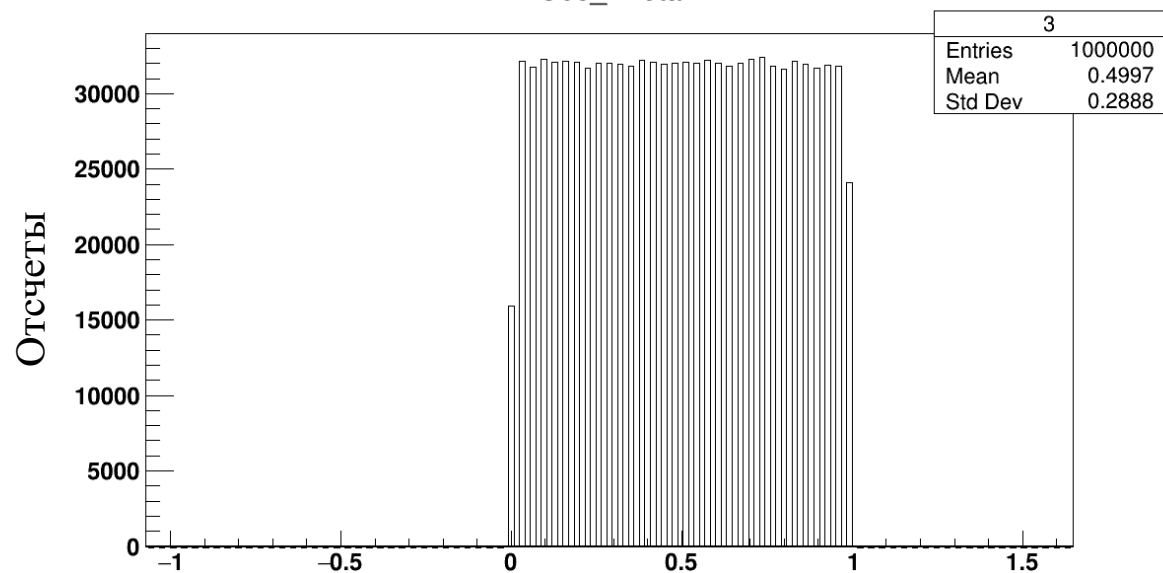
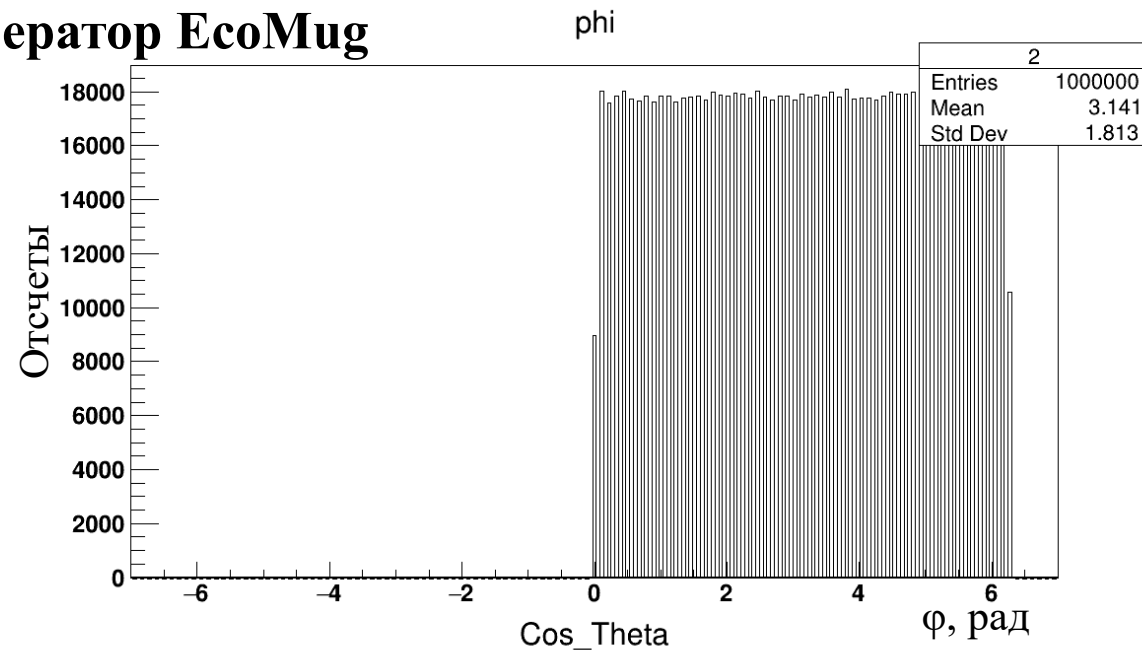


Генератор космического излучения

Старый генератор

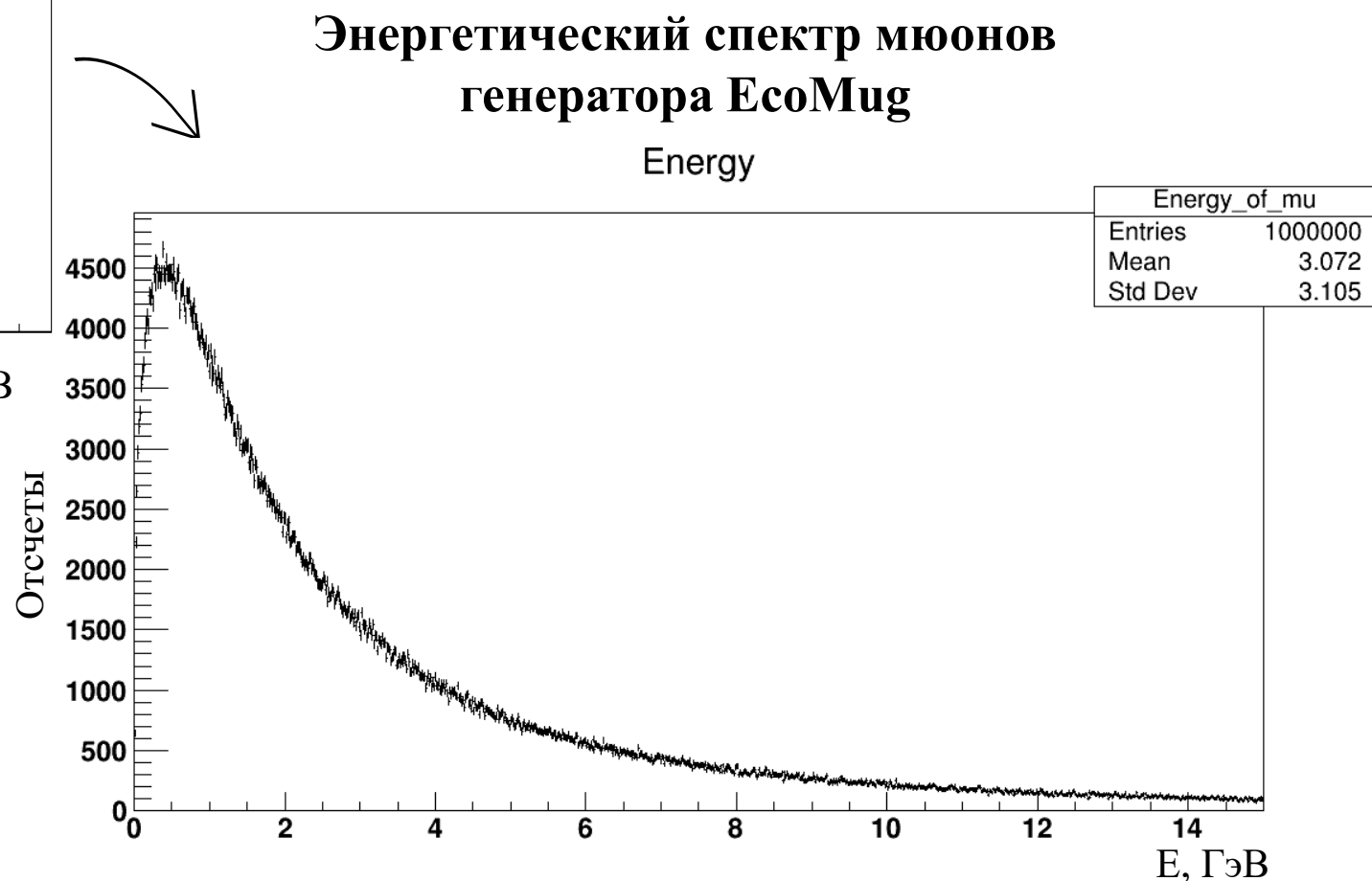
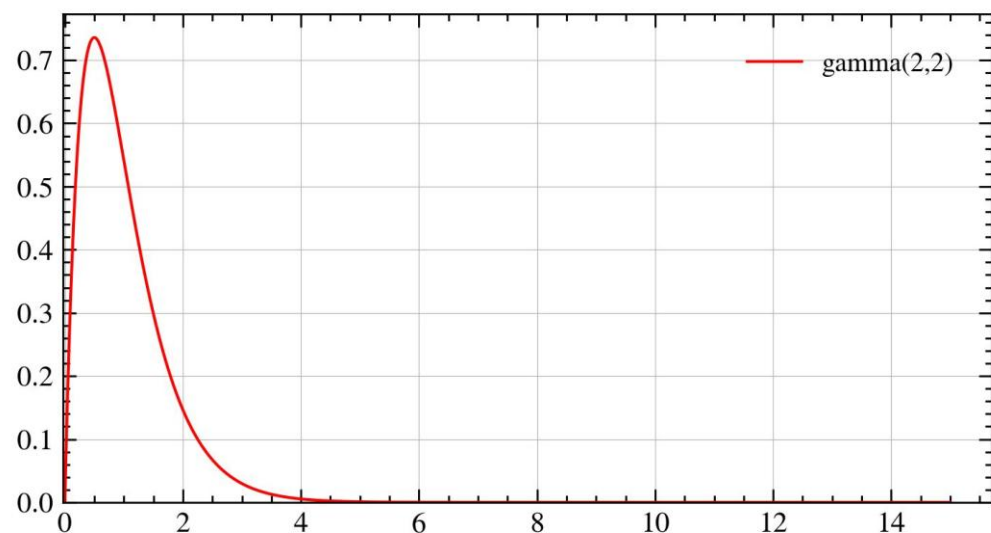
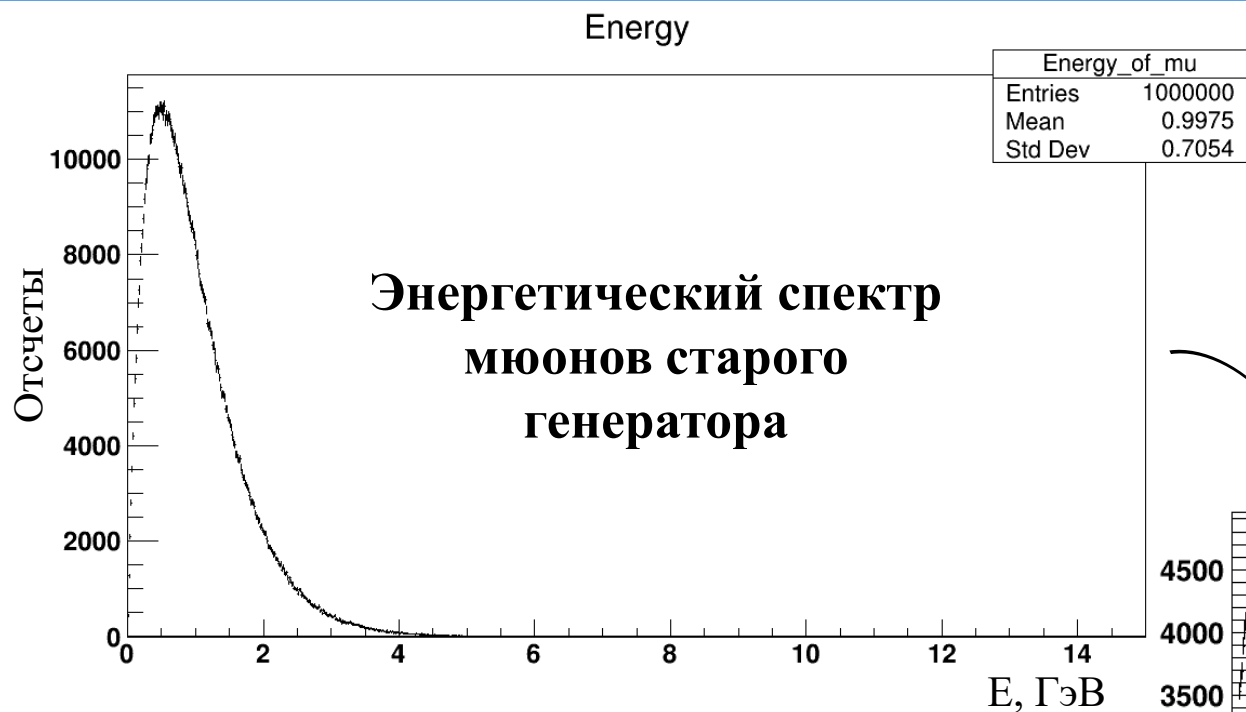


Генератор ЕсоМуг





Генератор космического излучения





Генератор космического излучения

	1 пластина	2 пластина	3 пластина	4 пластина	5 пластина
Старый генератор	391953	393231	391960	393039	251628
Генератор EcoMug	14967	14748	14812	14825	26811

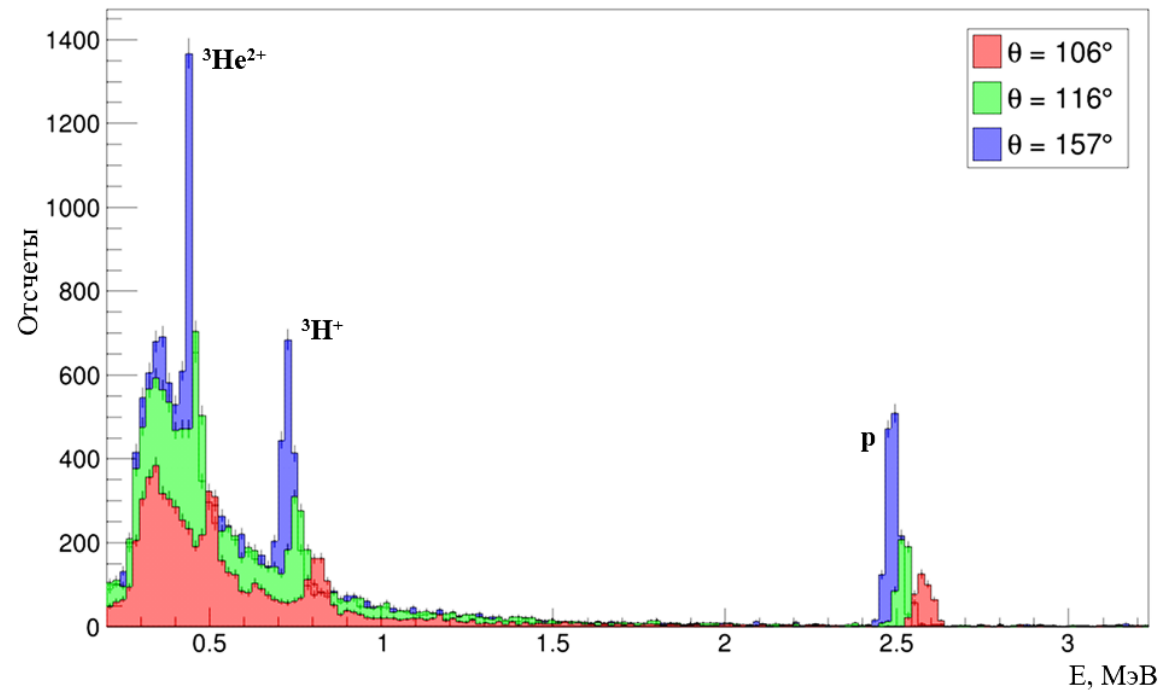
$$N_{\text{событий}} = 10^6$$

Старый генератор:

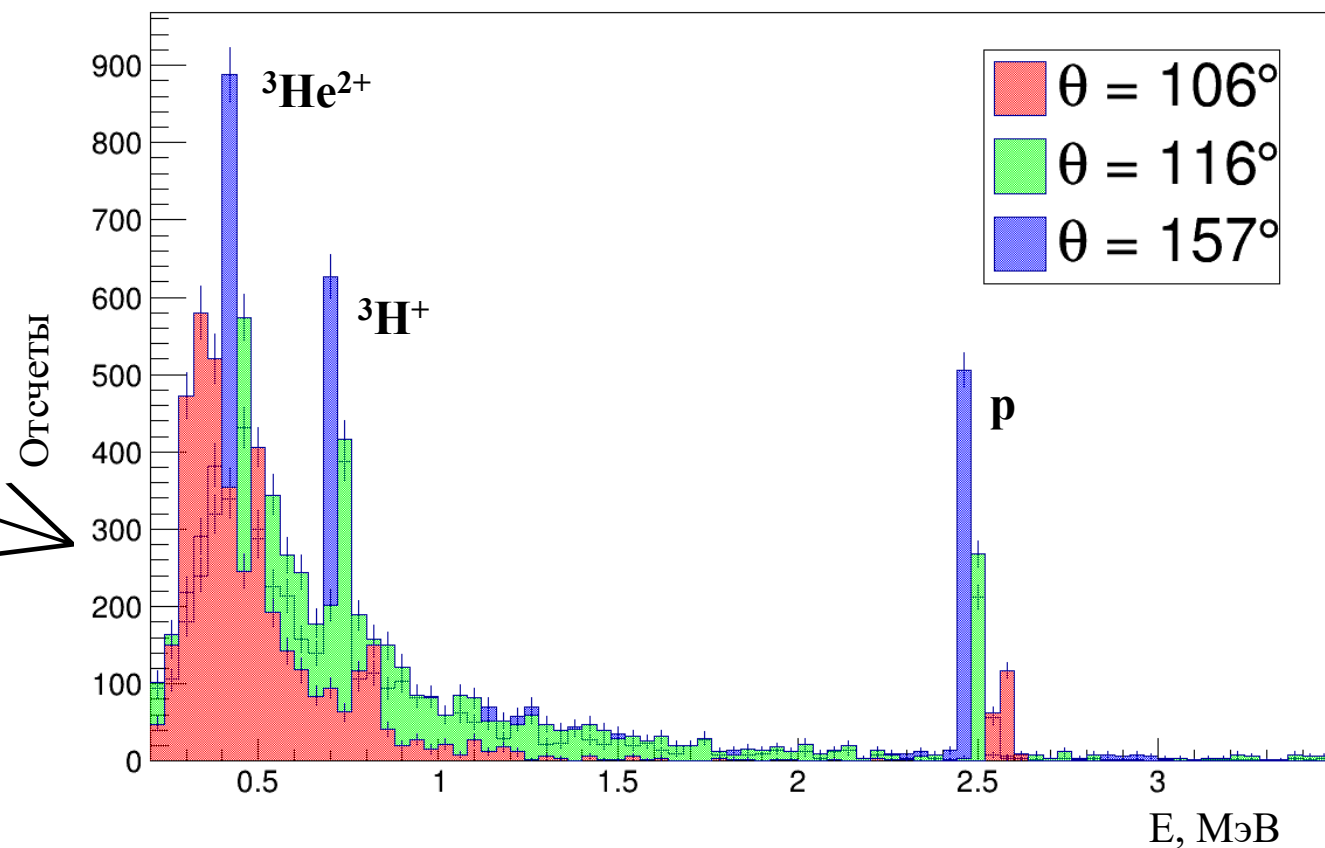
- + Больше число попаданий в детектор
- + Меньшее время набора статистики
- Неточный энергетический спектр мюонов
- Неточное пространственное распределение

Генератор EcoMug:

- + Высокая точность энергетического спектра мюонов
- + Правильное пространственное распределение
- + Рождение μ^+ и μ^-
- Больше время набора статистики
- Меньшее количество попаданий в детектор

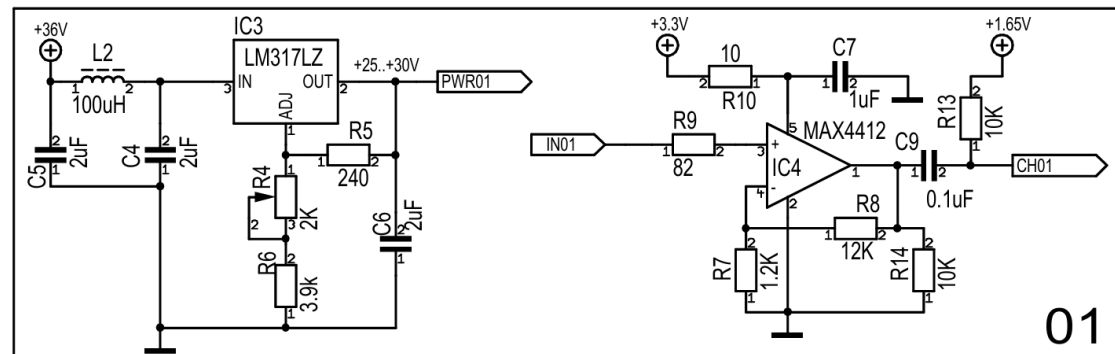


Энергетический спектр
продуктов реакции dd-синтеза,
полученный при моделировании
в GEANT 4 с использованием
генератора EcsMug



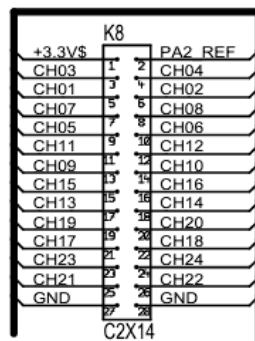
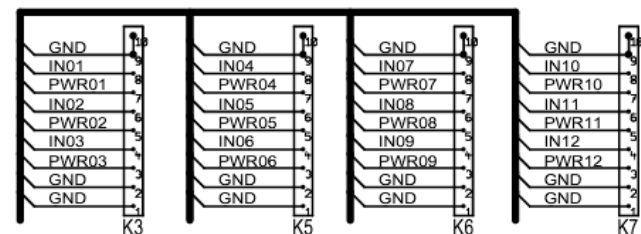
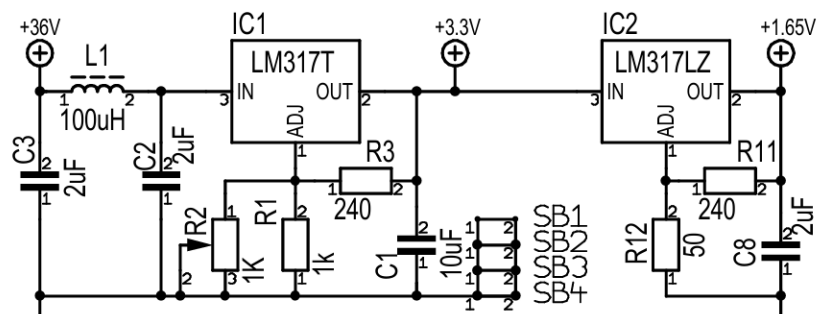


Усиление сигнала

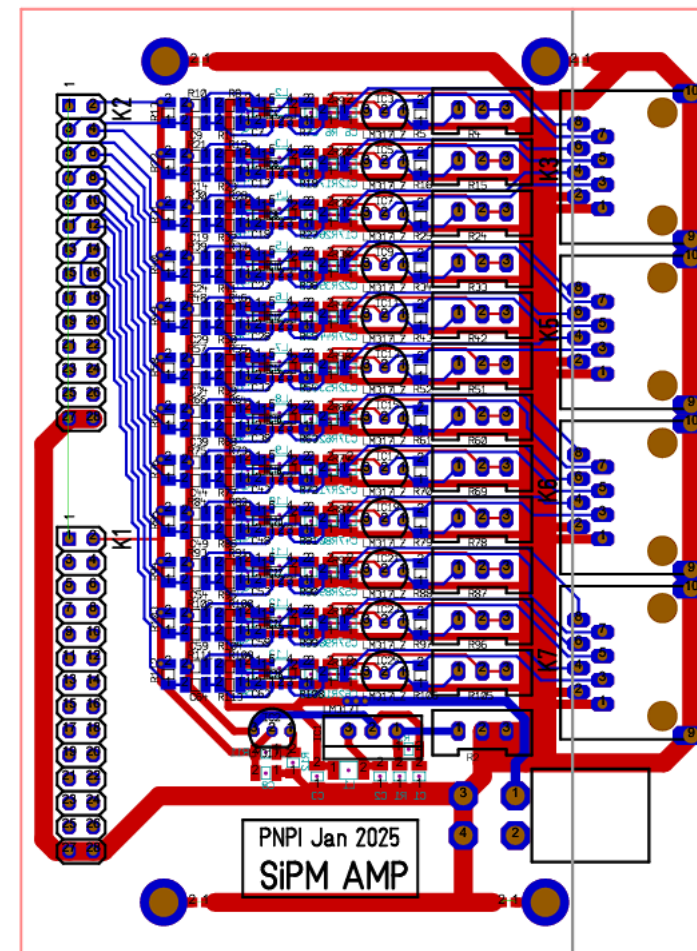


01

Питание

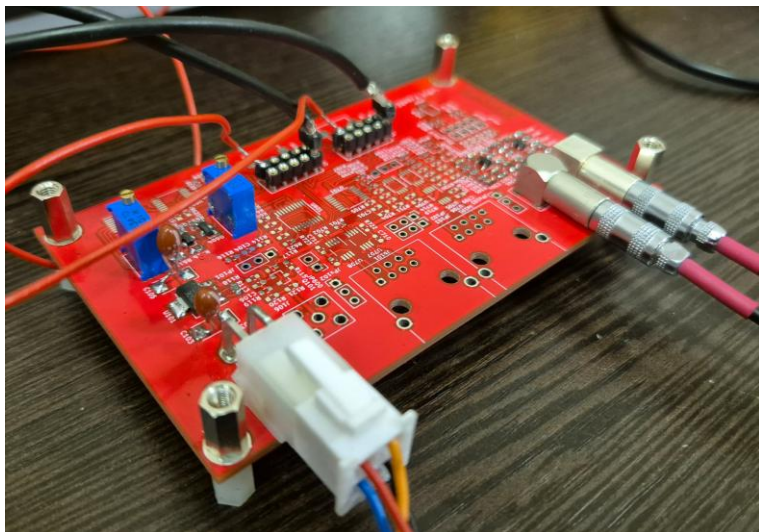


Плата

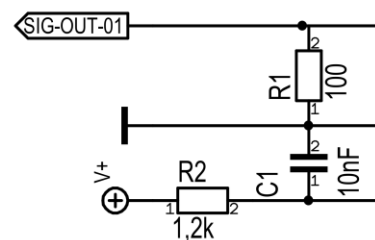




OLD

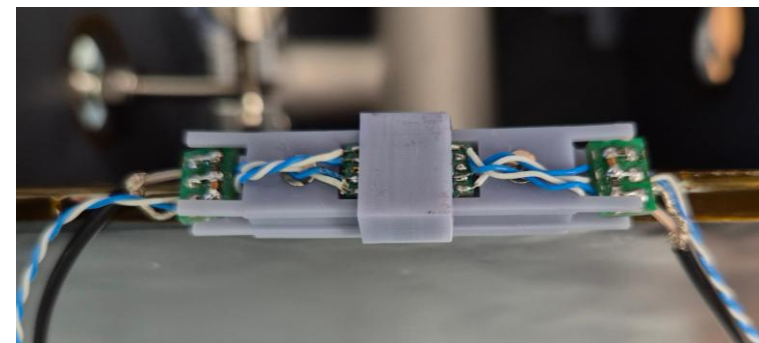
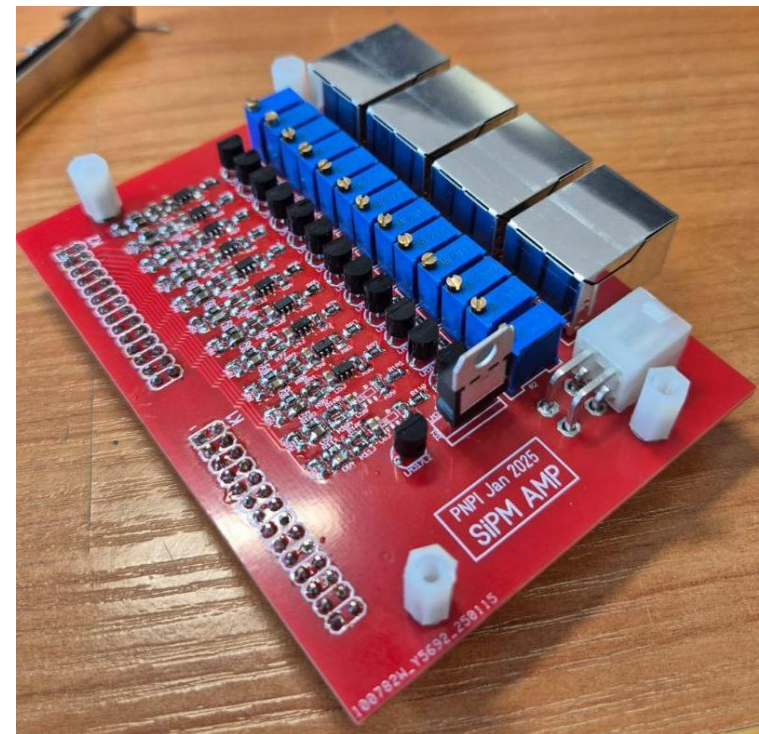


Плата питания и
усиления



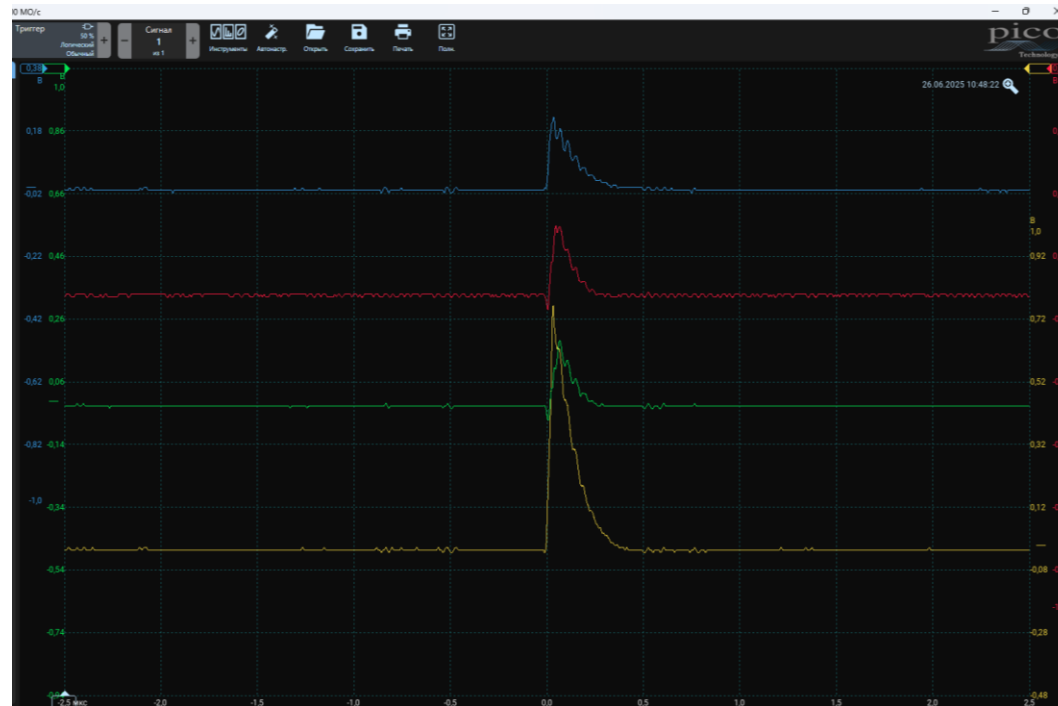
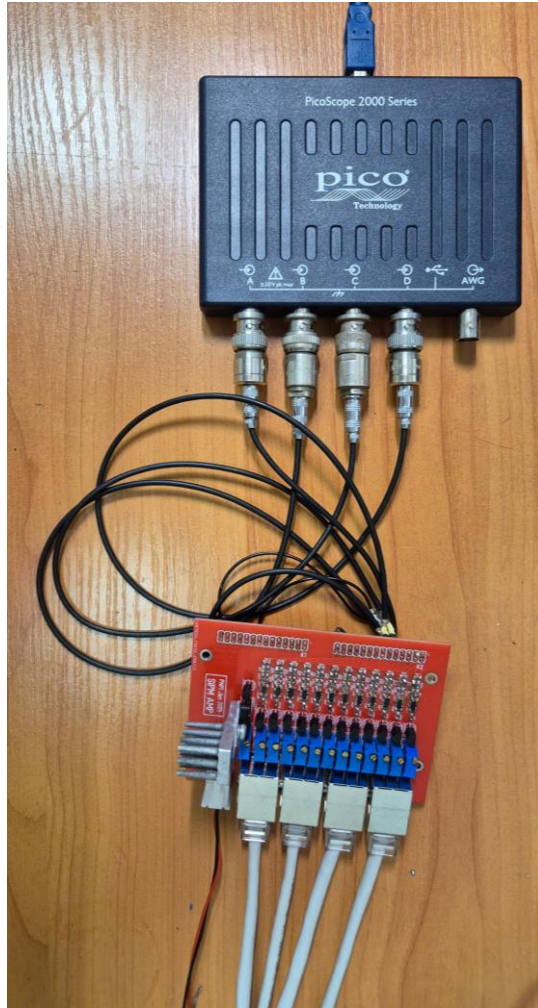
Фильтр питания и
преобразование
токового сигнала в
сигнал напряжения

NEW



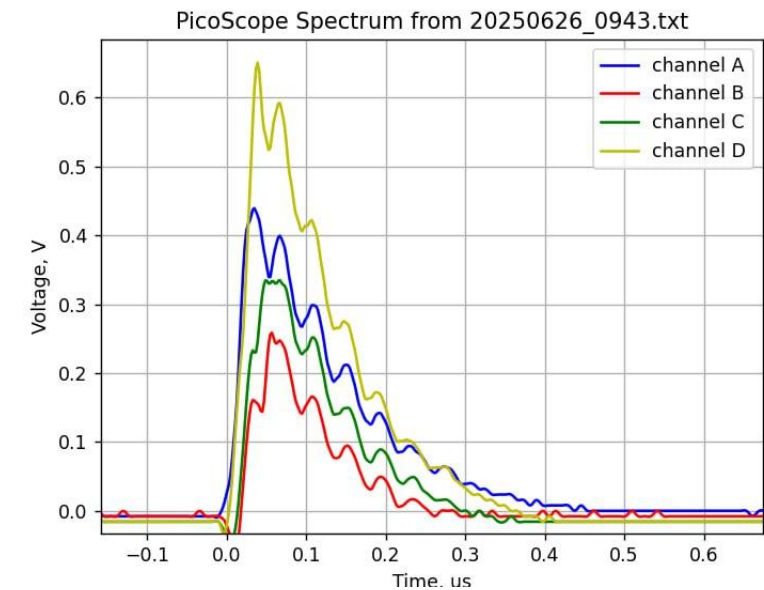
Тестирование электроники (PicoScope)

Чтение сигналов при
помощи PicoScope
2000



Сигналы
полученные с
PicoScope

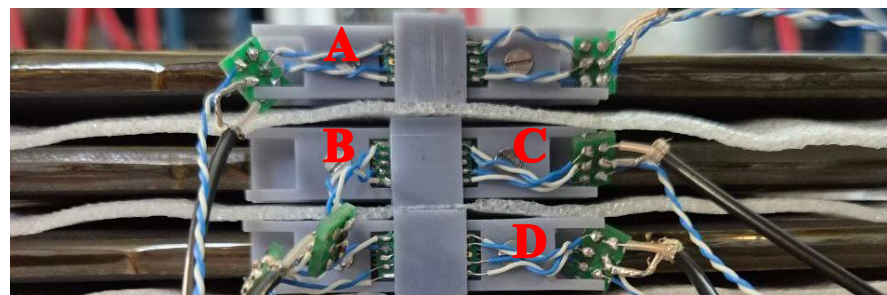
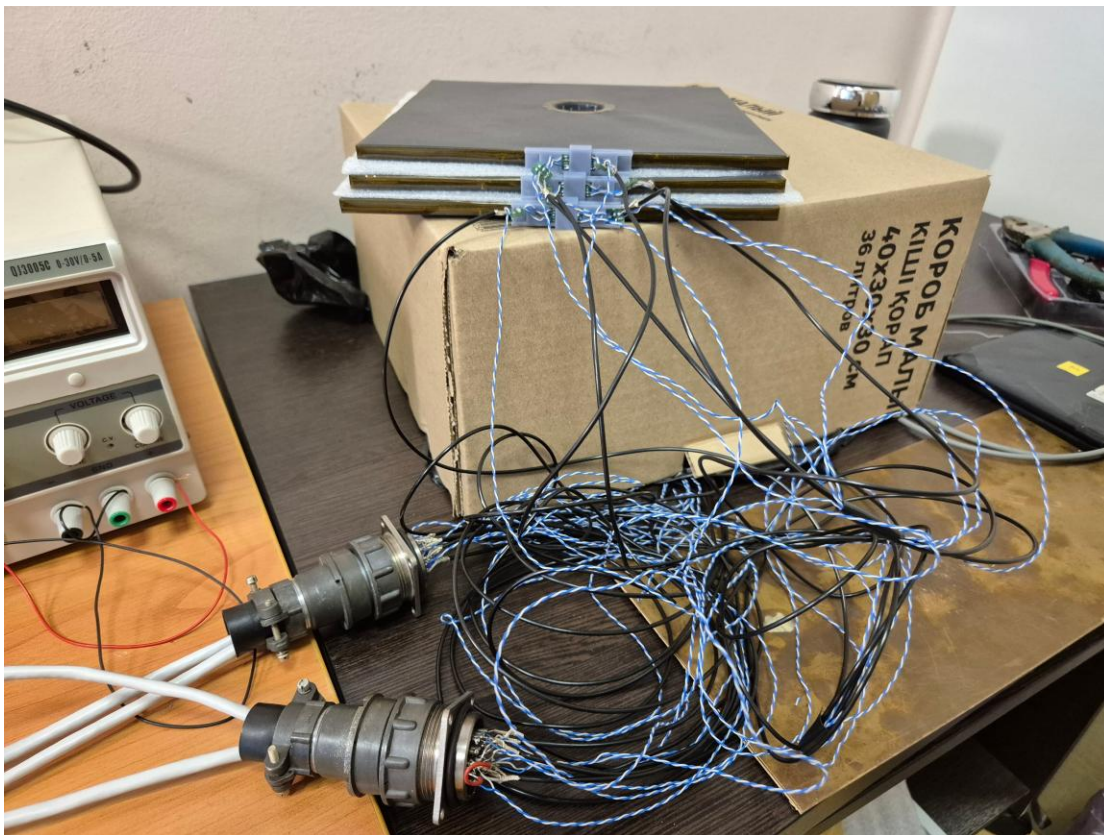
Построенные на
одном графике
сигналы с каждого
из каналов





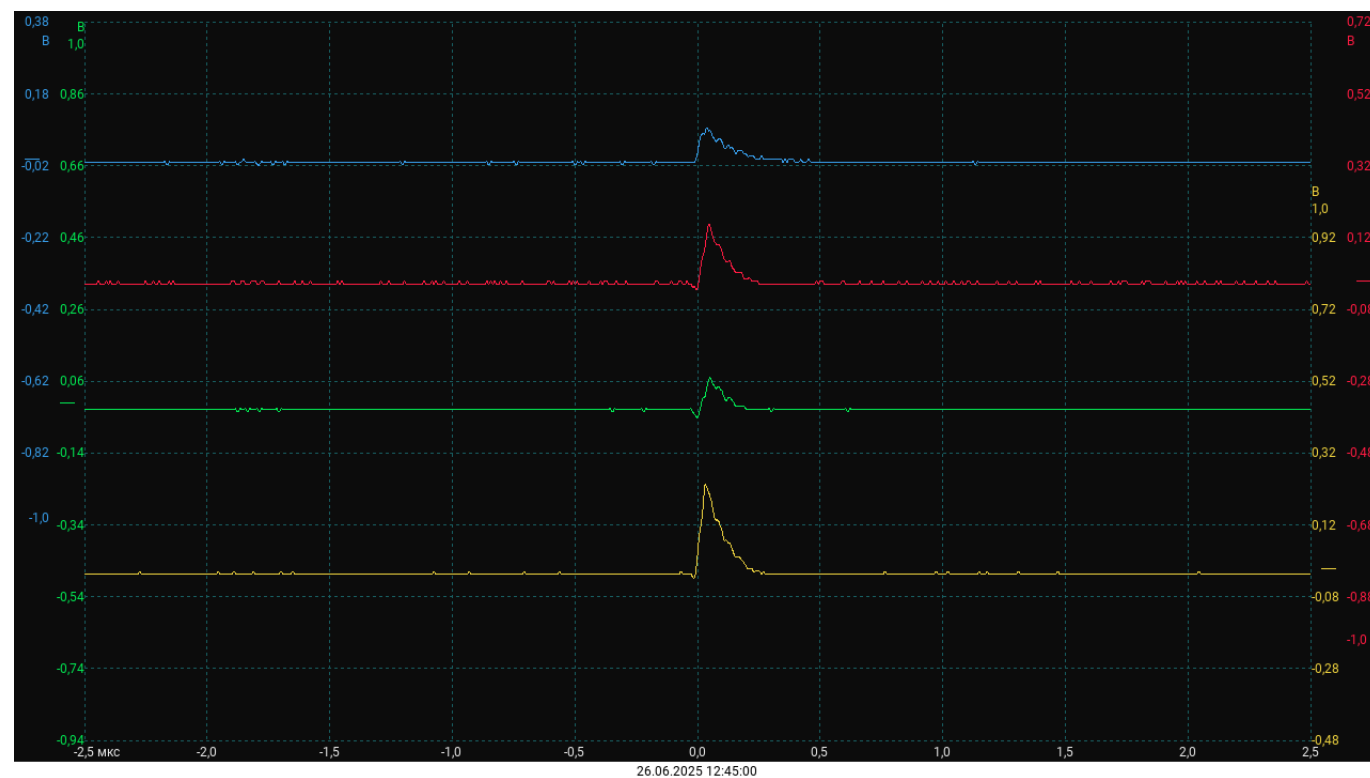
Тестирование электроники (разъемы)

Соединение коаксиальных кабелей и витой пары через вакуумные многопиновые разъемы



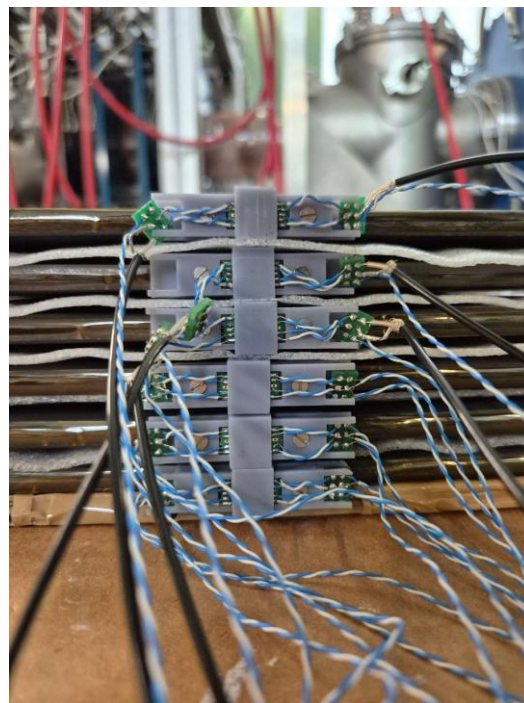
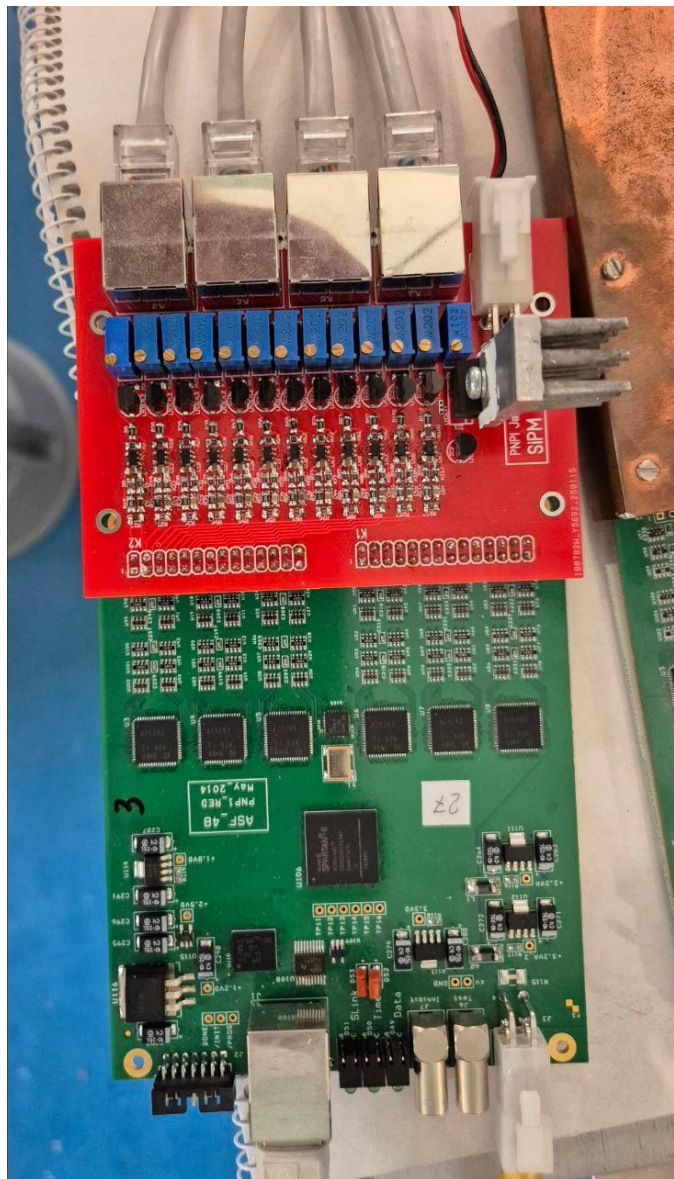
A+D = Trigger

Совпадения на PicoScope

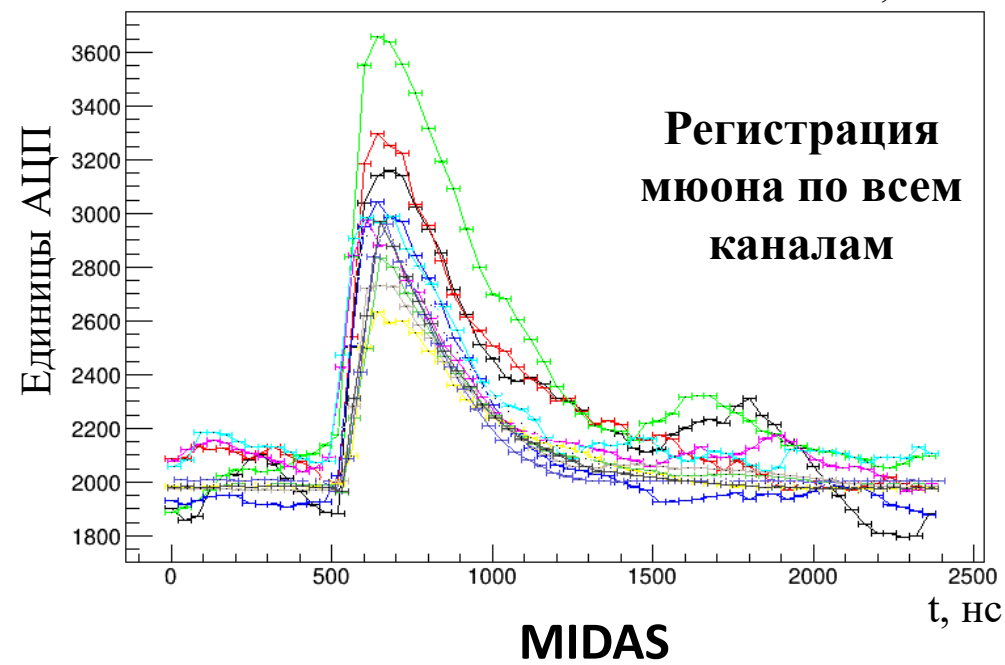
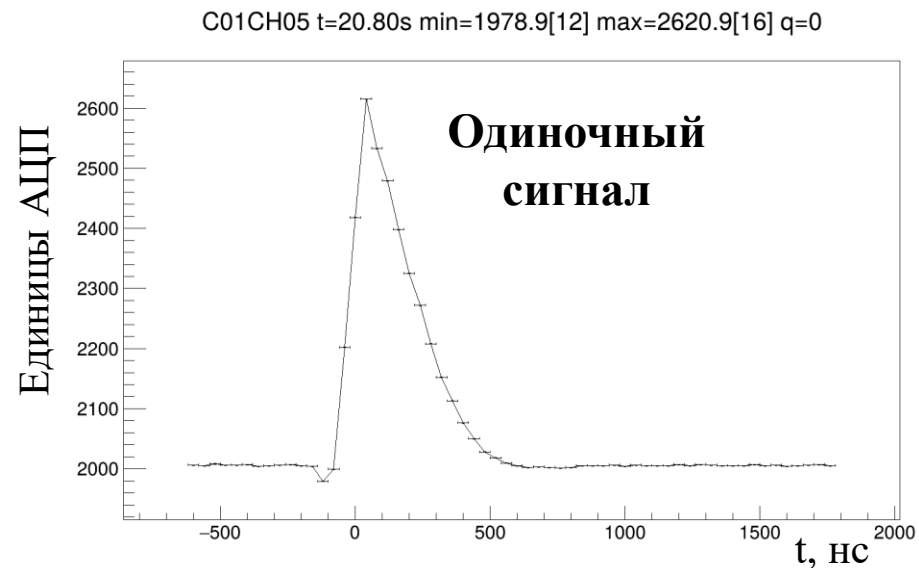




Сопряжение с ASF 48

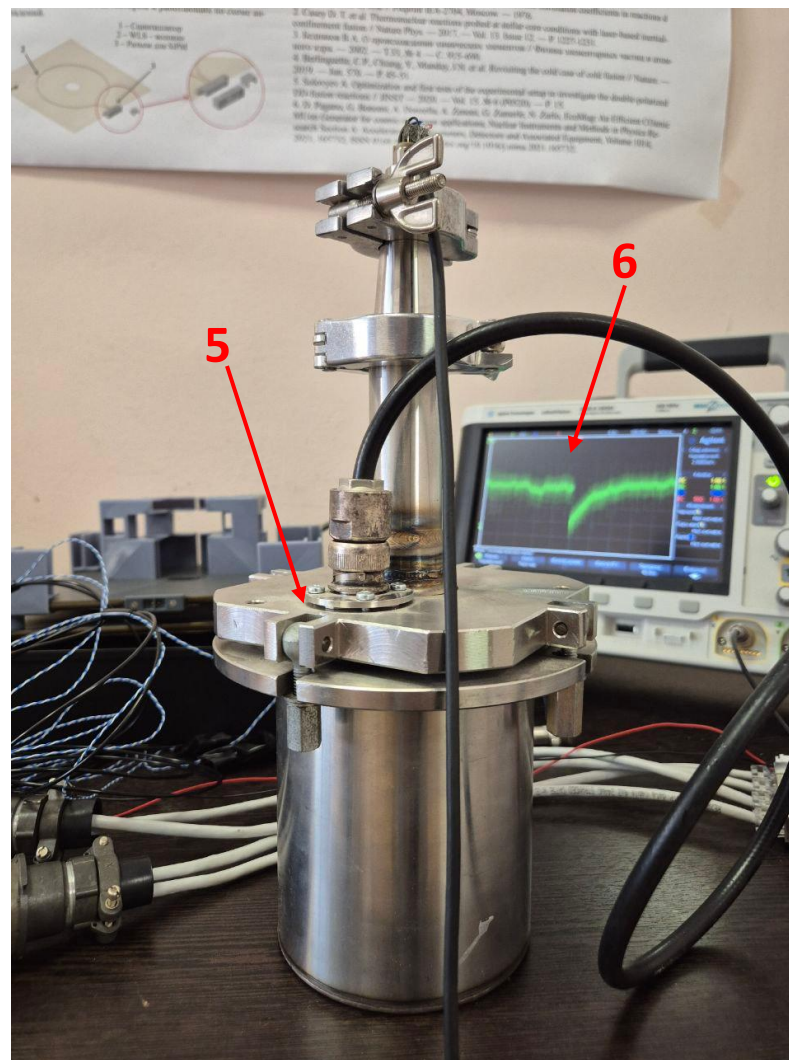
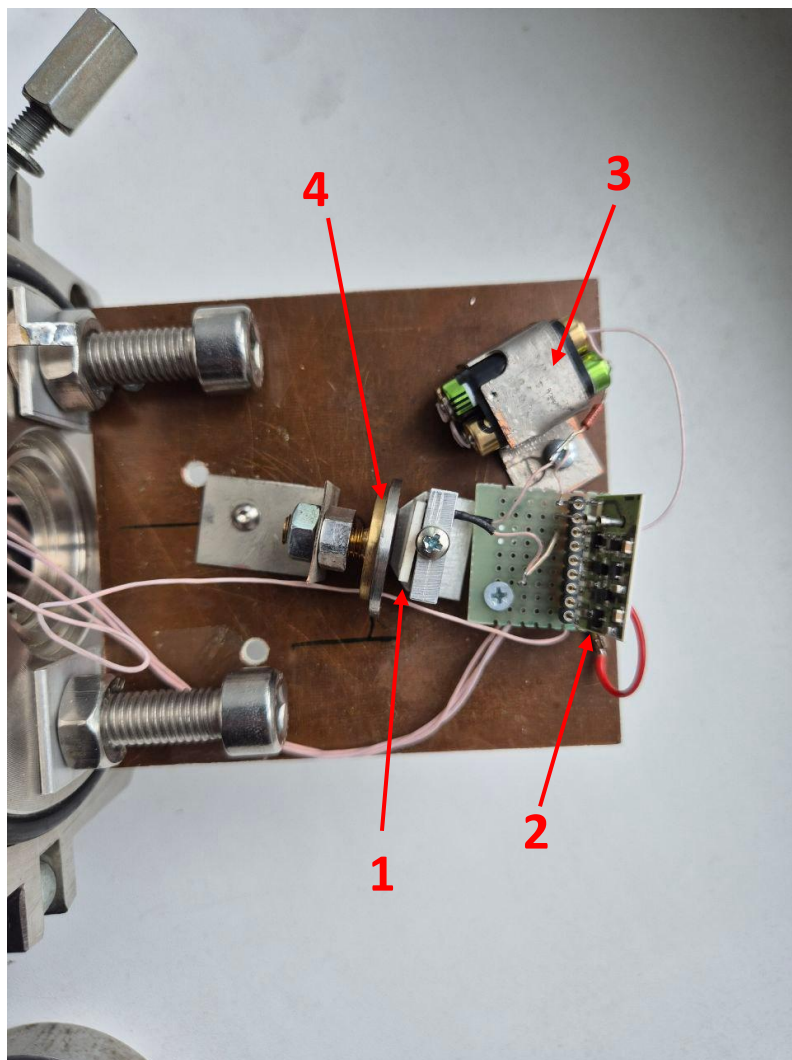


ASF 48 CROS 3





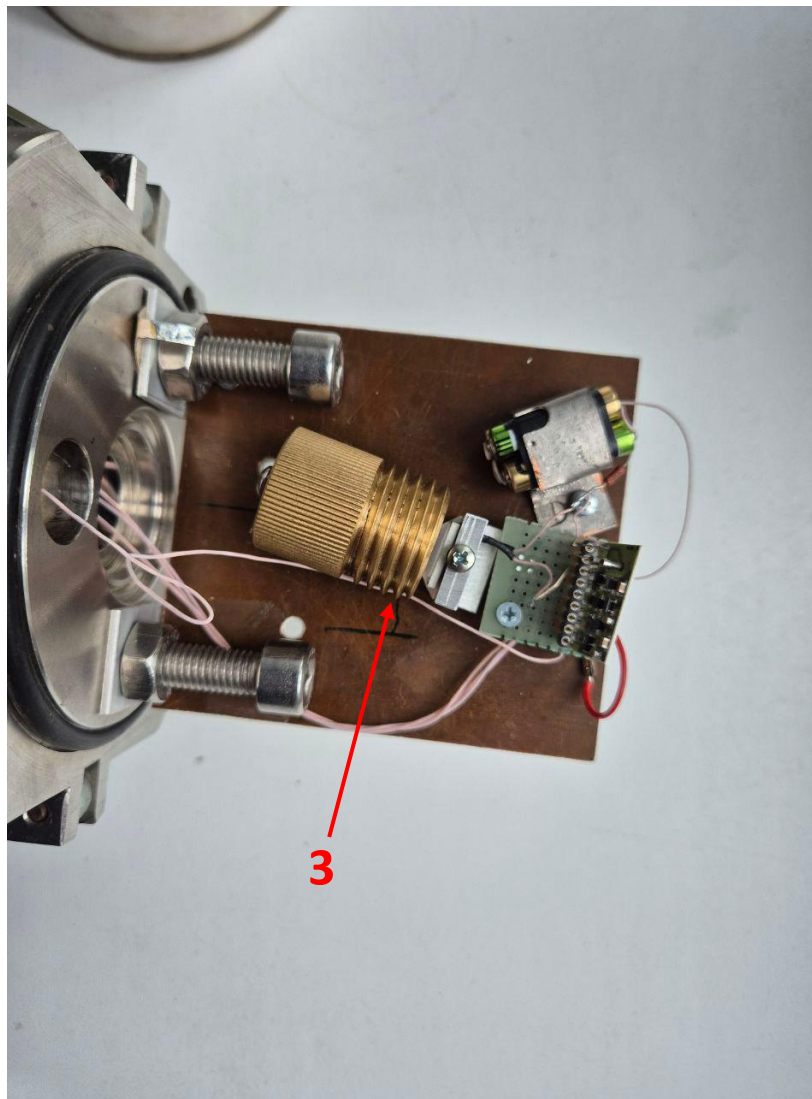
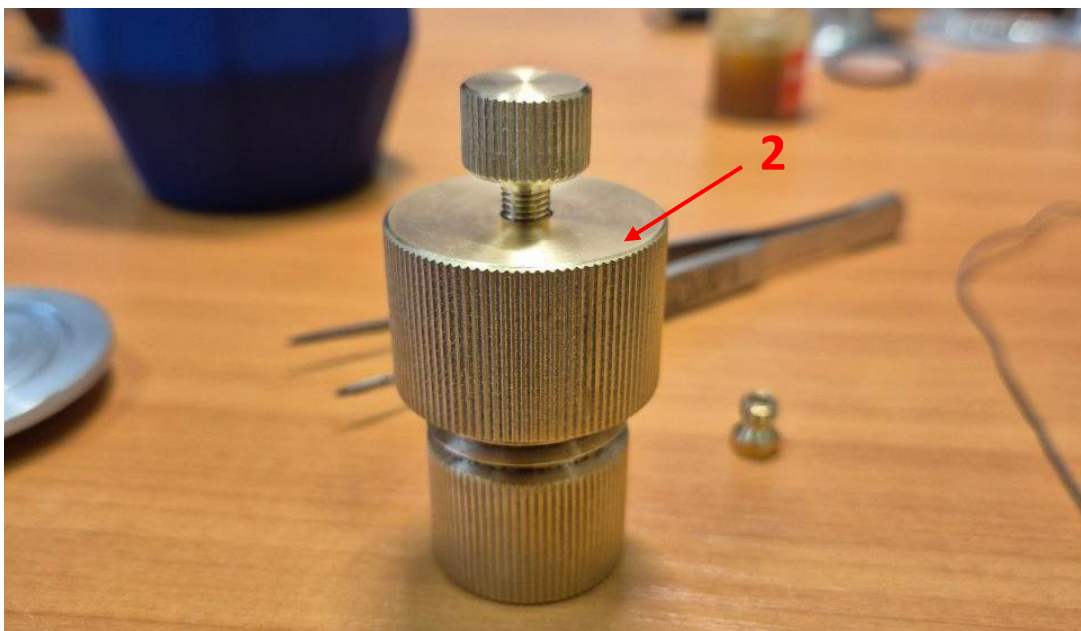
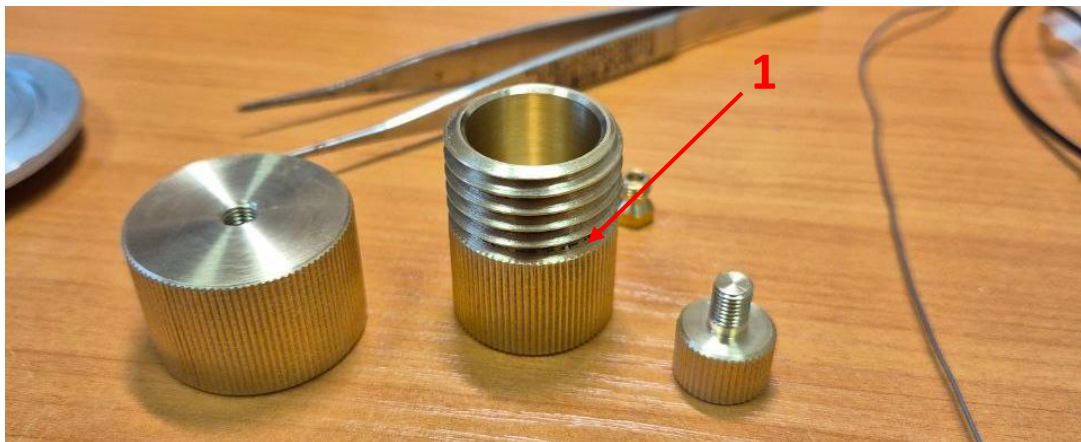
Тестирование PIN-диода (альфа-источник)



- 1 – PIN-диод
- 2 – Усилитель сигнала
- 3 – Питание PIN-диода
- 4 – Альфа-источник
- 5 – Камера со сборкой
- 6 – Сигнал от PIN-диода на осциллографе



Тестирование PIN-диода (бета-источник)



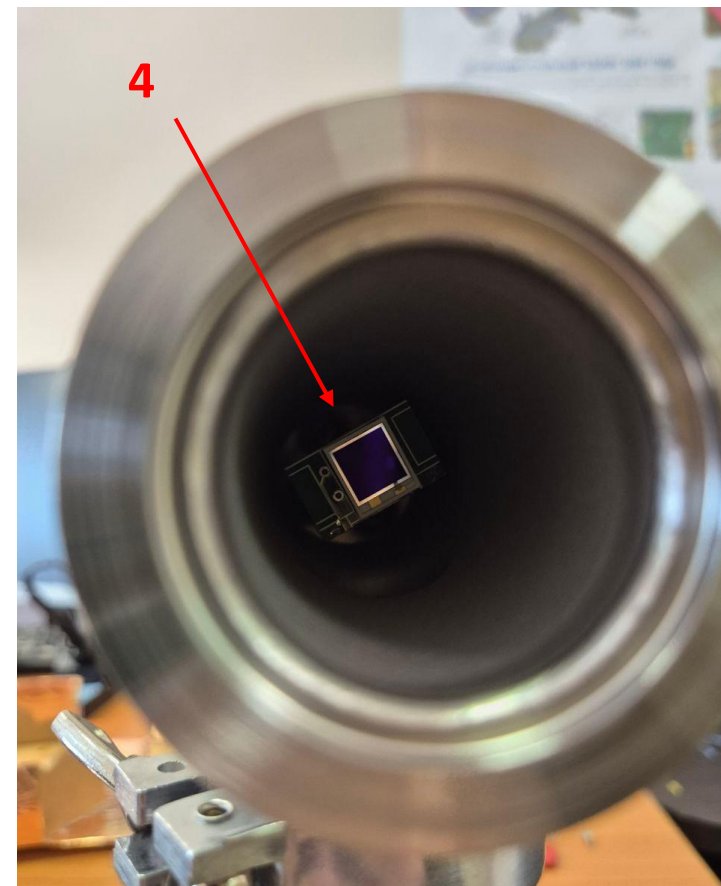
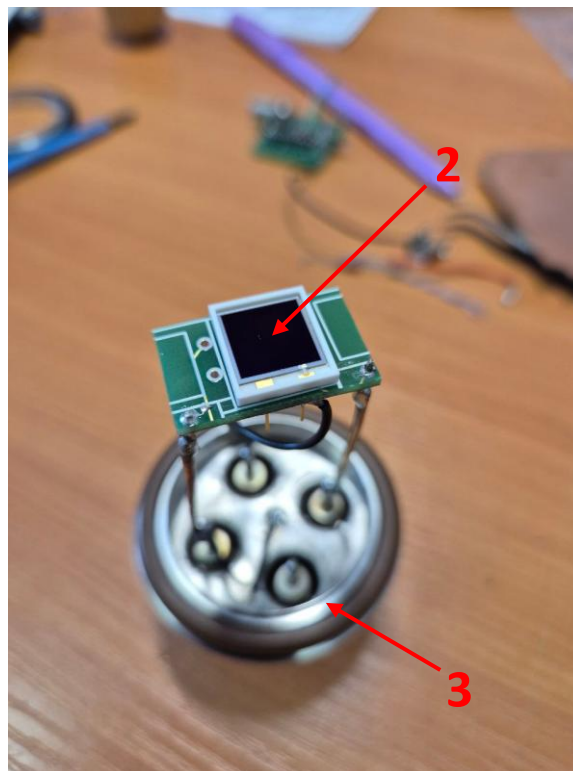
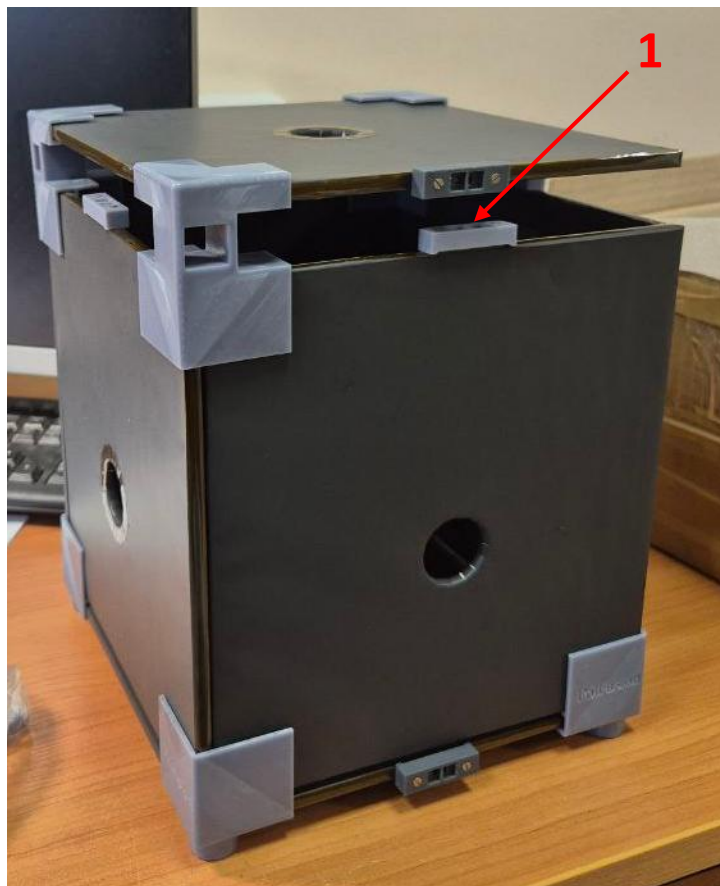
1 – Камера бета-источника

2 – Камера в сборе

**3 – Бета-источник
установленный в
сборку**



Сборка «на воздухе»

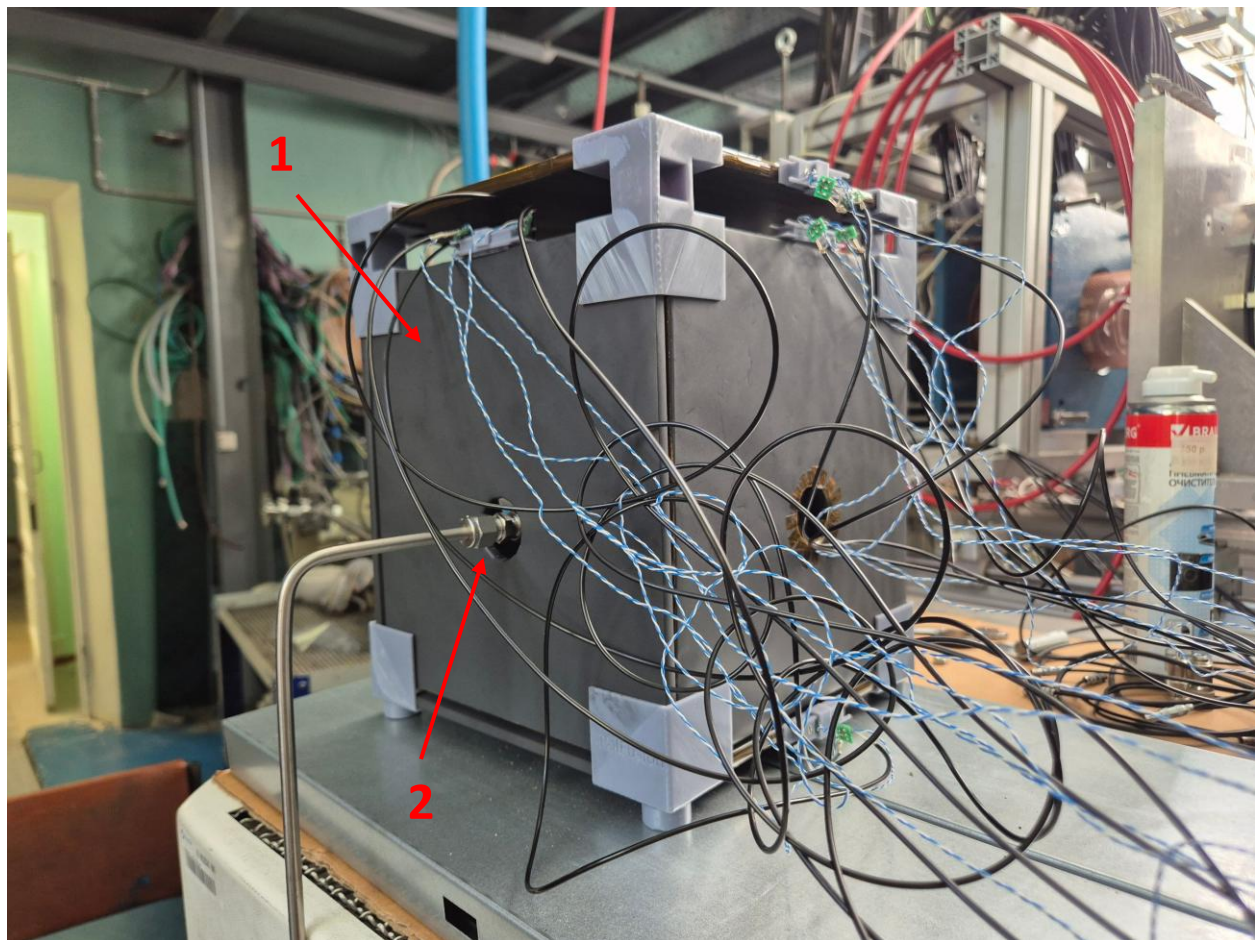


- 1 – Сборка сцинтилляционных
пластин на воздухе**
- 2 – PIN-диод установленный на
вакуумном разъеме**
- 3 – Вакуумный разъем**
- 4 – PIN-диод в вакуумной камере**

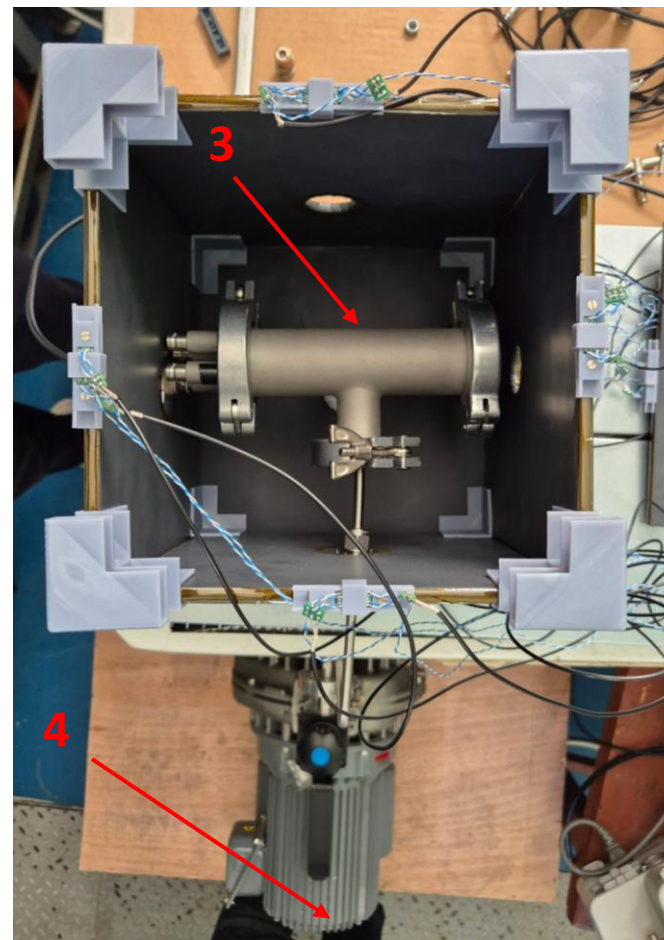
Рождественский А. Ю.



Сборка «на воздухе»



**Сборка сцинтилляционных
пластин «на воздухе» (вид сбоку)**

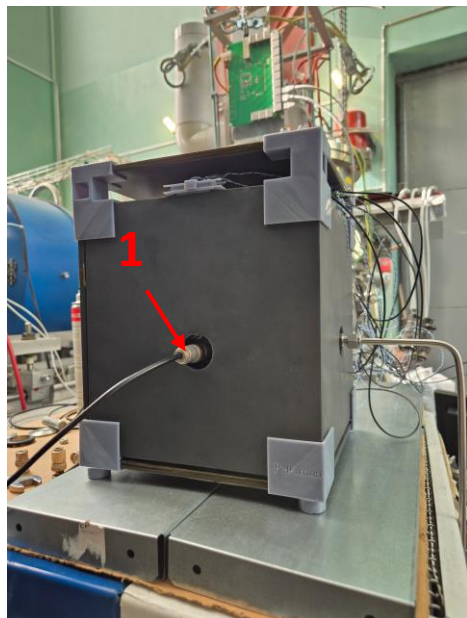


**Сборка сцинтилляционных
пластин «на воздухе» (вид сверху)**

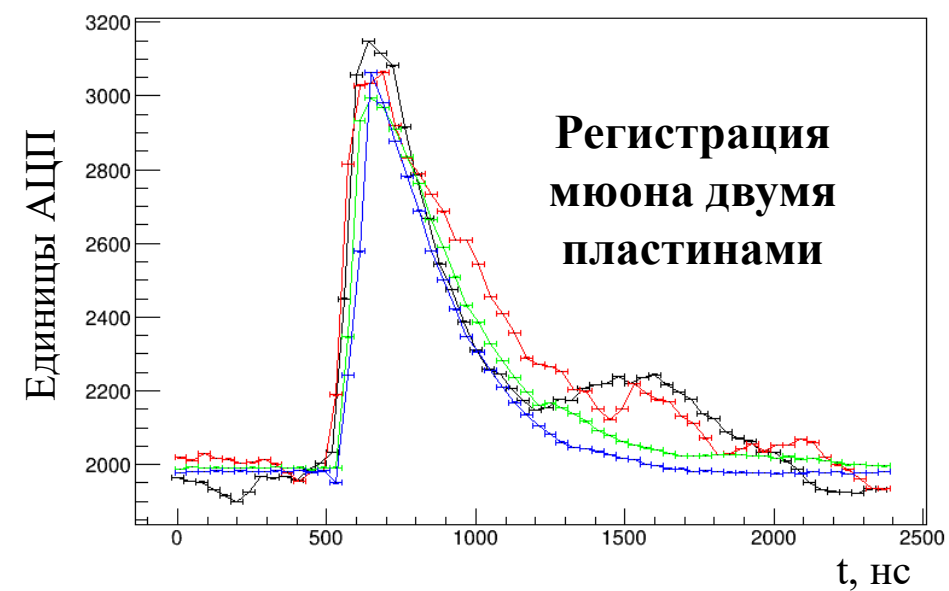
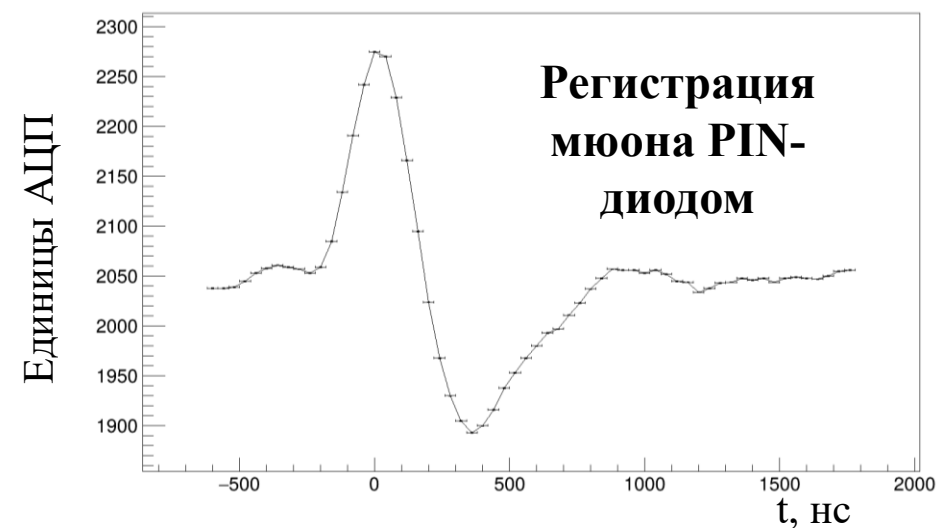
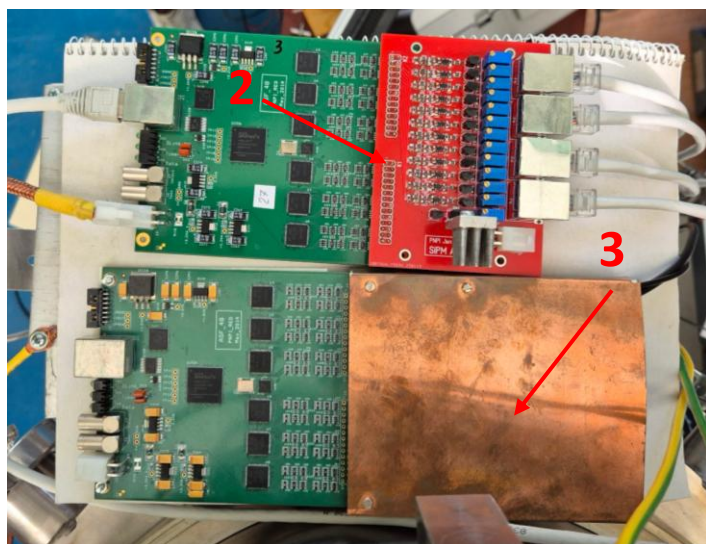
- 1 – Сцинтилляционные
пластины**
- 2 – Трубка откачки
вакуумной камеры**
- 3 – Вакуумная камера с
бета источником и PIN-
диодом**
- 4 – Спиральный
вакуумный насос**



Сборка «на воздухе»



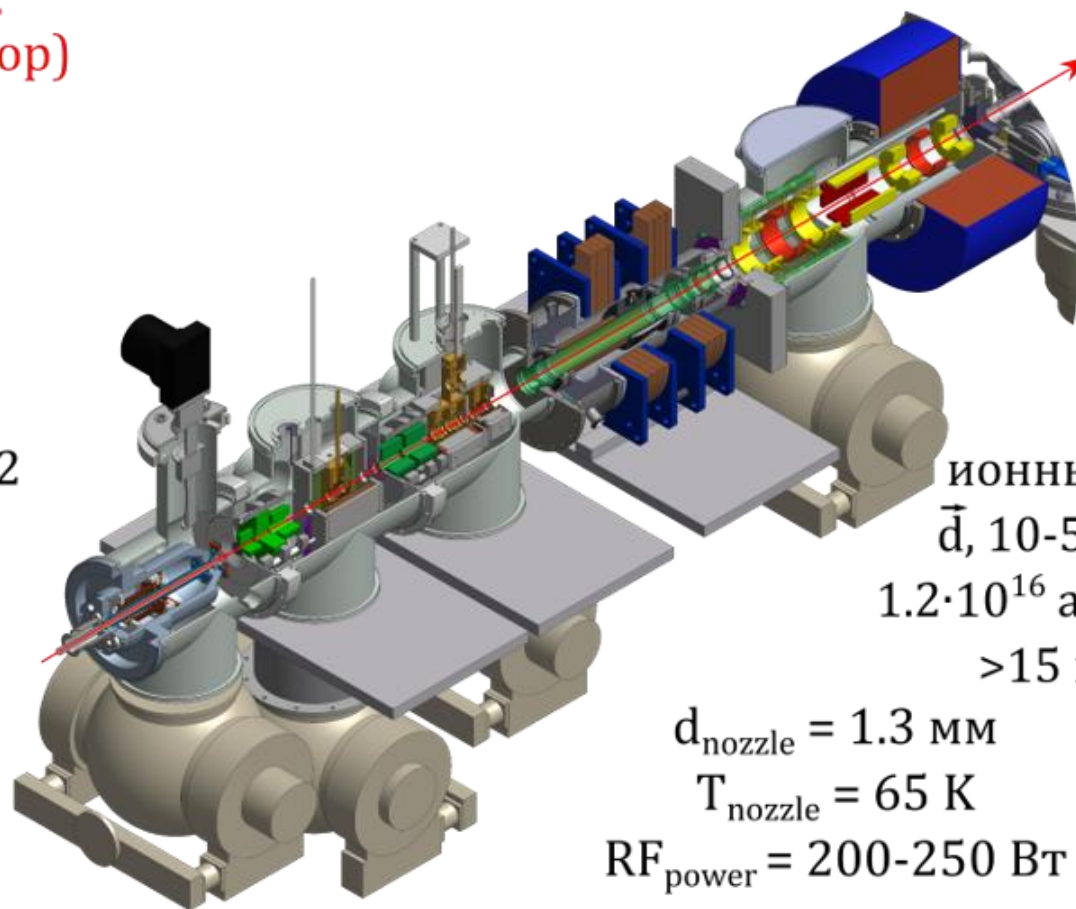
- 1 – Считывание сигналов с PIN-диода
- 2 – Плата усиления сигнала и питания SiPM
- 3 – Плата усиления сигнала PIN-диода



P_z (вектор) P_{zz} (тензор)

$\pm 2/3$	0
0	+1
0	-2
-1/3	± 1
+1/3	± 1
$\pm 1/3$	-1/2

0.5 м



ионный пучок
 $\bar{d}$, 10-50 кэВ
 $1.2 \cdot 10^{16}$ атомов/с
 > 15 мкА

$d_{\text{nozzle}} = 1.3$ мм
 $T_{\text{nozzle}} = 65$ К
 $RF_{\text{power}} = 200-250$ Вт

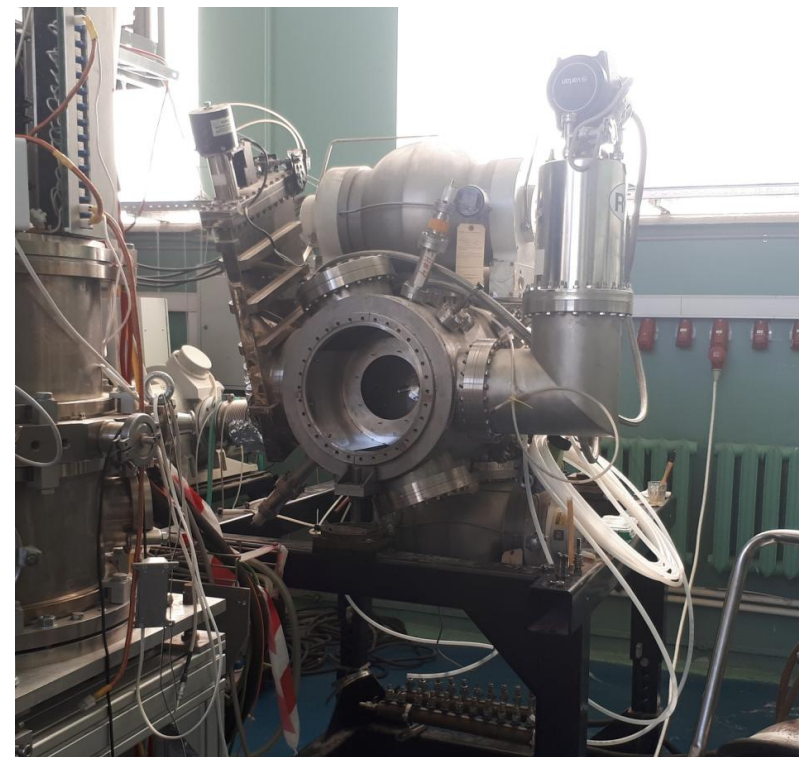
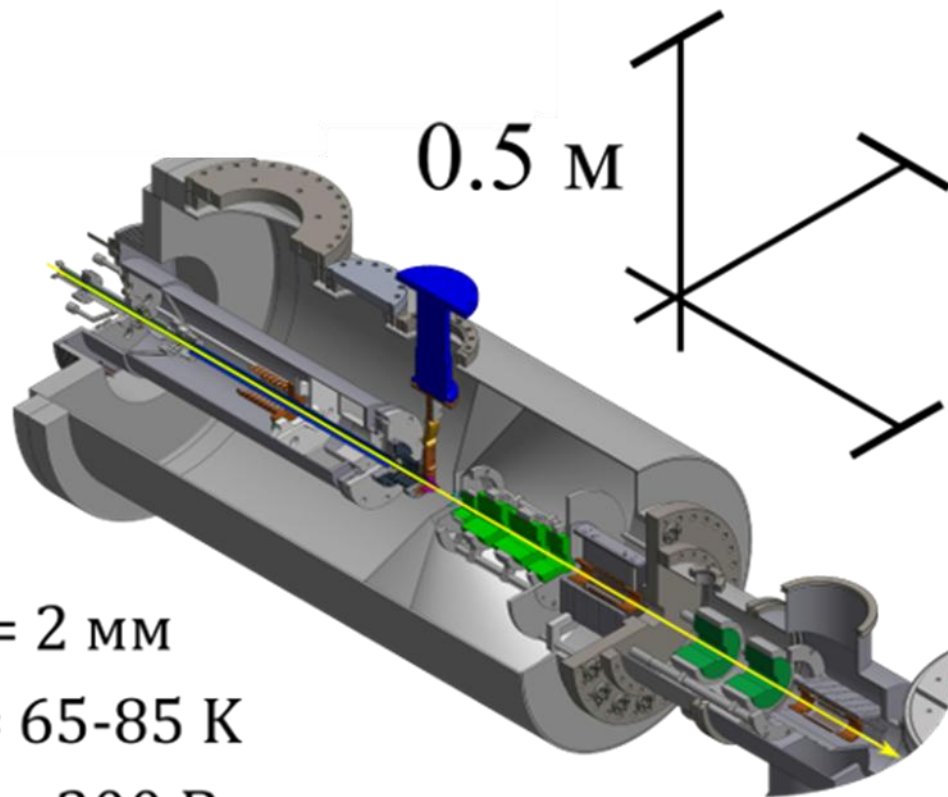
Поляризатор:

Sextupoles + WFT + Sextupoles + WFT + SFT1 (460 MHz) + SFT2 (350 MHz)



p_z (вектор) p_{zz} (тензор)

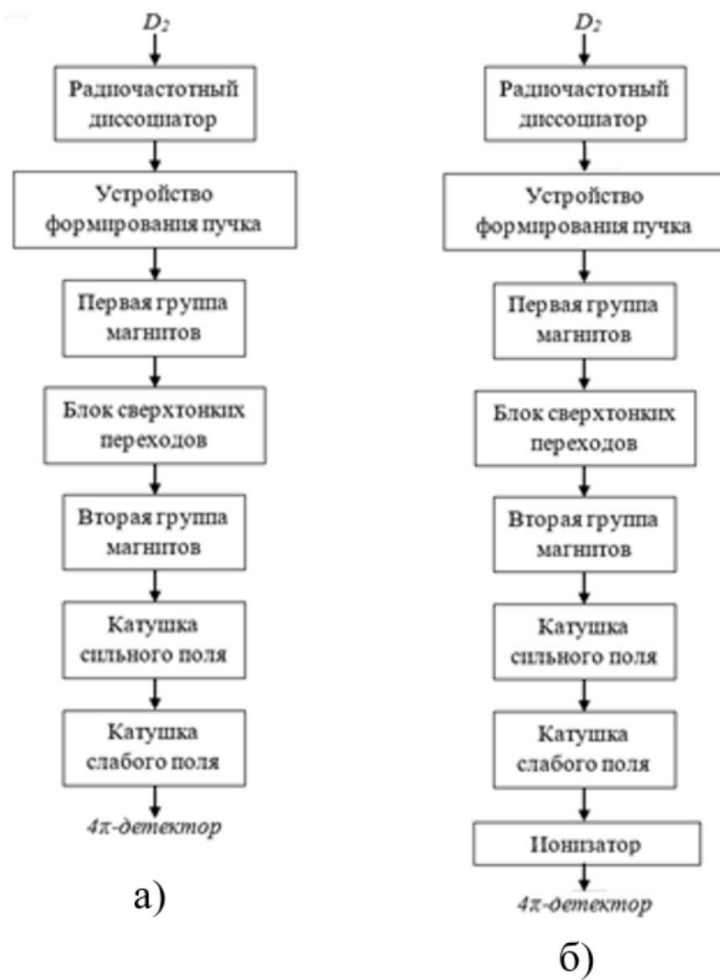
-2/3	0
0	+1
-1/3	+1
-1	+1
$\pm 1/2$	-1/2

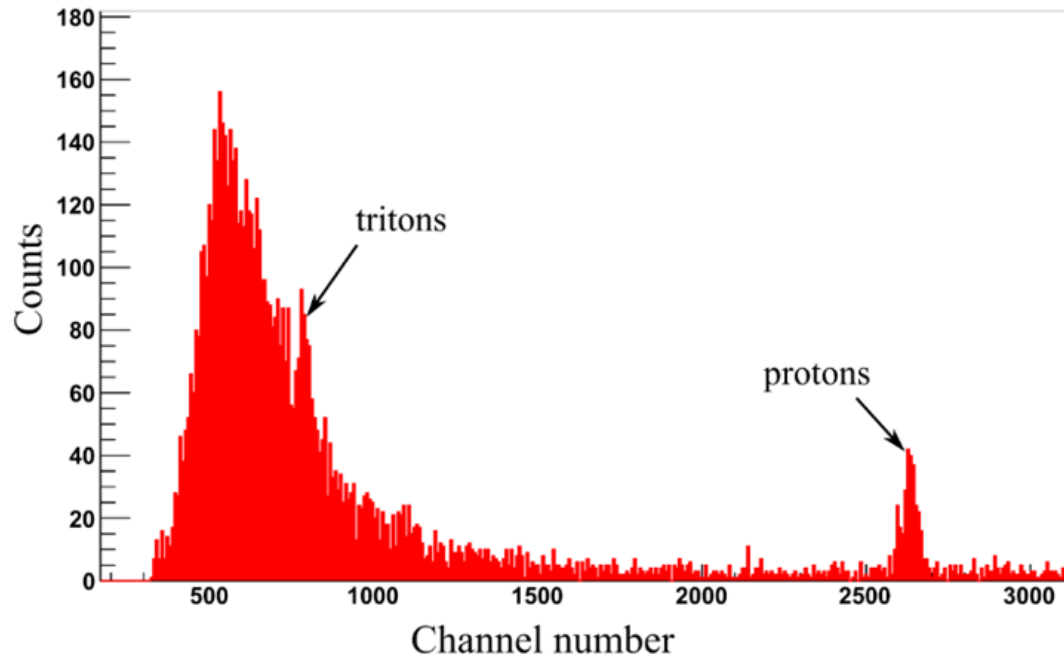


атомный пучок $d_{\text{nozzle}} = 2 \text{ мм}$
 $\vec{D}$, 0.01 эВ $T_{\text{nozzle}} = 65\text{-}85 \text{ K}$
 $4 \cdot 10^{16}$ атомов/с $\text{RF}_{\text{power}} = 300 \text{ Вт}$

Поляризатор:

Sextupoles + MFT + Sextupoles + MFT





Амплитудный спектр регистрации
продуктов синтеза неполяризованного
дейтерия с энергией 10 кэВ в тестовом
сеансе 2019 года

При энергии ионного пучка равной
10 кэВ и током 10 мкА, где в
качестве мишени использовалась
паровая мишень на основе тяжелой
воды (D_2O) с целью имитации
источника поляризованного
атомарного пучка. Были
использованы 22
полупроводниковых детектора на
передней, нижней и верхней
плоскостях центрального 4π -
детектора. Длительность сеанса
составляла порядка 200 часов.



$$\begin{aligned}
 \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \{ & 1 + \frac{3}{2} [A_y^{(b)}(\Theta)p_y + A_y^{(t)}q_y] + \frac{1}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] \\
 & + \frac{1}{6} [A_{xx-yy}^{(b)}(\Theta)p_{xx-yy} + A_{xx-yy}^{(t)}(\Theta)q_{xx-yy}] \\
 & + \frac{2}{3} [A_{xz}^{(b)}(\Theta)p_{xz} + A_{xz}^{(t)}(\Theta)q_{xz}] \\
 & + \frac{9}{4} [C_{y,y}(\Theta)p_yq_y + C_{x,x}(\Theta)p_xq_x + C_{x,z}(\Theta)p_xq_z \\
 & + C_{z,x}(\Theta)p_zq_x + C_{z,z}(\Theta)p_zq_z] \\
 & + \frac{3}{4} [C_{y,zz}(\Theta)p_yq_{zz} + C_{zz,y}(\Theta)p_{zz}q_y] \\
 & + C_{y,xz}(\Theta)p_yq_{xz} + C_{xz,y}(\Theta)p_{xz}q_y + C_{x,yz}(\Theta)p_xq_{yz} \\
 & + C_{yz,x}(\Theta)p_{yz}q_x + C_{z,yz}(\Theta)p_zq_{yz} + C_{yz,z}(\Theta)p_{yz}q_z \\
 & + \frac{1}{4} [C_{y,xx-yy}(\Theta)p_yq_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\Theta)p_{xx-yy}q_y \\
 & + C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz}] \\
 & + \frac{1}{3} [C_{zz,xz}(\Theta)p_{zz}q_{xz} + C_{xz,zz}(\Theta)p_{xz}q_{zz}] \\
 & + \frac{1}{12} [C_{zz,xx-yy}(\Theta)p_{zz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{zz}] \\
 & + \frac{4}{9} [C_{xz,xz}(\Theta)p_{xz}q_{xz} + C_{yz,yz}(\Theta)p_{yz}q_{yz}] \\
 & + \frac{8}{9} [C_{xy,yz}(\Theta)p_{xy}q_{yz} + C_{yz,xy}(\Theta)p_{yz}q_{xy}] \\
 & + \frac{16}{9} C_{xy,xy}(\Theta)p_{xy}q_{xy} \\
 & + \frac{1}{9} [C_{xz,xx-yy}(\Theta)p_{xz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xz}] \\
 & + \frac{1}{36} C_{xx-yy,xx-yy}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy} \\
 & + \frac{1}{2} [C_{x,xy}(\Theta)p_xq_{xy} + C_{xy,x}(\Theta)p_{xy}q_x + C_{z,xy}(\Theta)p_zq_{xy} \\
 & + C_{xy,z}(\Theta)p_{xy}q_z] \}
 \end{aligned}$$

Спины обоих дейтронов совпадают:
Только $p_z(q_z)$ и $p_{zz}(q_{zz}) \neq 0$

$$\begin{aligned}
 \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \{ & 1 + \frac{3}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] \\
 & + \frac{9}{4} C_{z,z}(\Theta)p_zq_z + \frac{1}{4} C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz} \}
 \end{aligned}$$

В случае поляризованного пучка ($p_{i,j} \neq 0$, $q_{i,j} = 0$):

$$\begin{aligned}
 \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \cdot \{ & 1 + 3/2 A_y(\Theta) p_y + 1/2 A_{xz}(\Theta) p_{xz} \\
 & + 1/6 A_{xx-yy}(\Theta) p_{xx-yy} \\
 & + 2/3 A_{zz}(\Theta) p_{zz} \}
 \end{aligned}$$