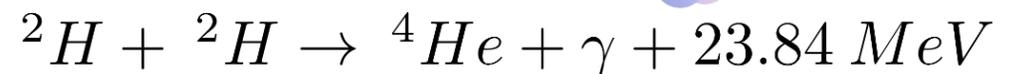
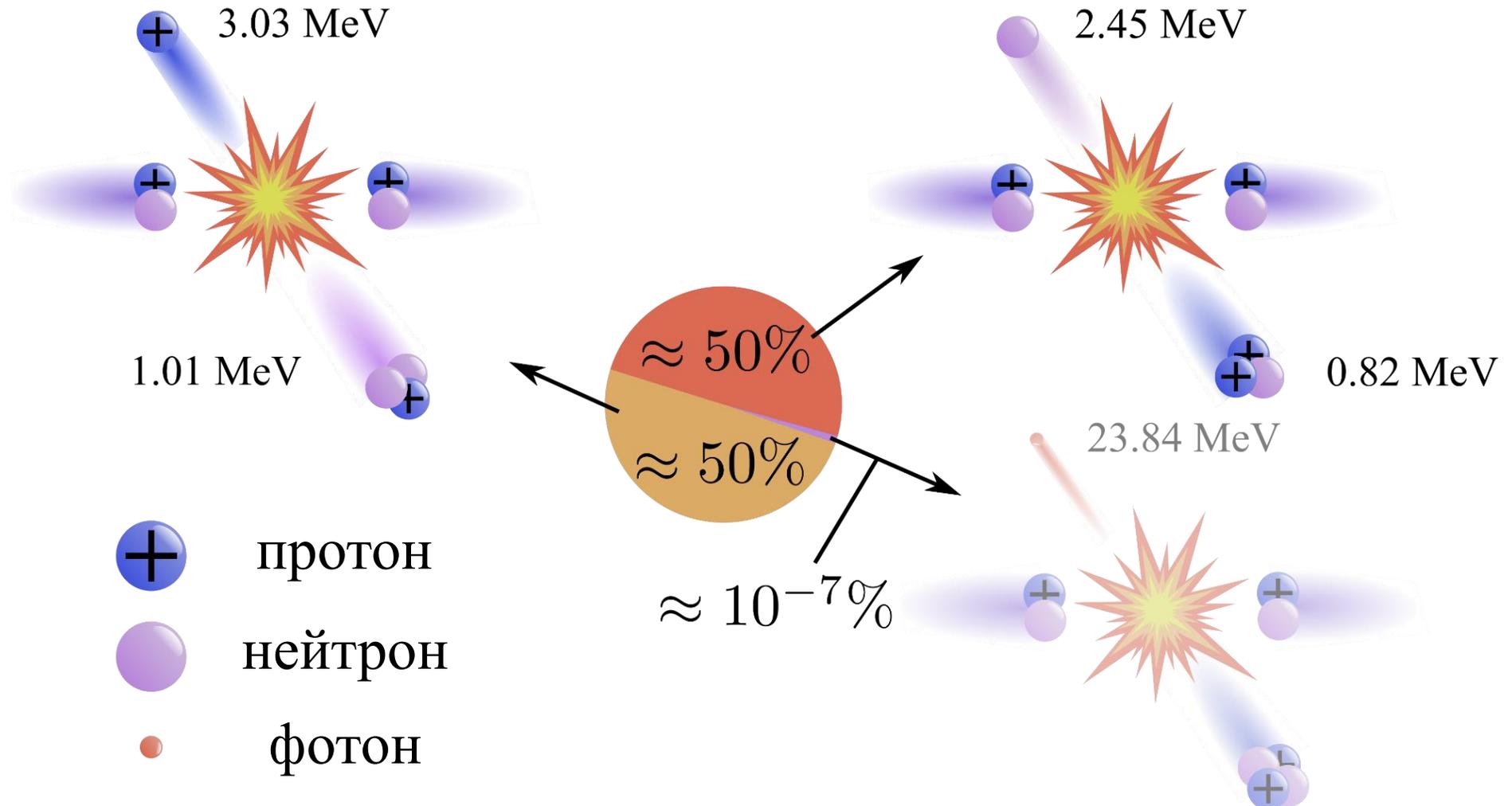
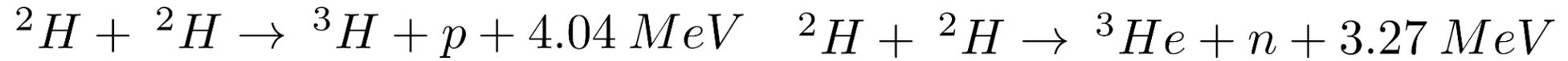


Разработка системы сцинтилляционных
детекторов для подавления космического
излучения в рамках проекта по исследованию
реакции ядерного dd -синтеза с поляризацией
исходных частиц при низких энергиях (PolFusion)

Антон Рождественский,
А. Васильев, М. Взнуздаев, Л. Коченда,
П. Кравченко, П. Кравцов, В. Ларионов,
В. Трофимов, В. Фотьев



DD-синтез





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

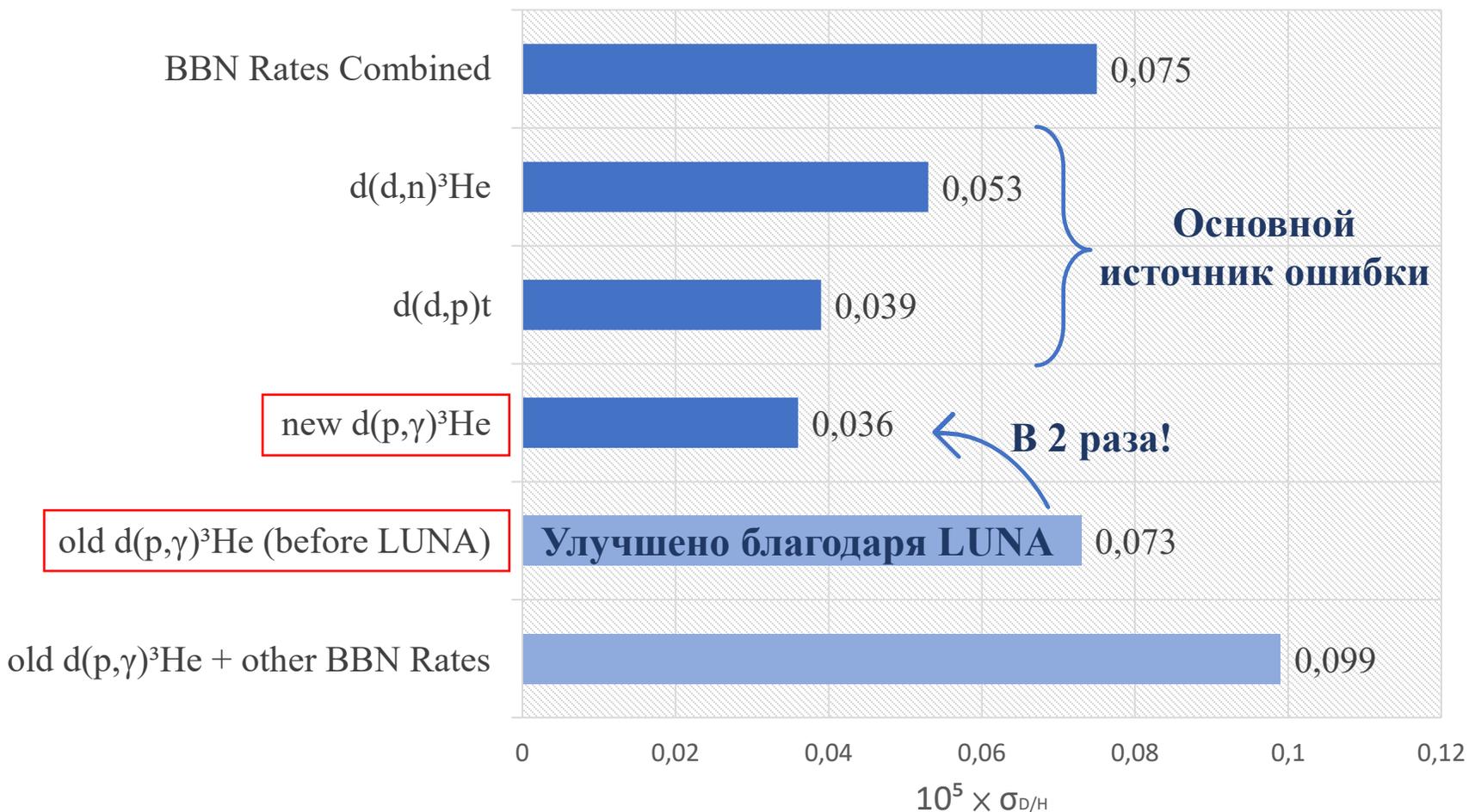
- Использование поляризованного топлива
- Увеличение сечения
- Управление угловым распределением вылета продуктов реакции
- Реакторы с малым выходом нейтронов

Прикладные аспекты

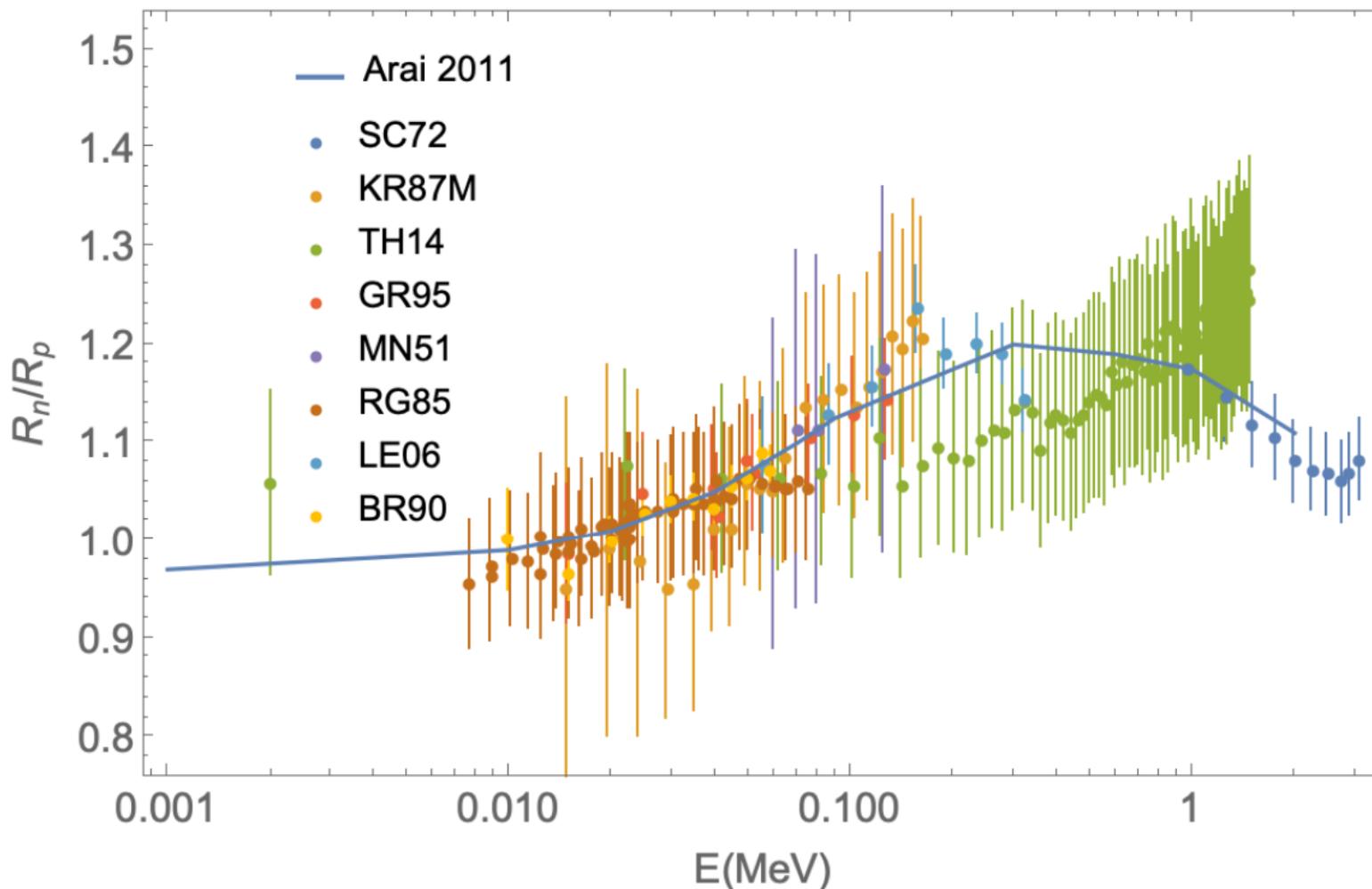
- Нарботка трития и гелия-3
- ^3He -ориентированная технология газоразрядных детекторов
- Источник нейтронов для наработки медицинских изотопов $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$

Big Bang нуклеосинтез → Первичное распределение изотопов D/H

Вклад ошибки в первичное распределение



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



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



**Необходимы
прямые измерения
отношения выходов
обоих каналов
неполяризованного
dd-синтеза**

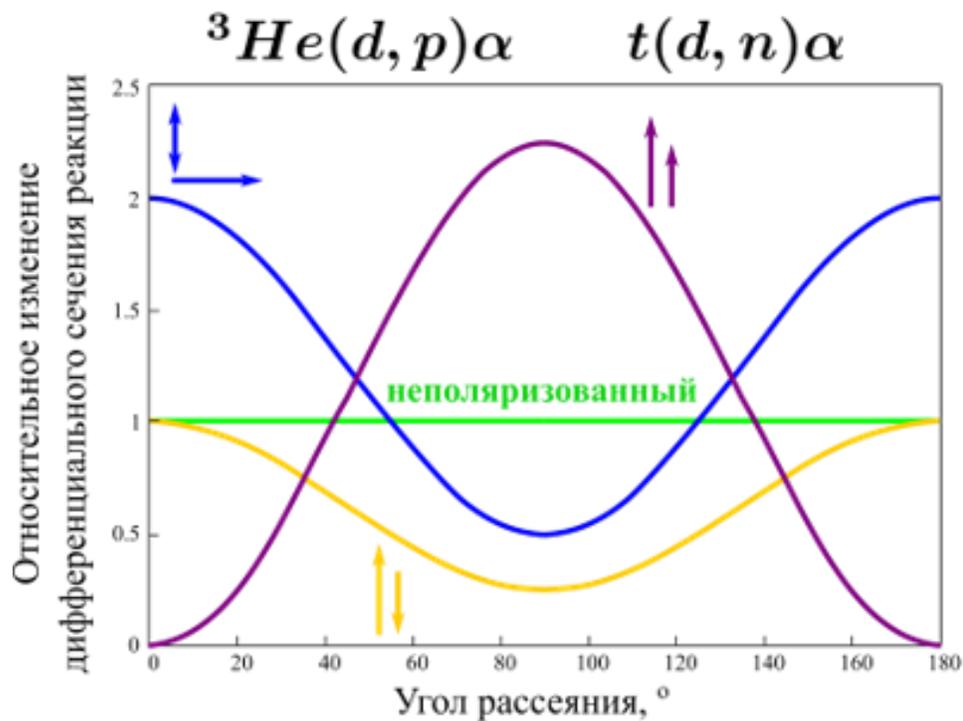
Ofelia Pisanti, Gianpiero Mangano, Gennaro Miele, and Pierpaolo Mazzella
Primordial Deuterium after LUNA: concordances and error budget (2020)

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



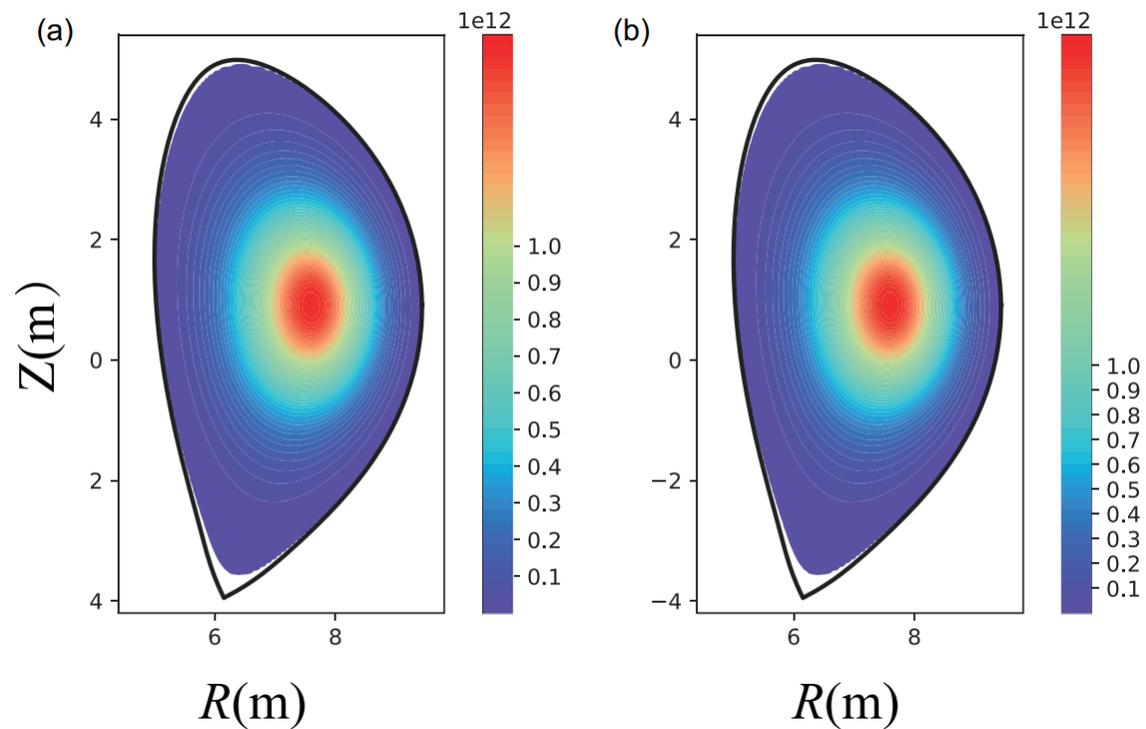
Термоядерный синтез и прикладные аспекты

- 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.



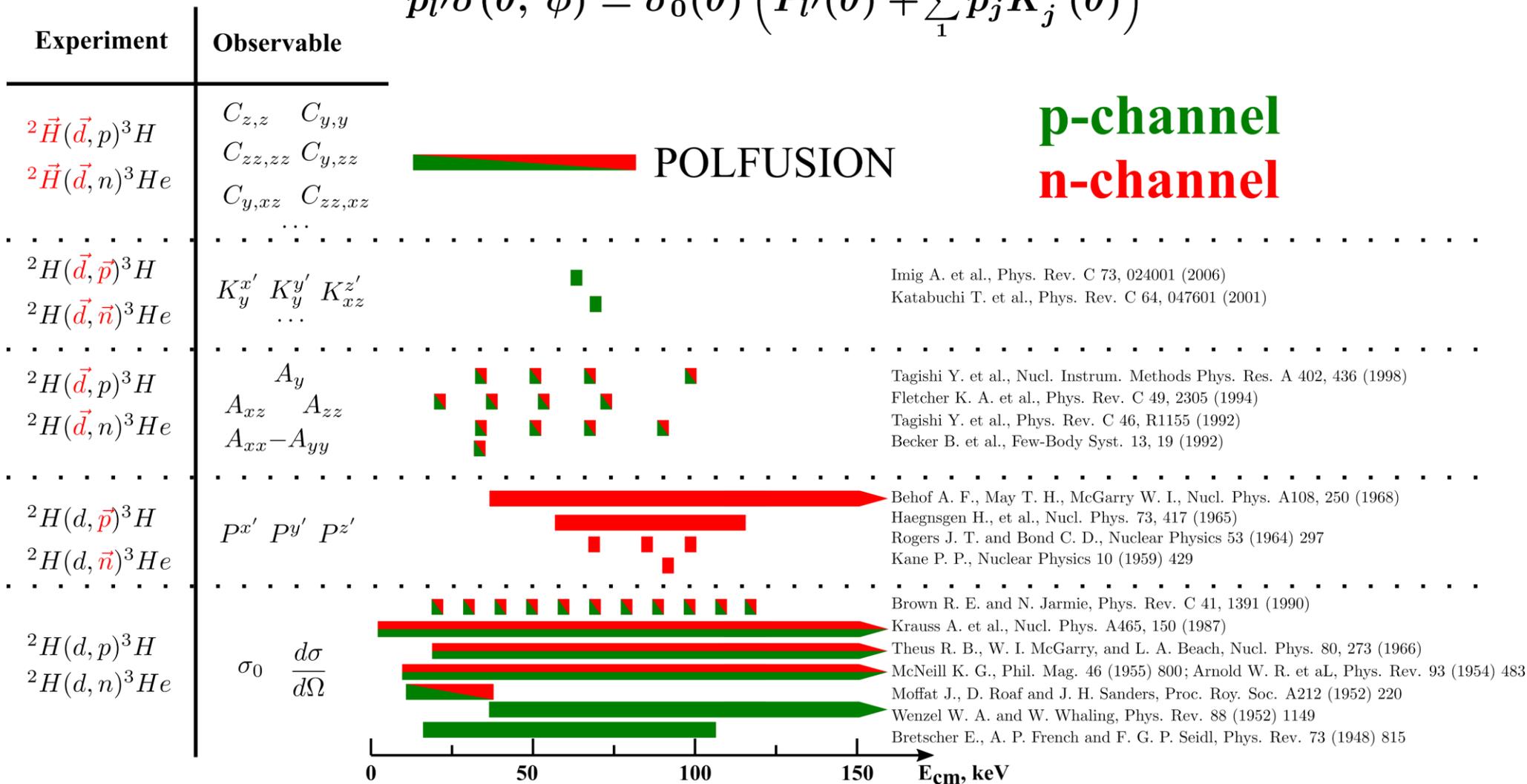
W.Yang, G.Li, X.Gong, X.Gao, X.Li, H.Li... Effect of the Fusion Fuels' Polarization on Neutron Wall Loading Distribution in CFETR (2021)
<https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1969064> (China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR))



История изучения реакции ядерного dd-синтеза

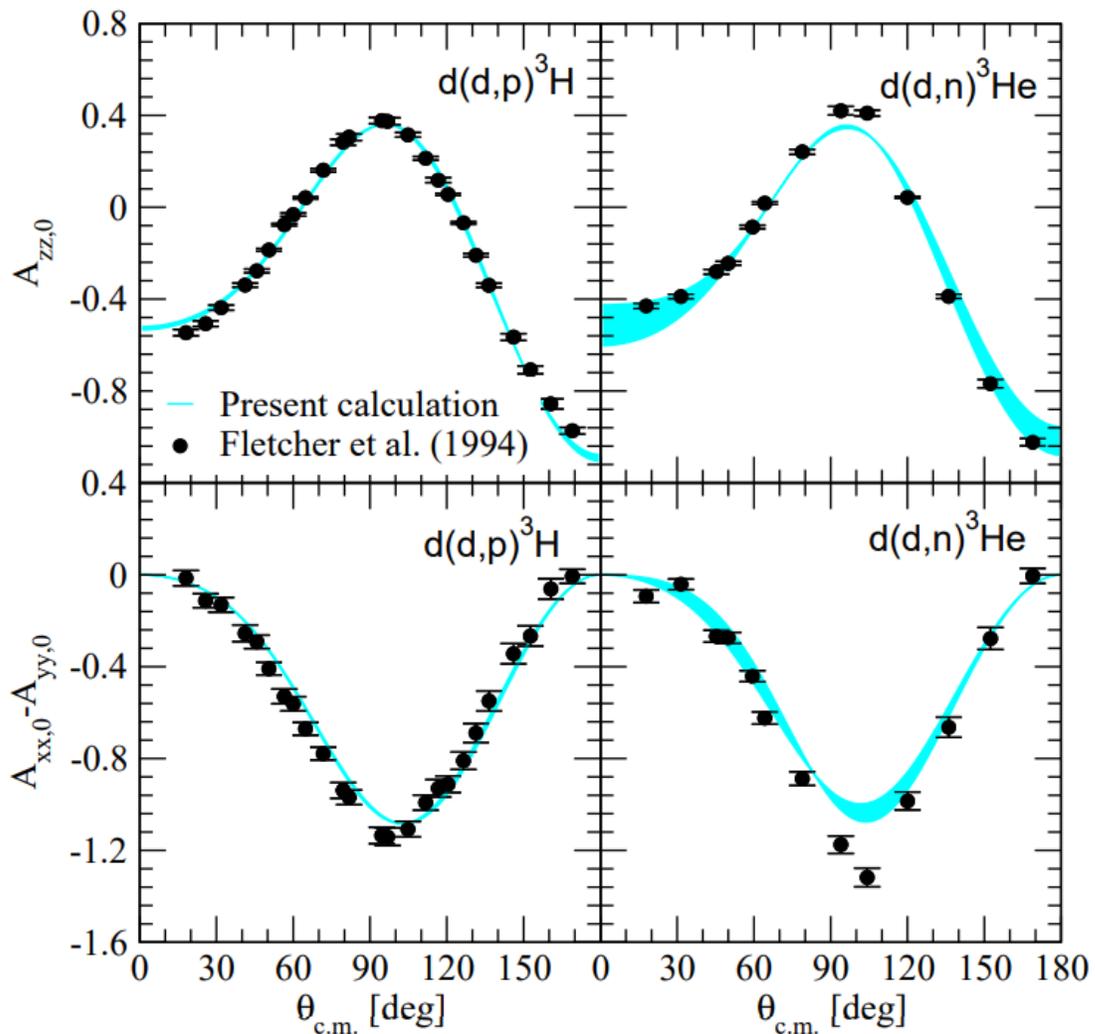
$$\sigma(\theta, \phi) = \sigma_0(\theta) \left(1 + \sum_1^9 p_j^b A_j^b(\theta) + \sum_1^9 p_j^t A_j^t(\theta) + \sum_1^9 \sum_1^9 p_j^b p_k^t C_{j,k}(\theta) \right)$$

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

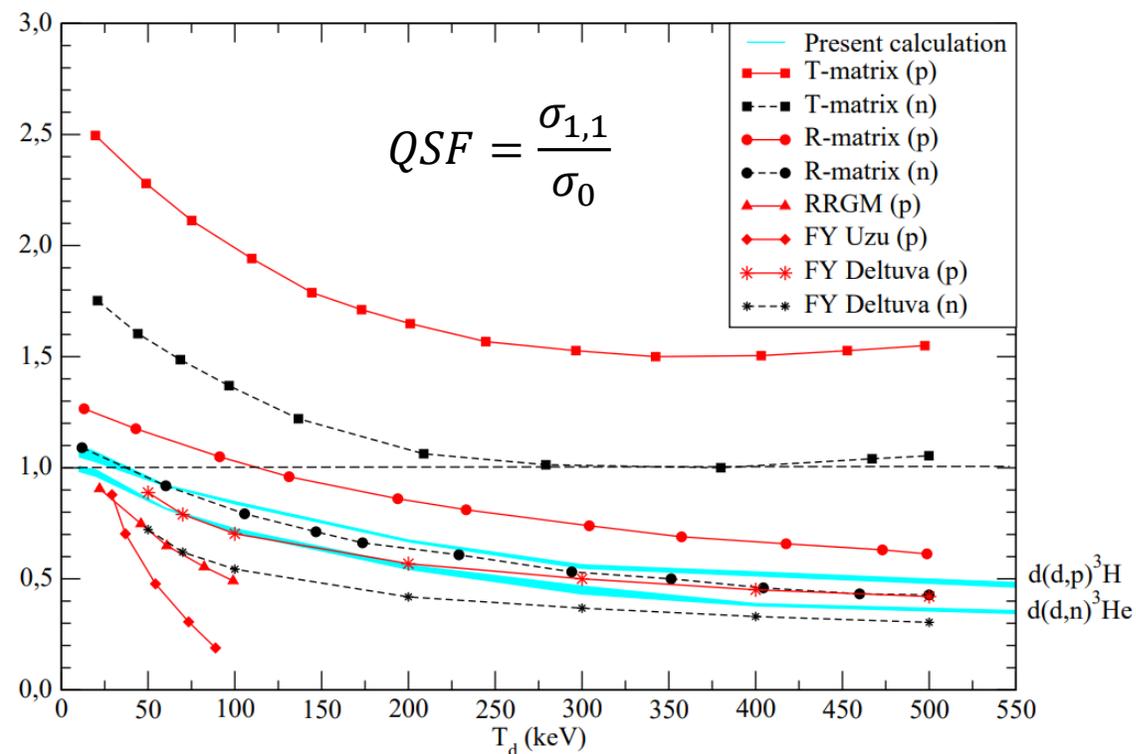




Теоретические расчеты

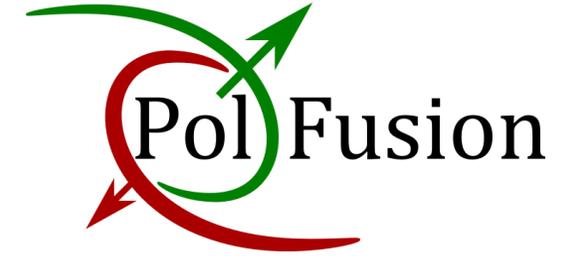


Наблюдаемые $A_{zz,0}$ и $A_{xx,0} - A_{yy,0}$ для реакций $\vec{d}(d, p)^3\text{H}$ и $\vec{d}(d, n)^3\text{He}$ при $T_d = 21$ keV. Голубые полосы показывают результаты настоящих расчетов.



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

Экспериментальная установка



PABS
Источник
поляризованных
атомов

4 π – детектор

NRP
Поляриметр на
асимметрии ядерной
реакции

POLIS
Источник
поляризованных
ионов

LSP
Поляриметр на
Лэмбовском сдвиге

0.5 m

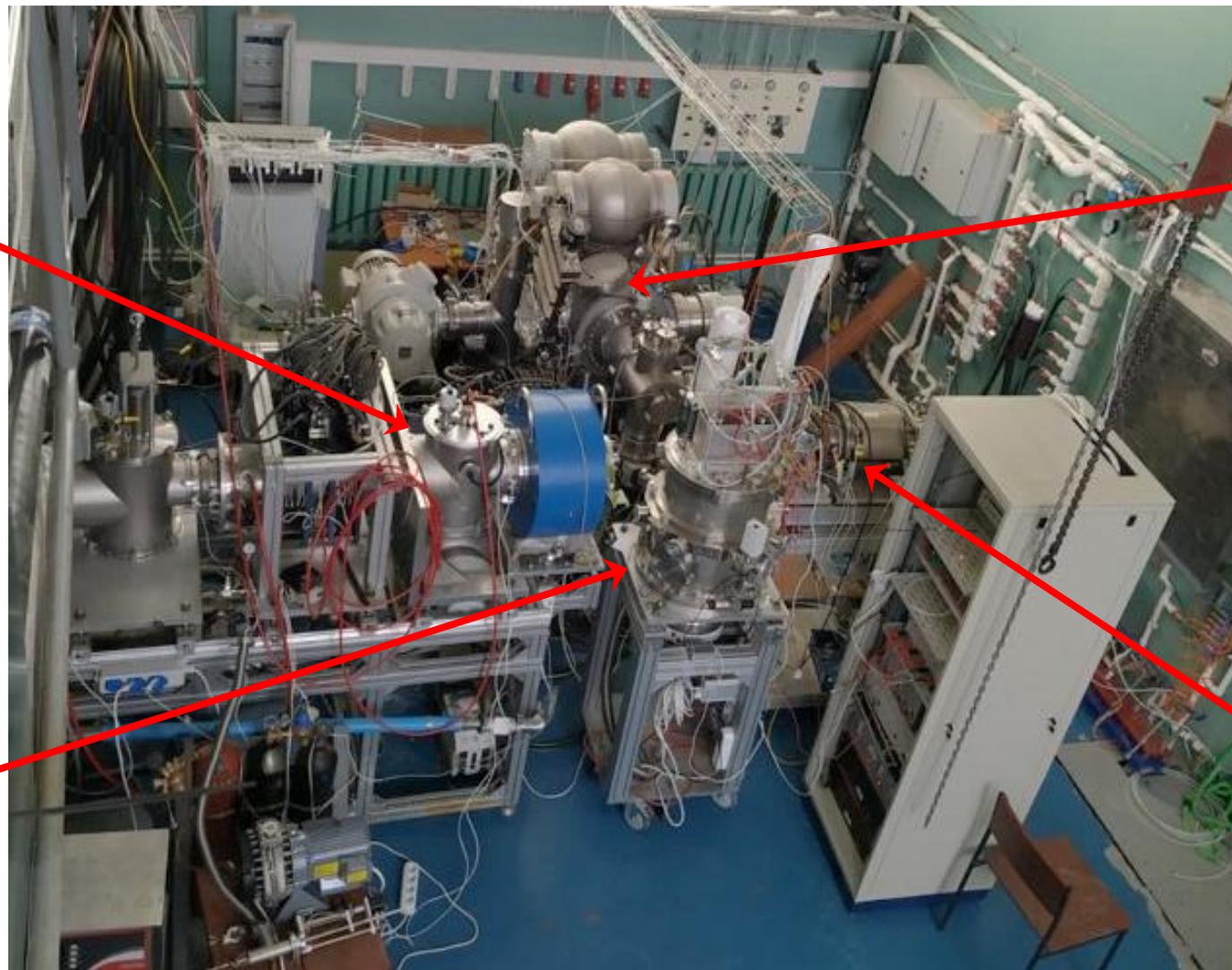
POLIS

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

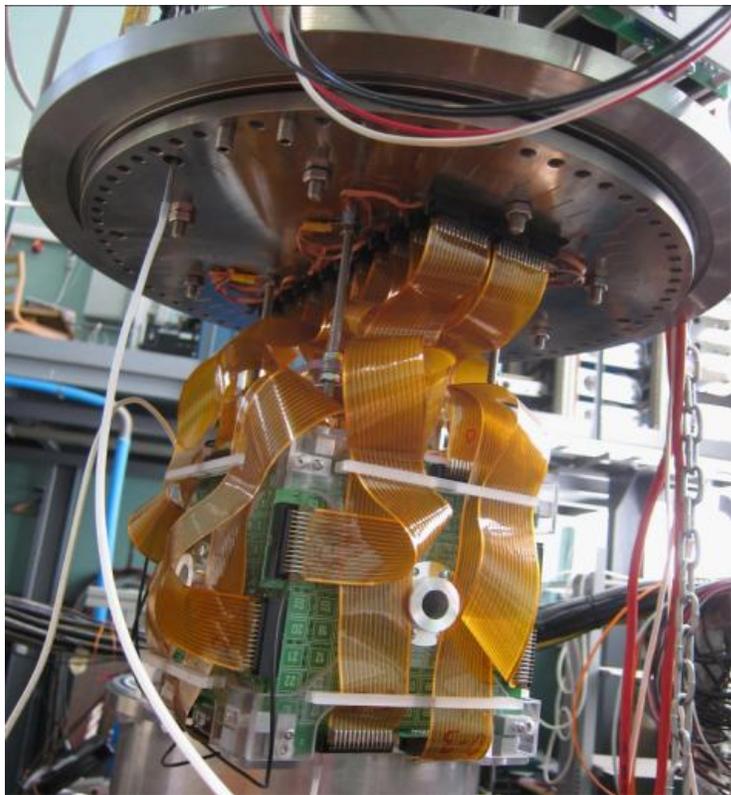
Сопло:
 $d = 2$ мм
 $T = 65-85$ К

Поляриметр

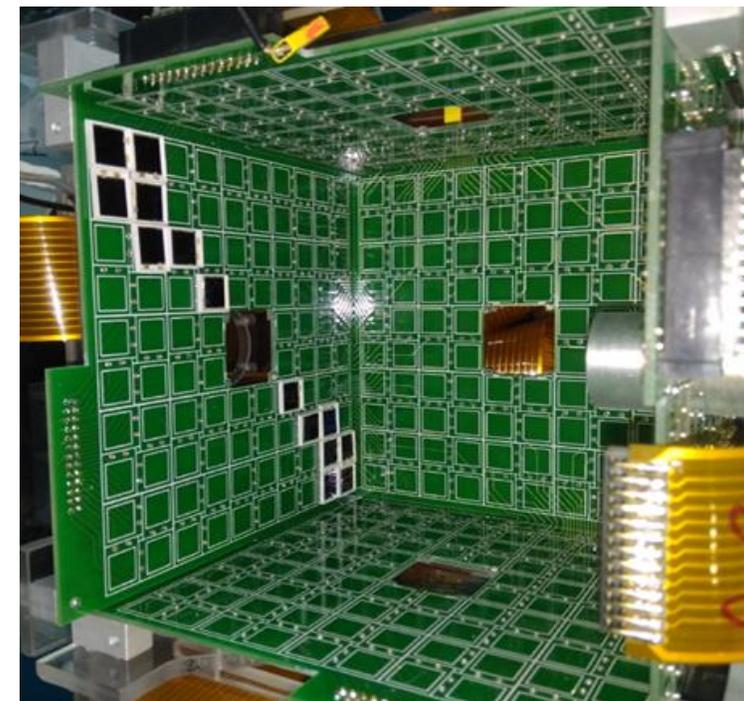
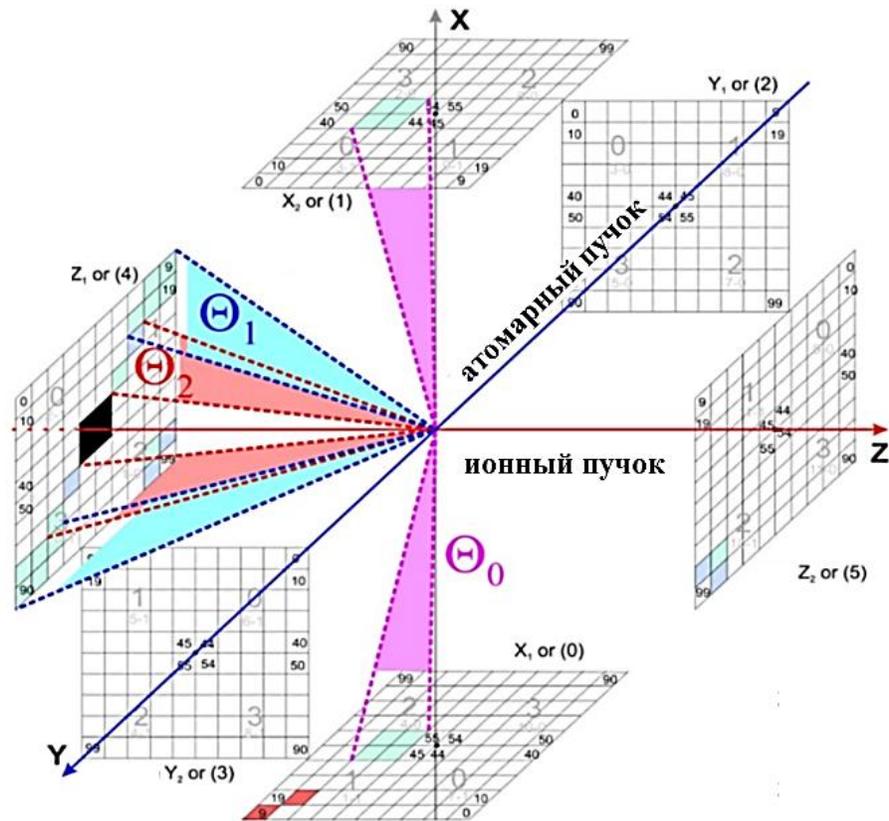


Детекторная система

Координатная система детектора



Внешний вид детектора

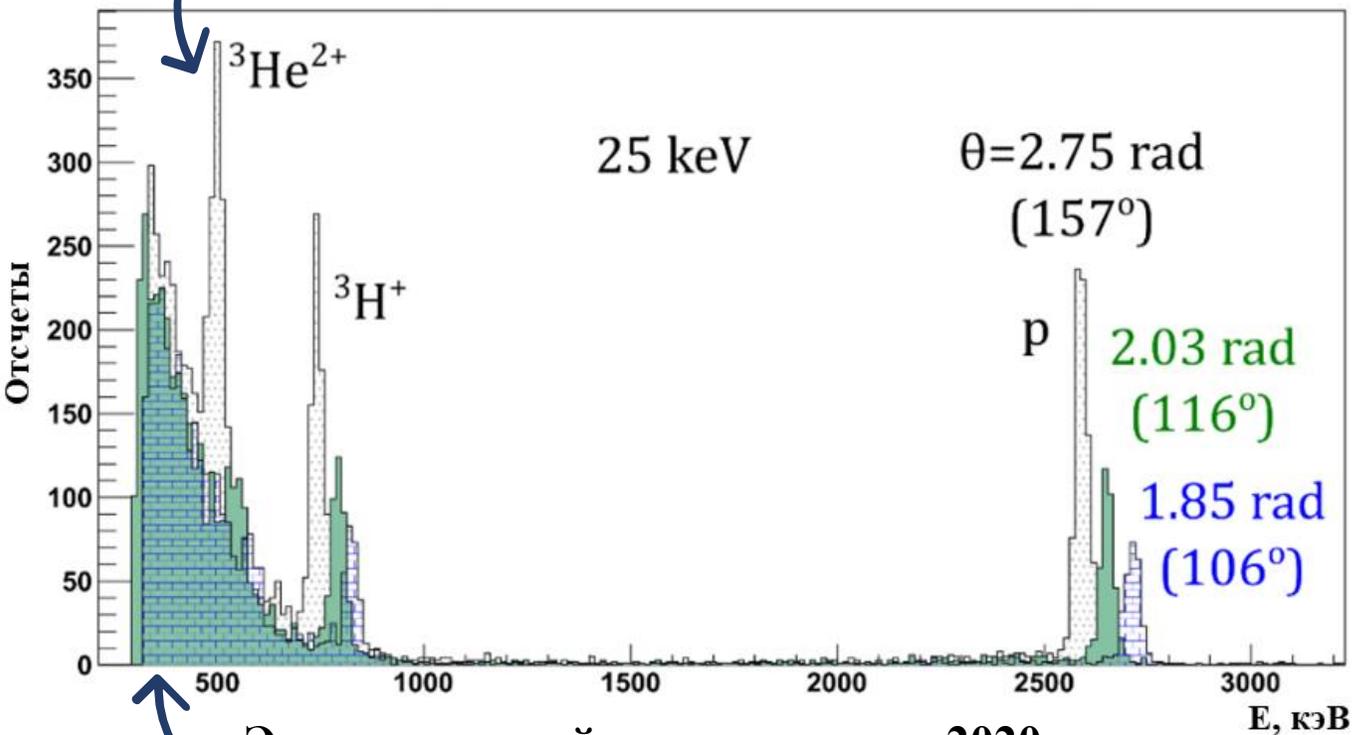


Внутреннее устройство
детектора



Результаты 2020 года

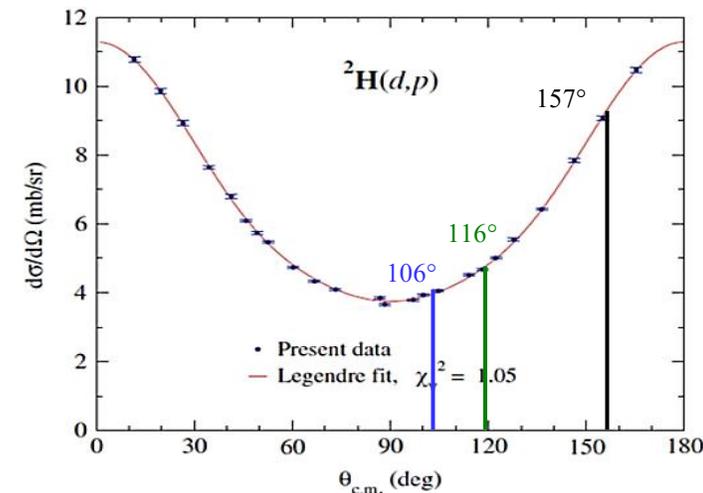
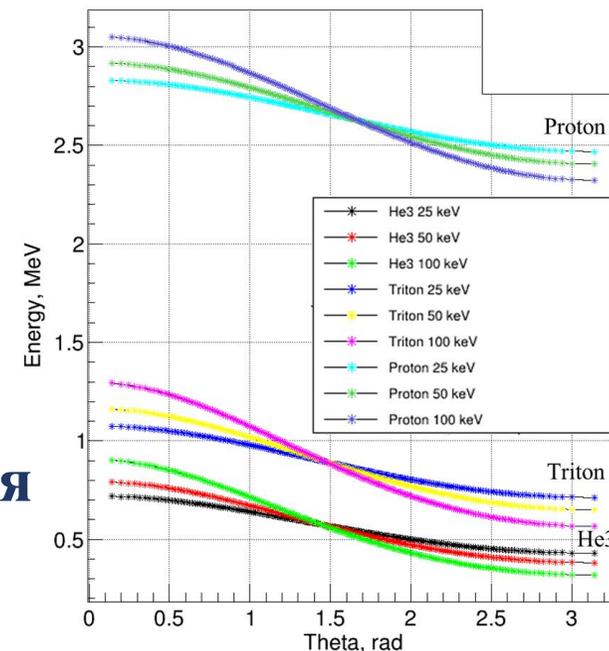
Выделение пиков нейтронного канала для угловых направлений равных 106 и 116 градусам, осложнено сильным влиянием космического излучения



Энергетический спектр запуска 2020 года

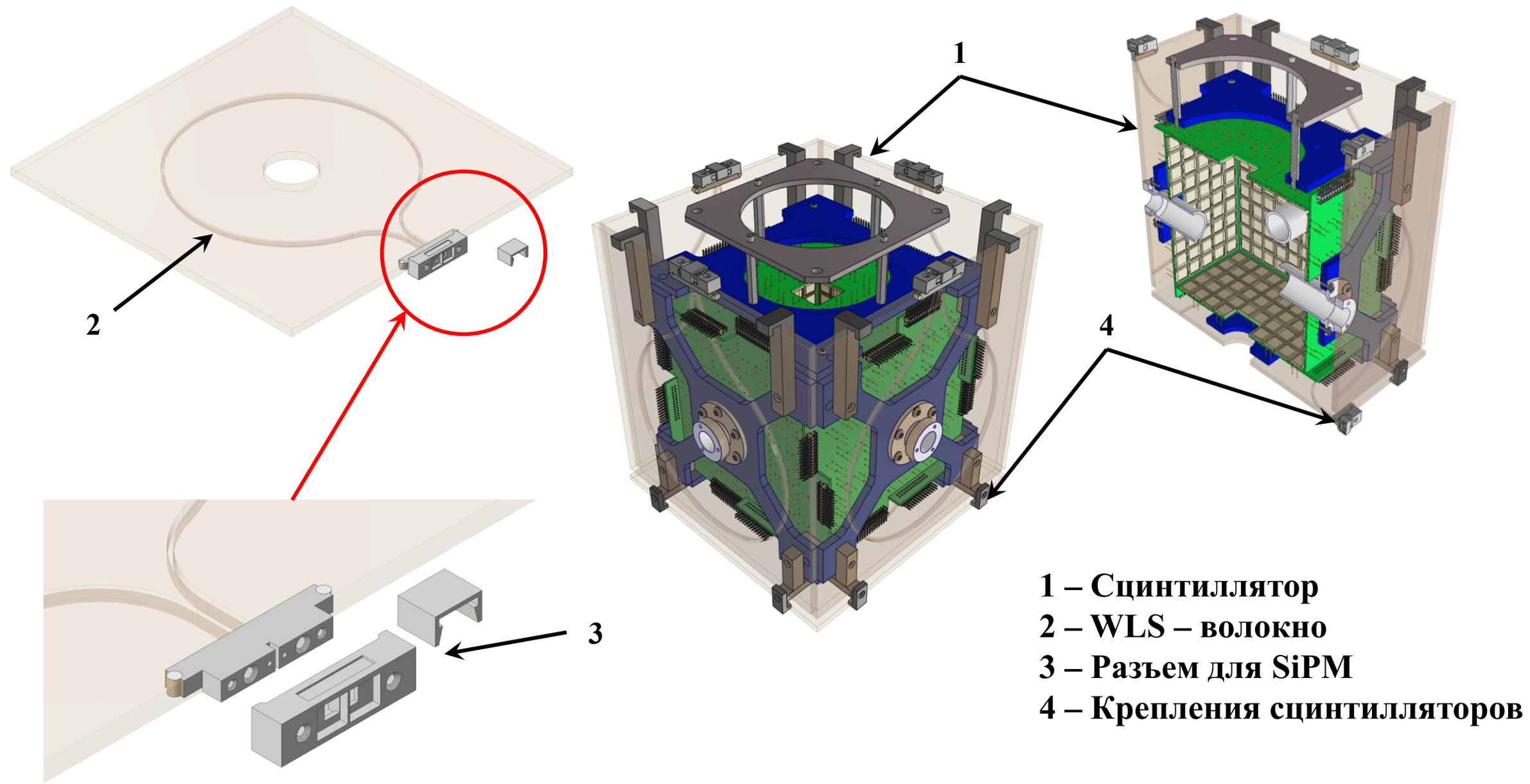
Фон космического излучения

Необходима дополнительная детекторная система!

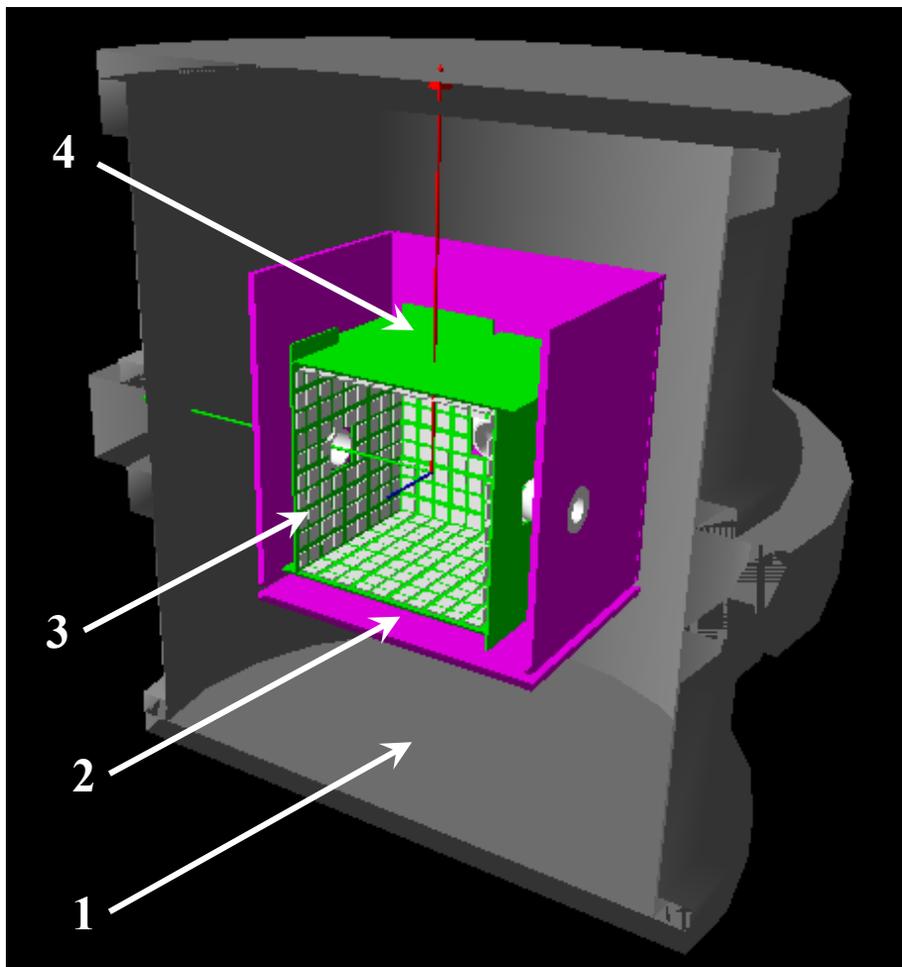


D.S. Leonard et al., Phys. Rev. C 73, 0045801 (2006)

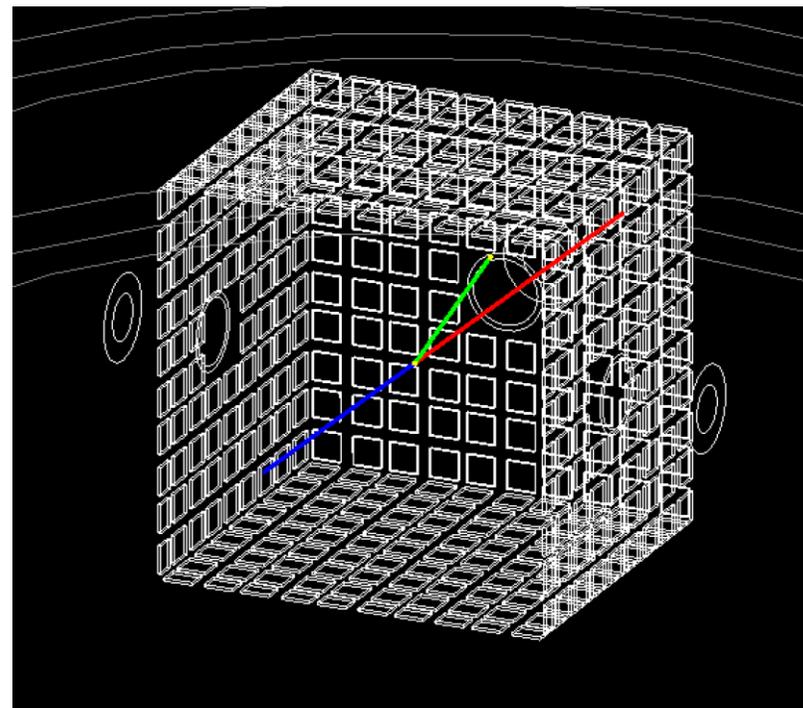
Сцинтилляционный детектор



- 1 – Сцинтиллятор**
- 2 – WLS – волокно**
- 3 – Разъем для SiPM**
- 4 – Крепления сцинтилляторов**

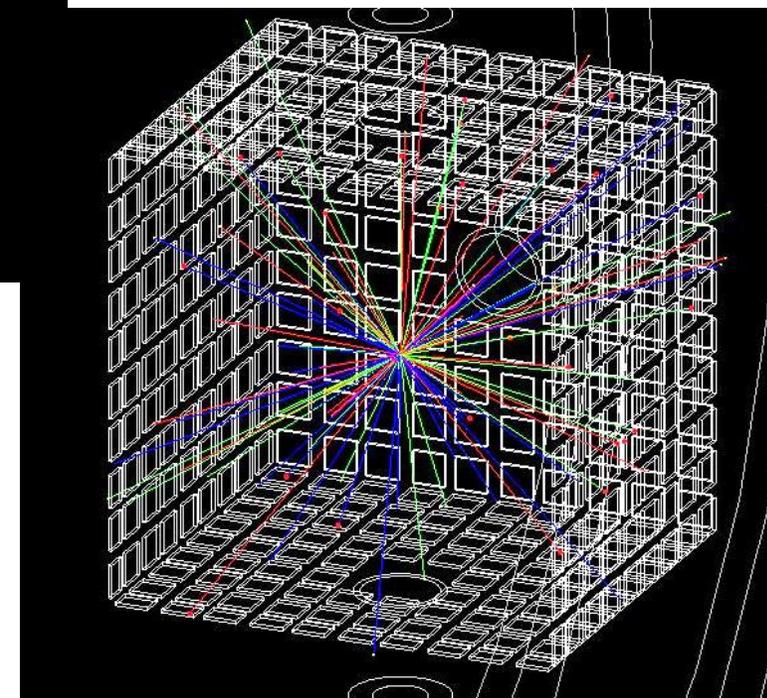


Геометрия детектора в Geant 4



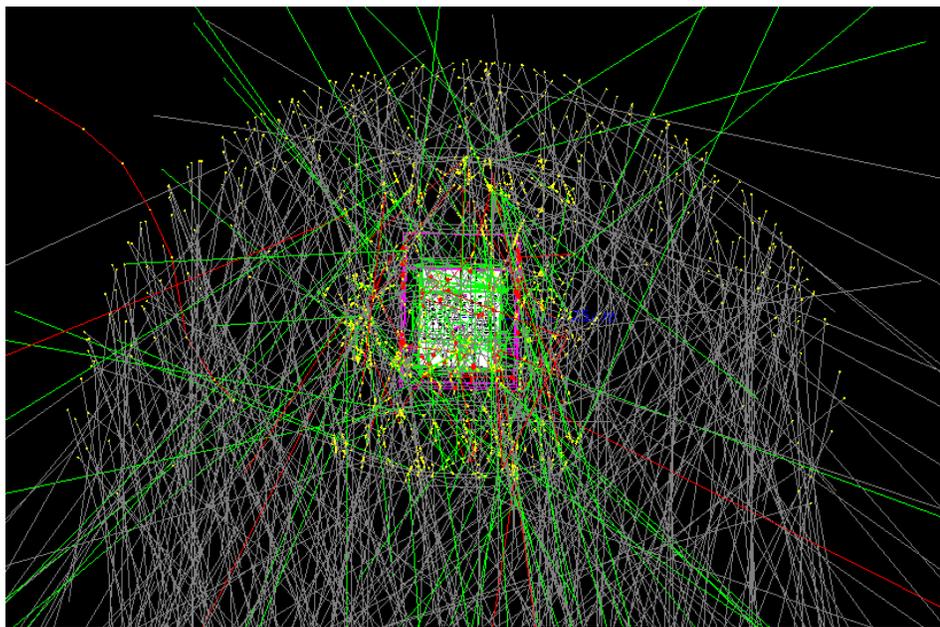
- 1 – Вакуумная камера
- 2 – Сцинтилляторы
- 3 – PIN - диоды
- 4 – Печатные платы

Красный - p
Синий - t
Зеленый - He^3

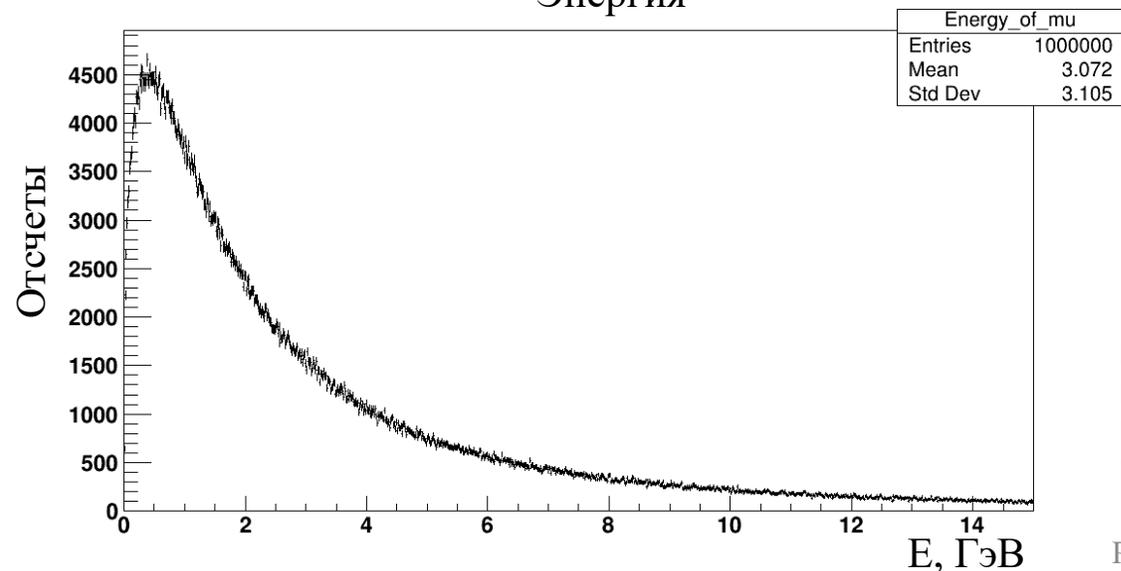
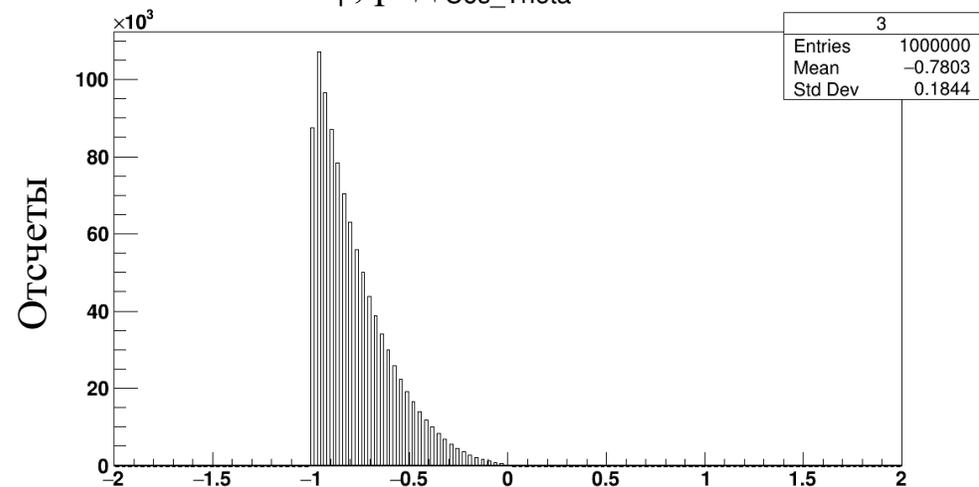
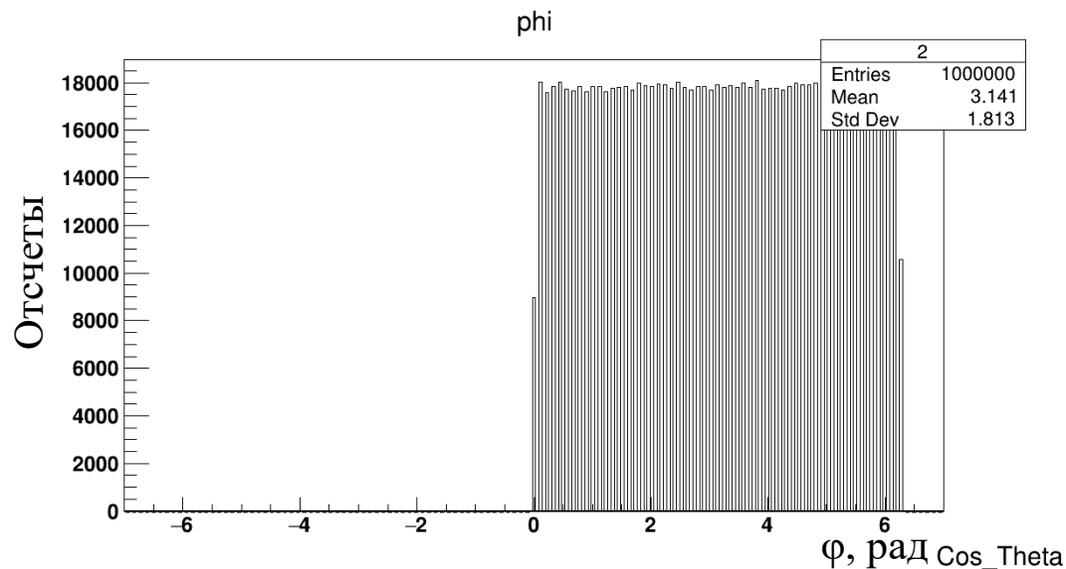




Генератор космического излучения

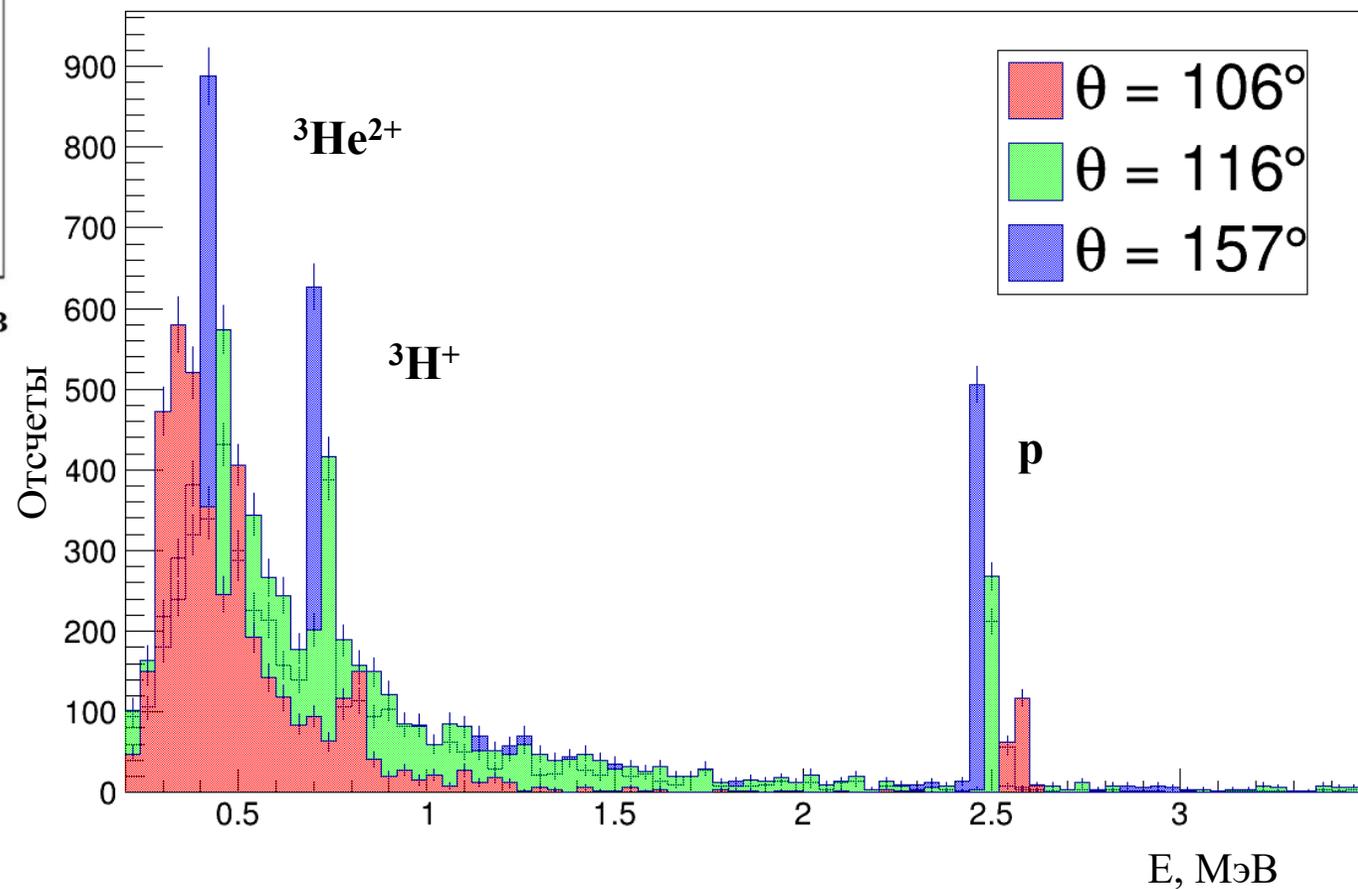
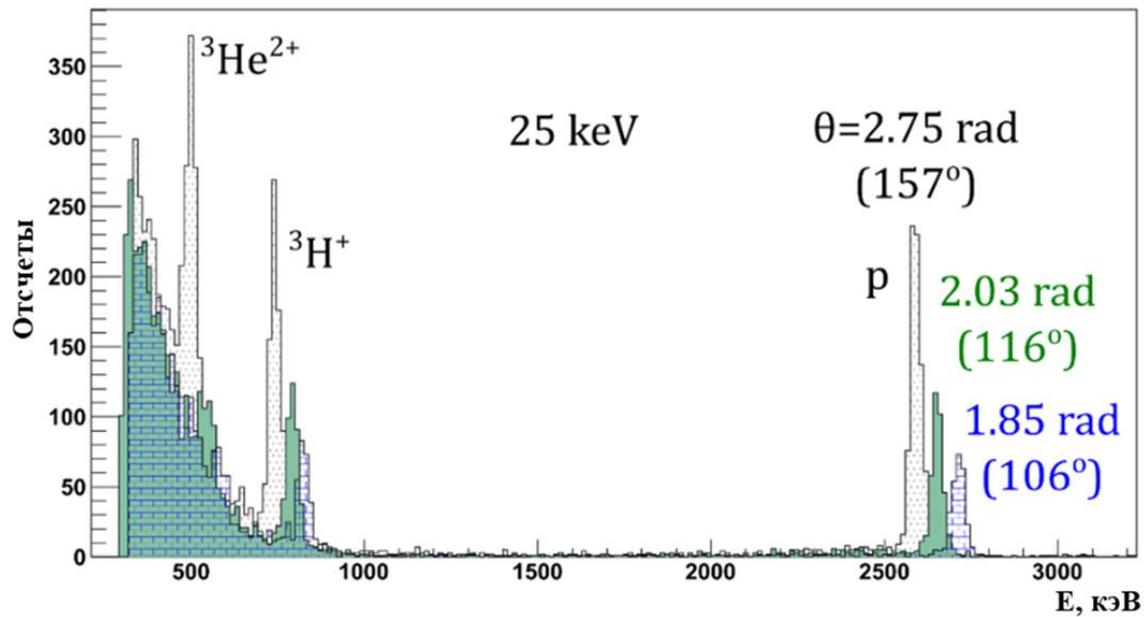


Энергия

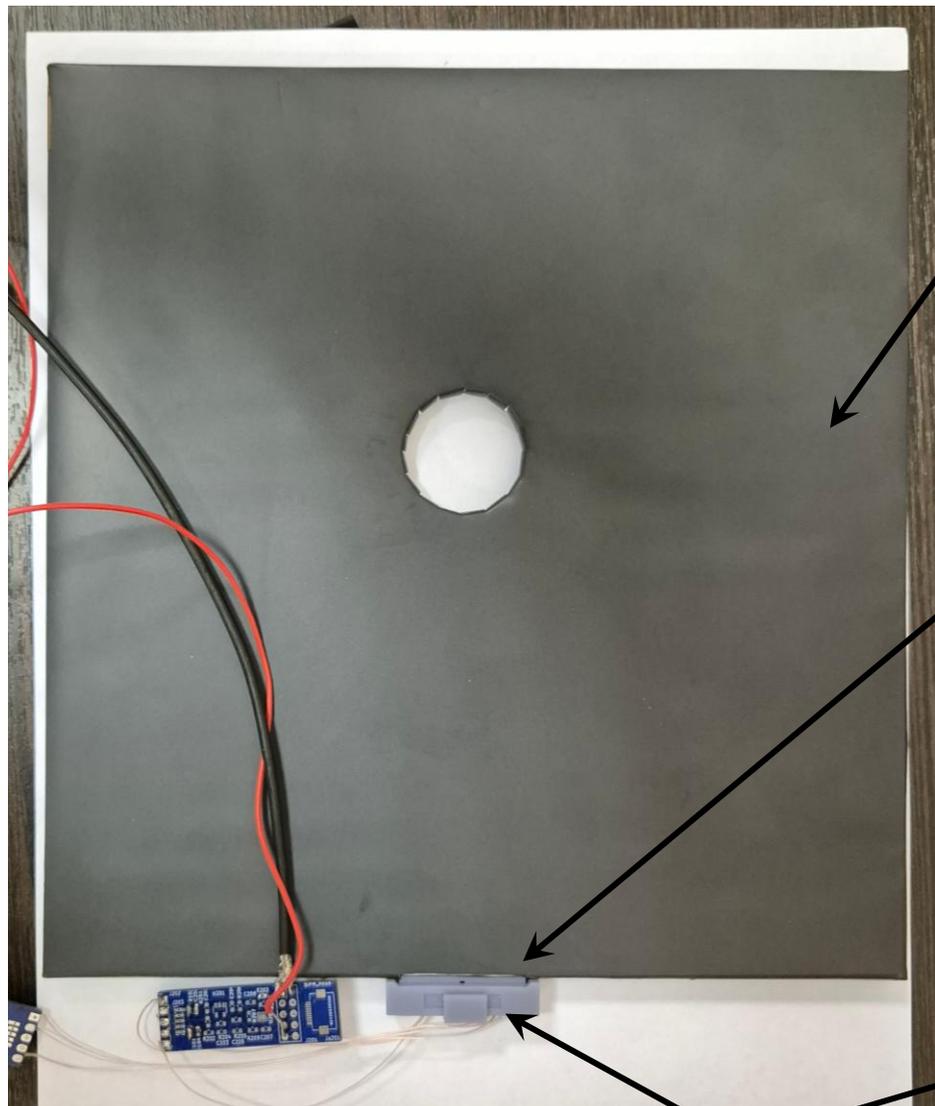


D. Pagano, et al.,
EcoMug: An Efficient COsmic MUon Generator for cosmic-ray muon applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1014, 2021, 165732, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165732>.

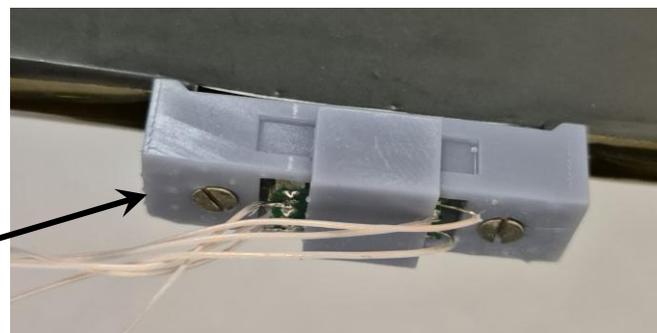
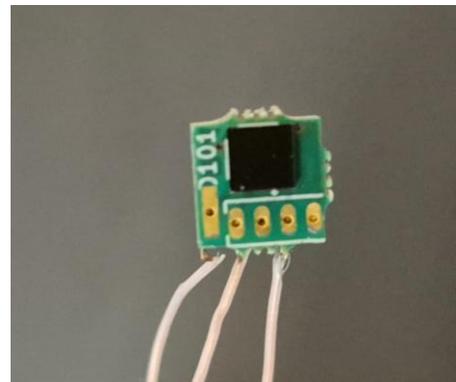
Рождественский А. Ю.



Тестовая сборка (сцинтиллятор)

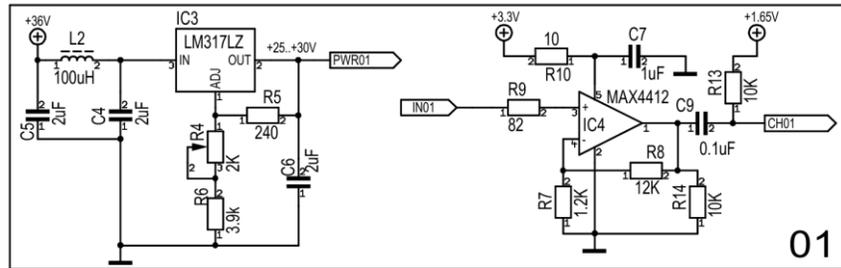


SiPM Onsemi MicroFJ-30035-TSV

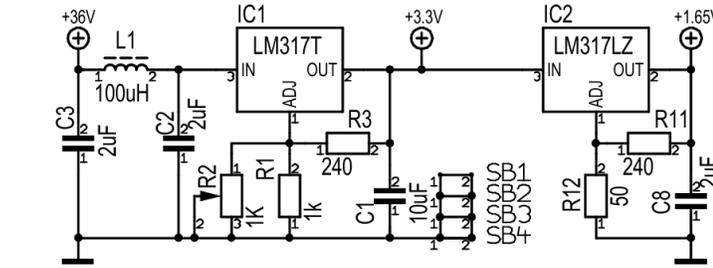


- 1 – WLS волокно
- 2 – Сцинтиллятор (BC – 408)
- 3 – SiPM

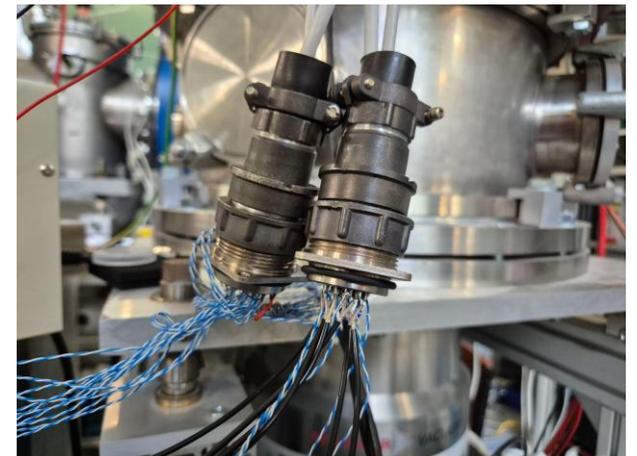
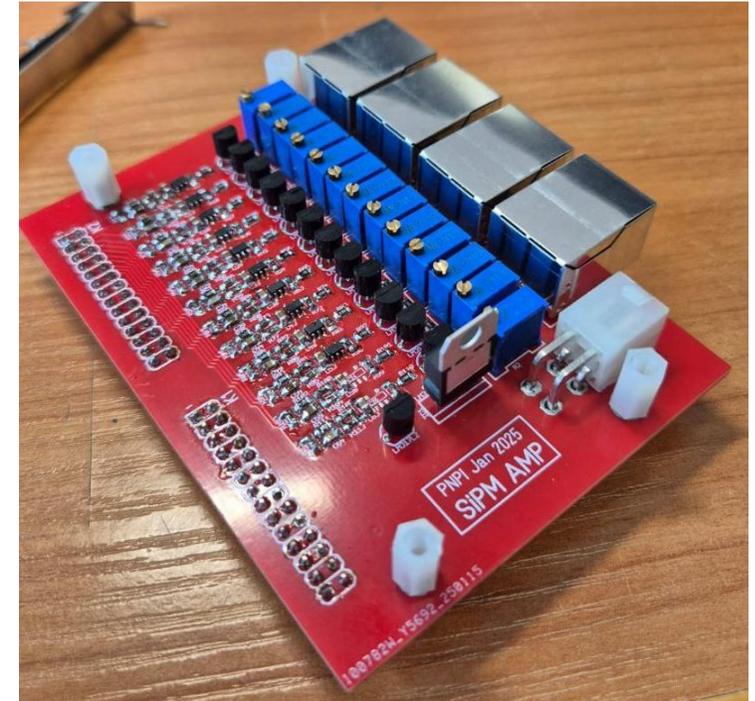
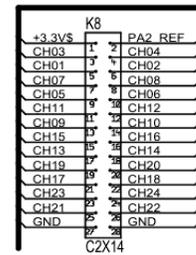
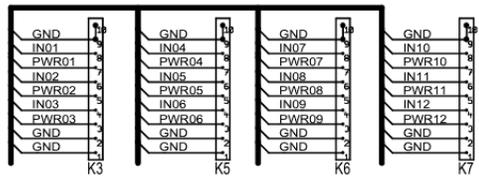
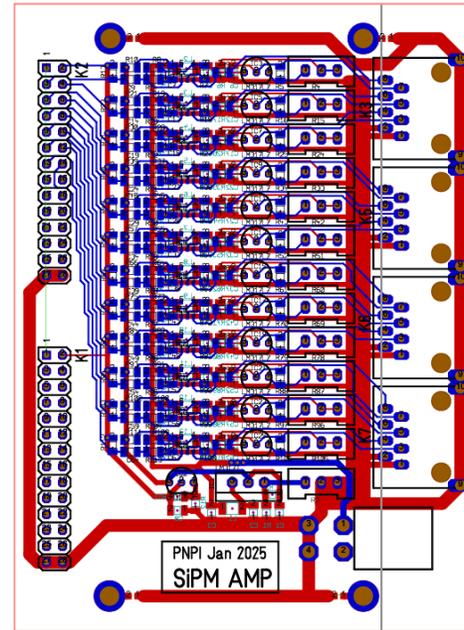
Усиление сигнала

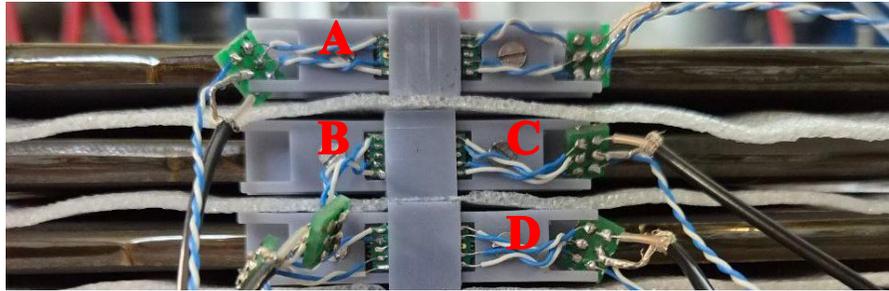


Питание

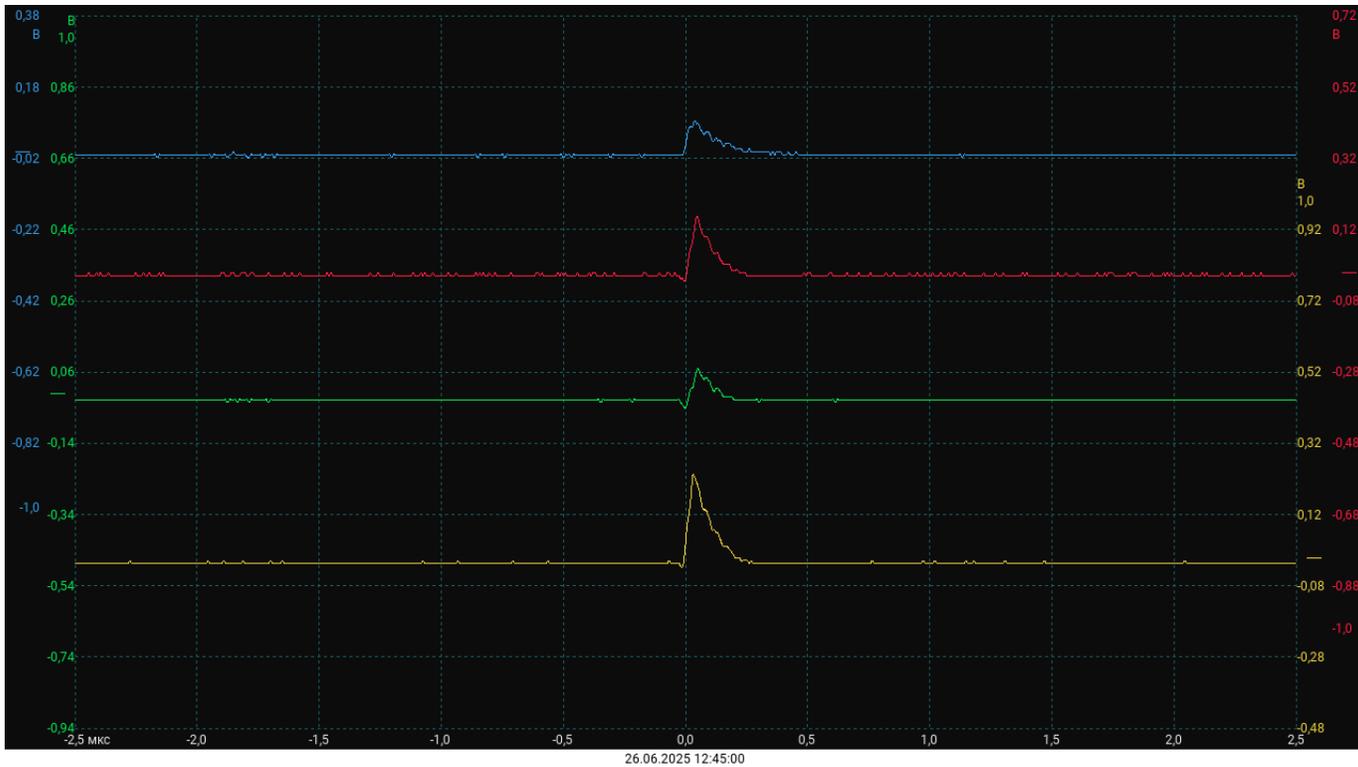


Плата

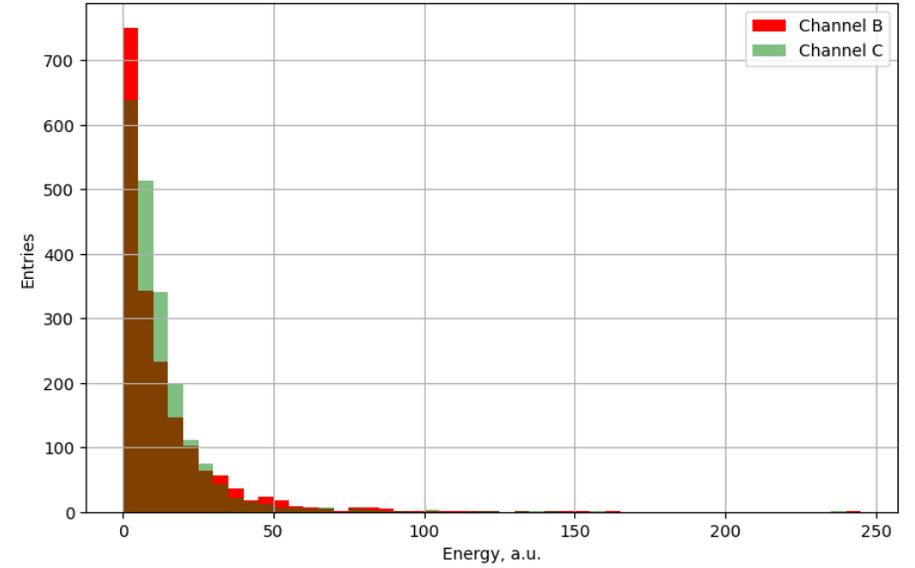




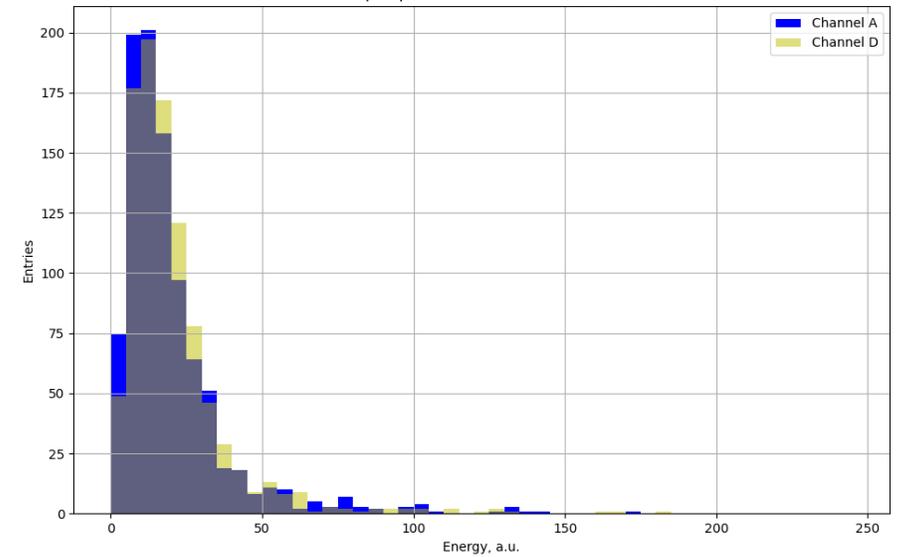
A+D = Trigger



PicoScope Spectrum: 2221 events (E(A,D)>10)

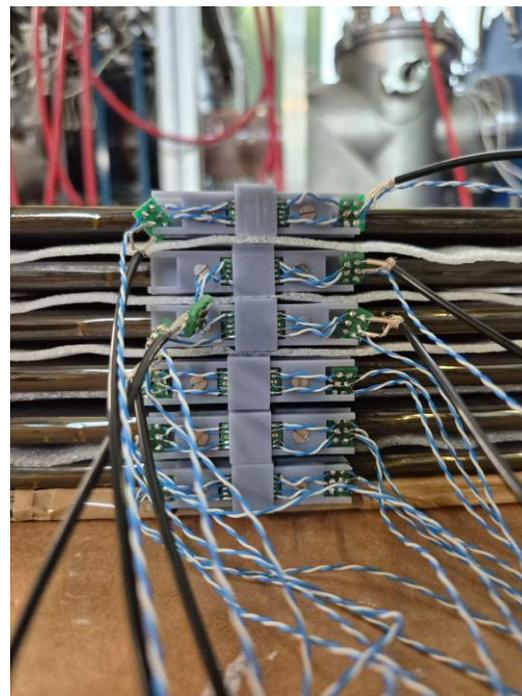
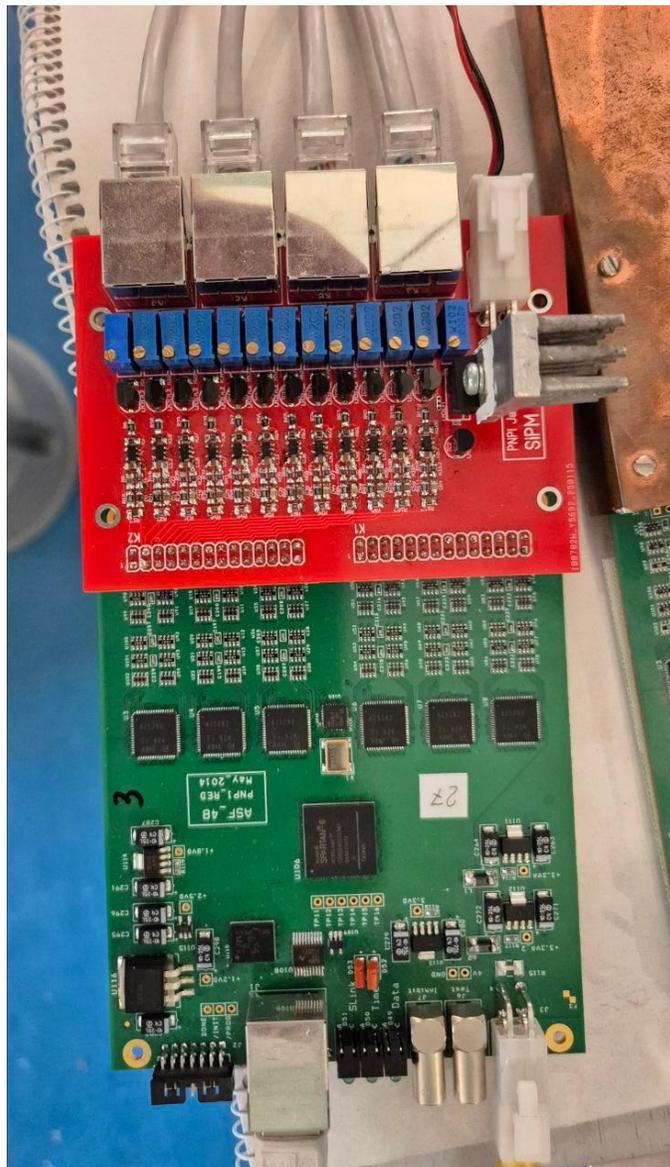


PicoScope Spectrum: 975 events (E(B,C)>10)



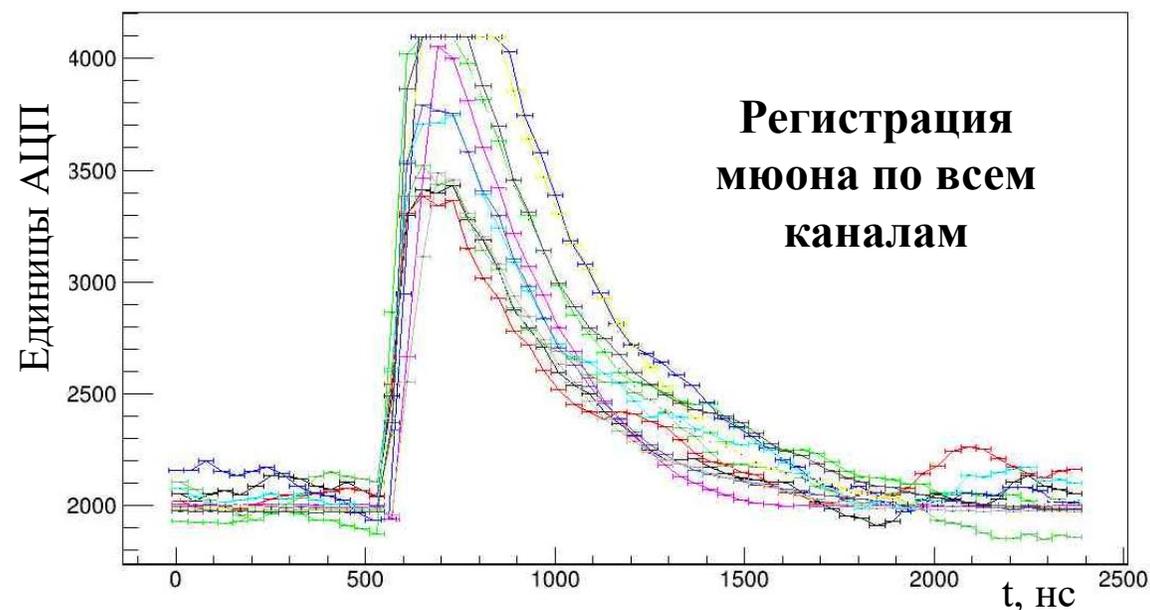
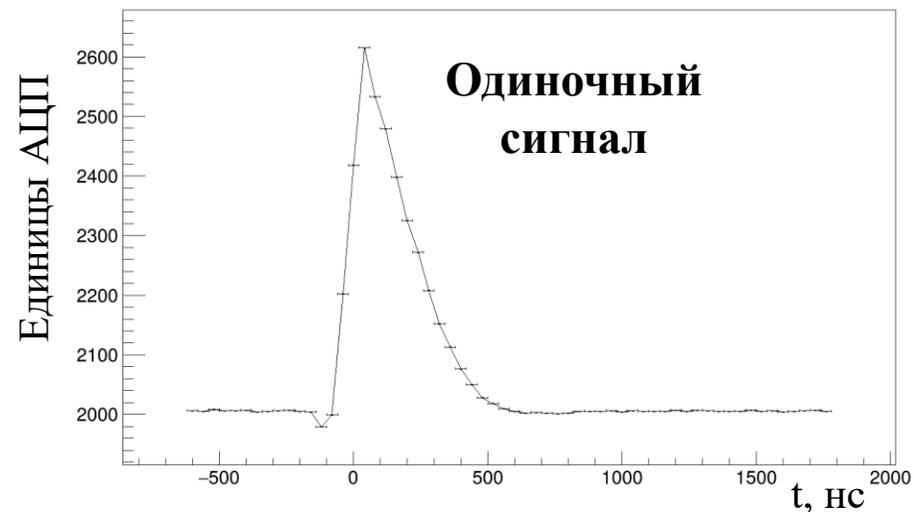


Регистрация космического излучения



ASF 48 CROS 3

C01CH05 t=20.80s min=1978.9[12] max=2620.9[16] q=0





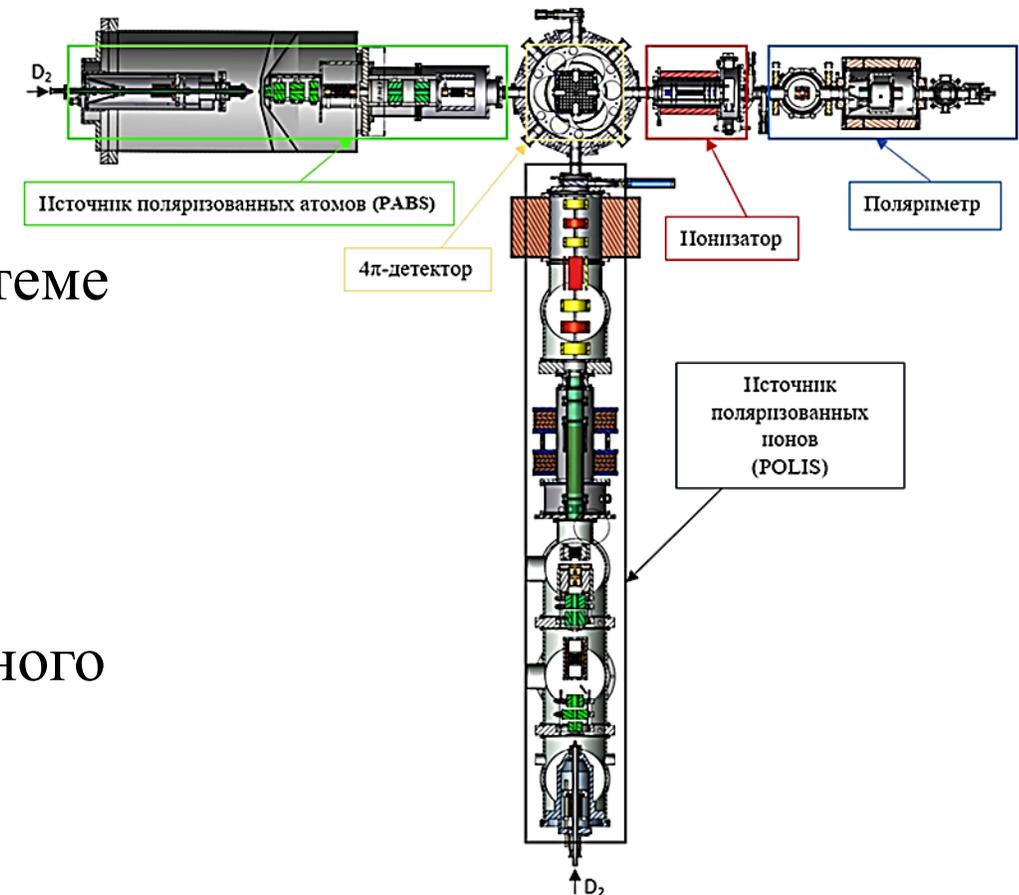
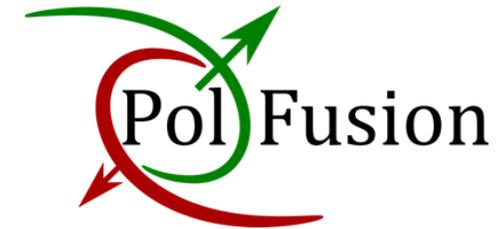
Заключение

Выполнено:

- Проведено моделирование системы сцинтилляционных детекторов
- Выбран оптимальный генератор космического излучения
- Создана электроника для SiPM
- Собрана система вне вакуумной камеры
- Проведено подключение системы к общей системе сбора данных

План работ:

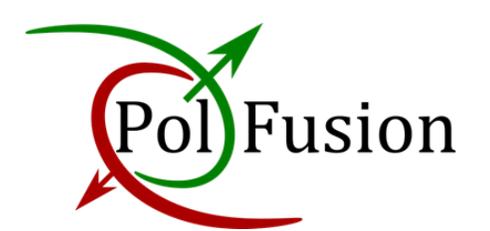
- Набор статистики космического излучения
- Размещение системы в вакуумной камере главного детектора
- Получение экспериментальных данных





НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова

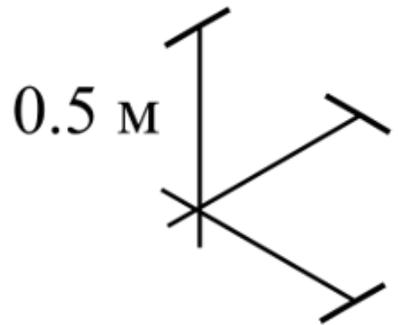
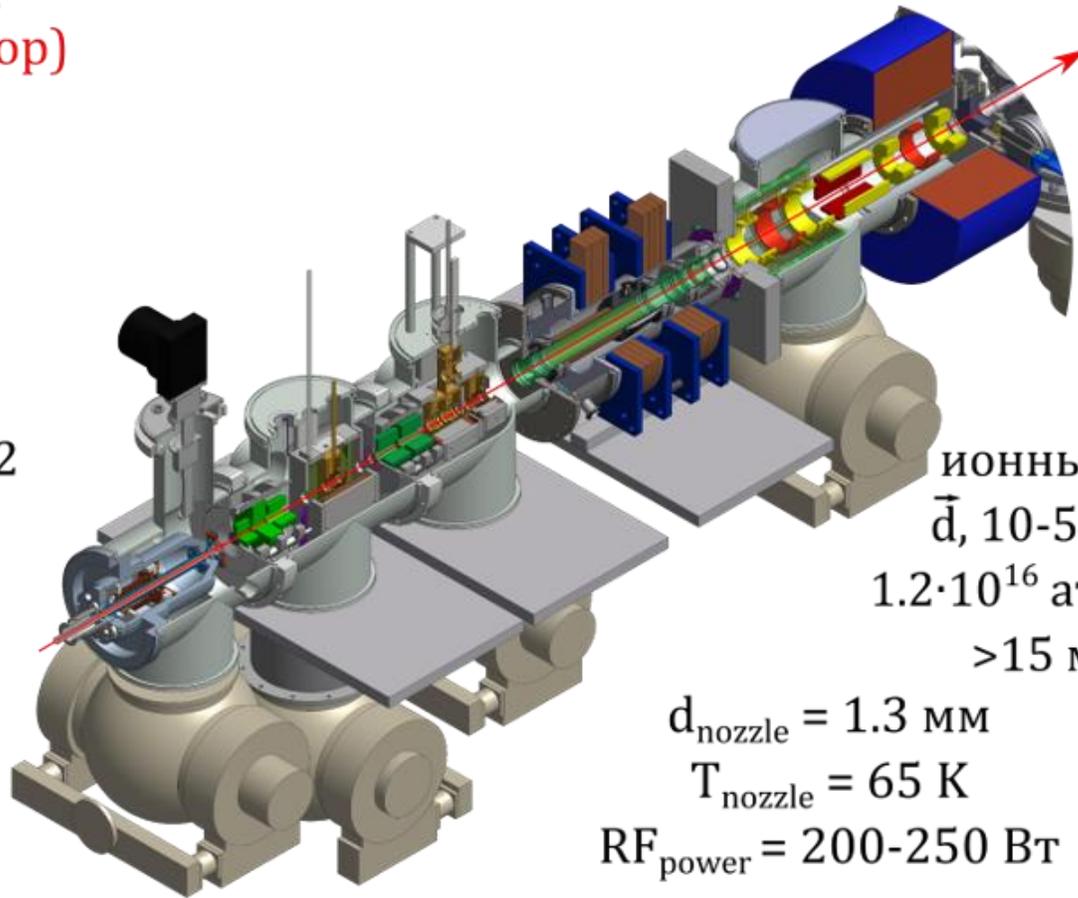


Спасибо за внимание!

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

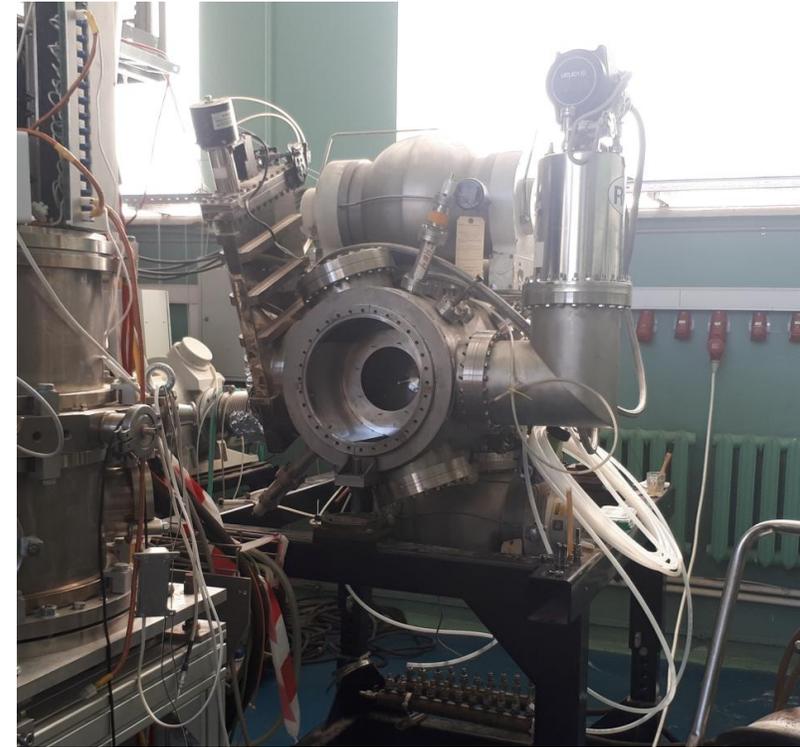
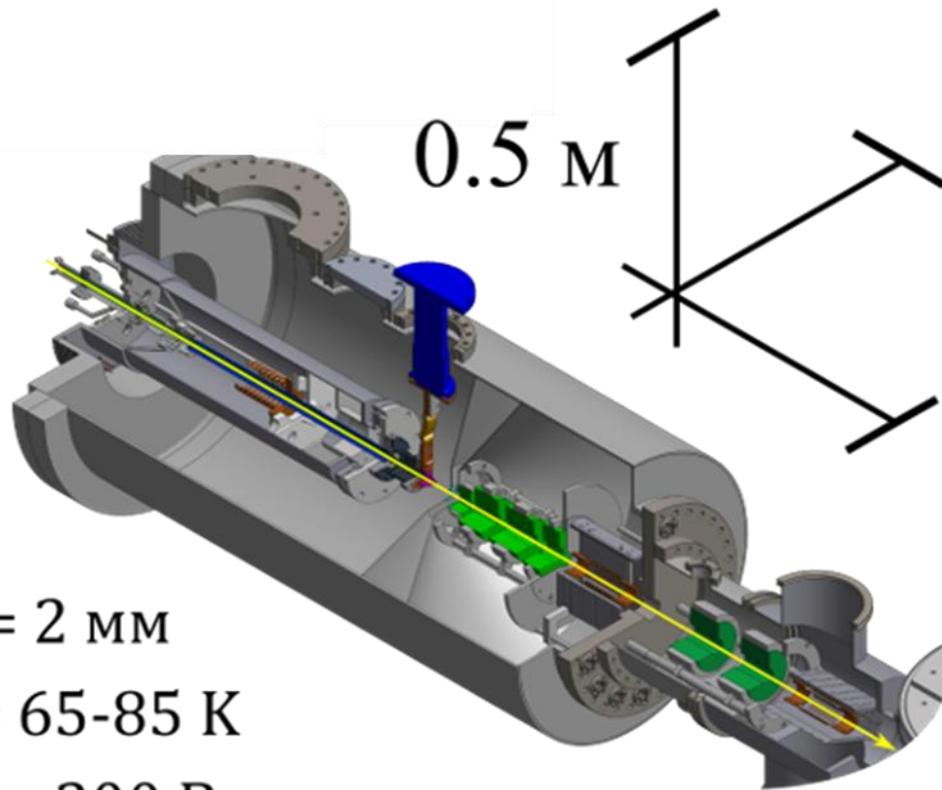
Поляризатор:

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



ρ_z (вектор) ρ_{zz} (тензор)

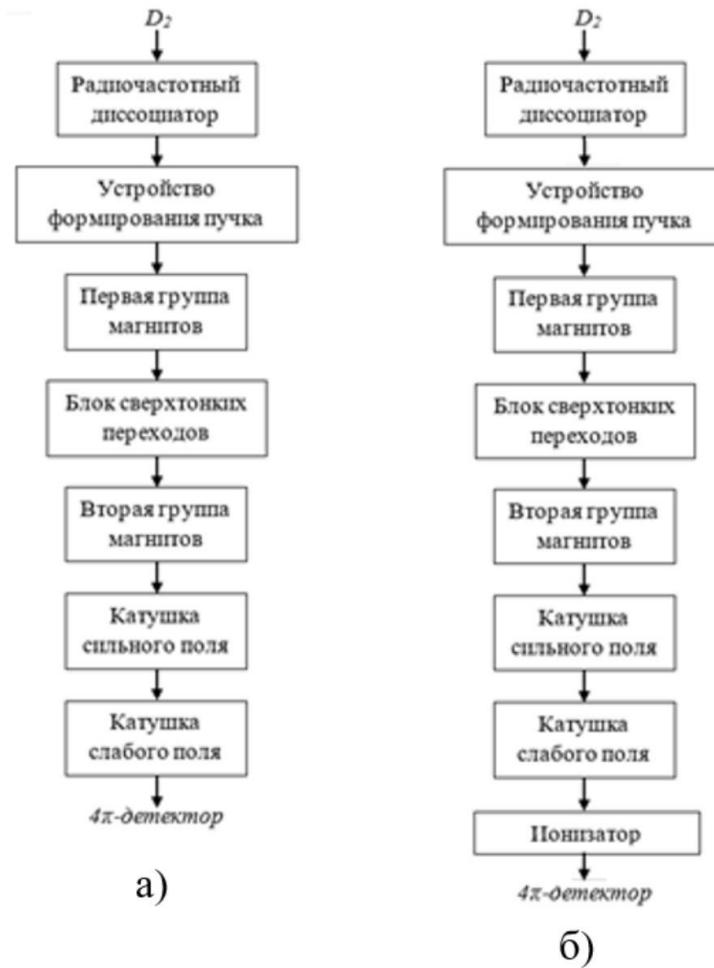
-2/3	0
0	+1
-1/3	+1
-1	+1
$\pm 1/2$	-1/2

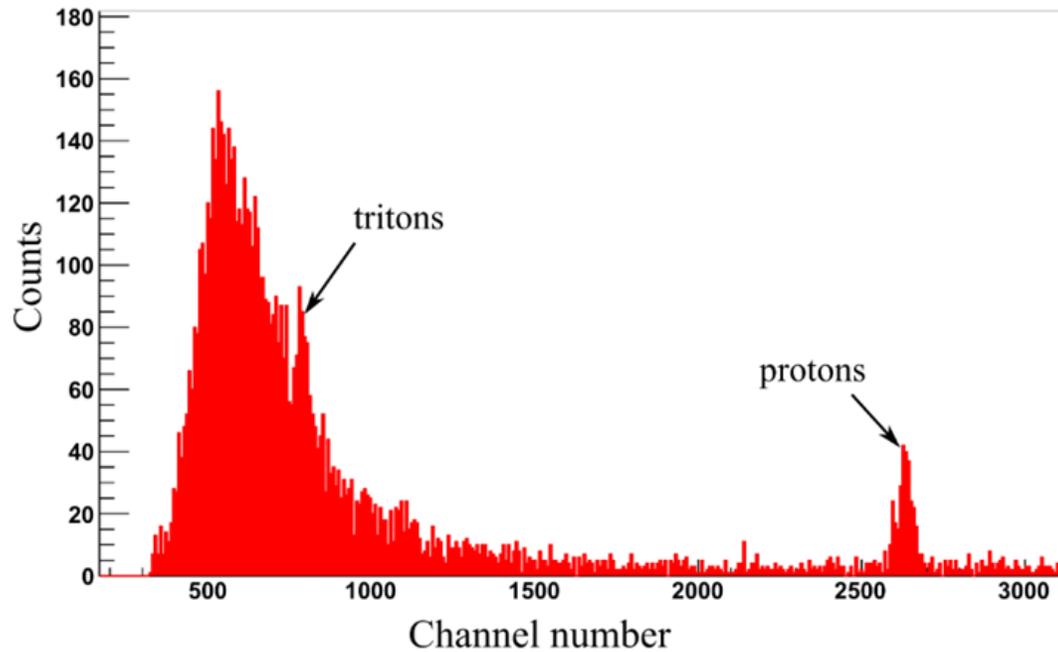


атомный пучок $d_{\text{nozzle}} = 2 \text{ мм}$
 \vec{D} , 0.01 эВ $T_{\text{nozzle}} = 65\text{-}85 \text{ К}$
 $4 \cdot 10^{16}$ атомов/с $\text{RF}_{\text{power}} = 300 \text{ Вт}$

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 (D₂O) 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.



Сечение реакции

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

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

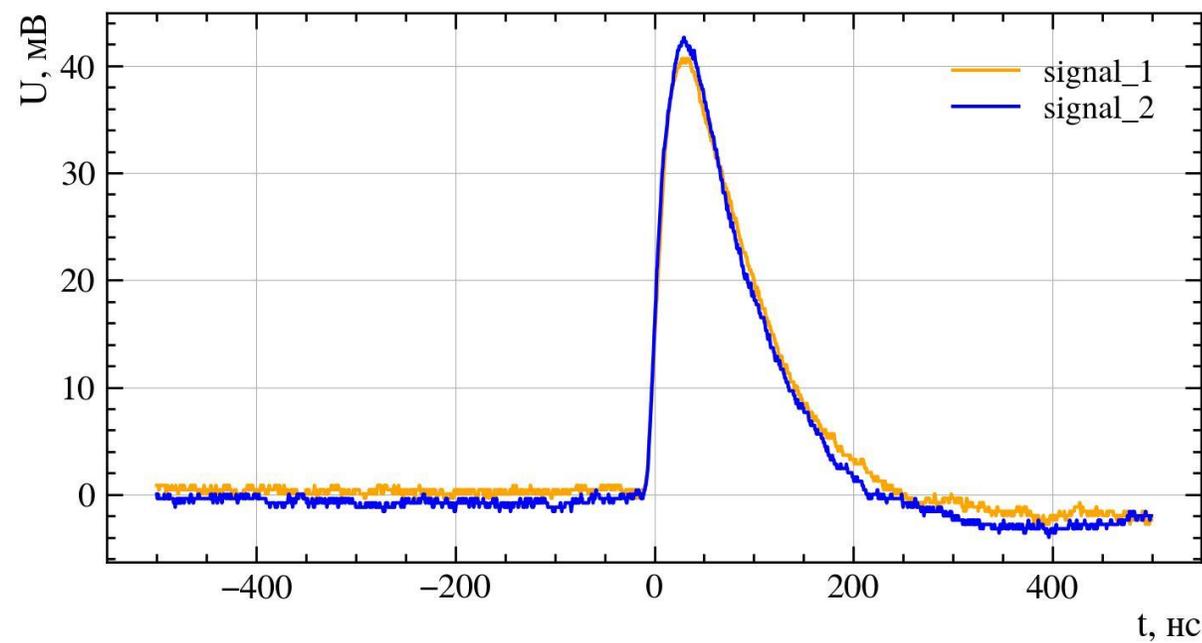
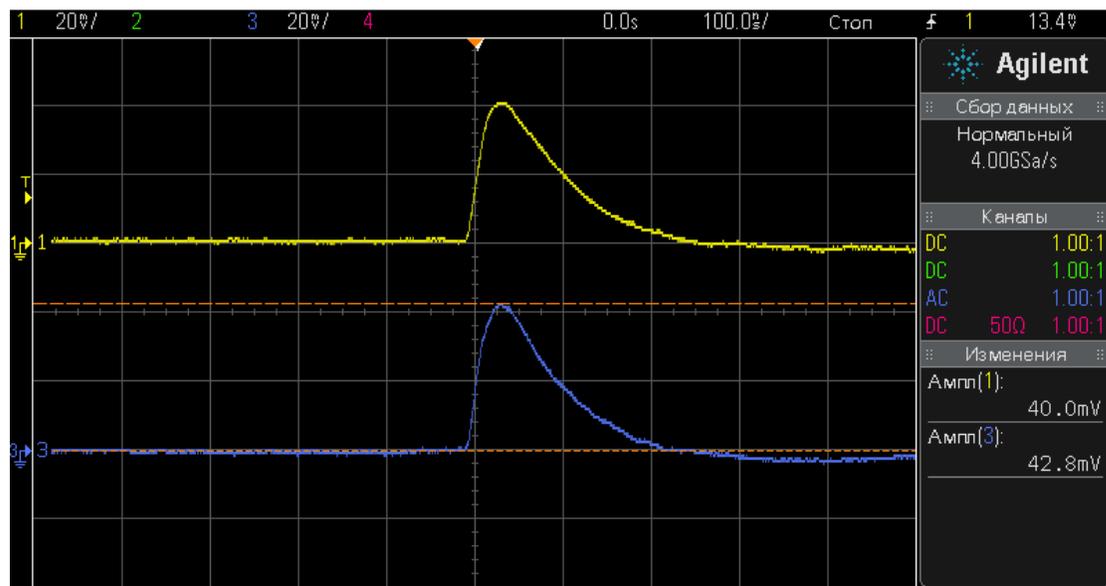
$$\sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \left\{ 1 + \frac{3}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] + \frac{9}{4} C_{z,z}(\Theta)p_zq_z + \frac{1}{4} C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz} \right\}$$

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

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



Регистрация космического излучения

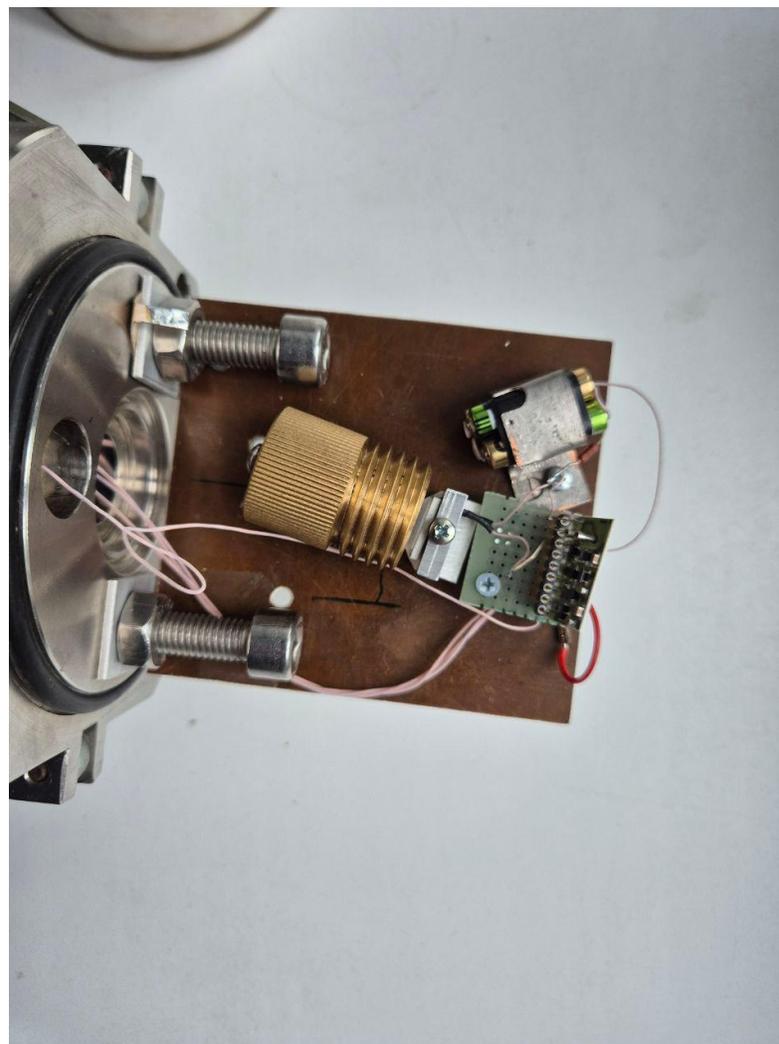
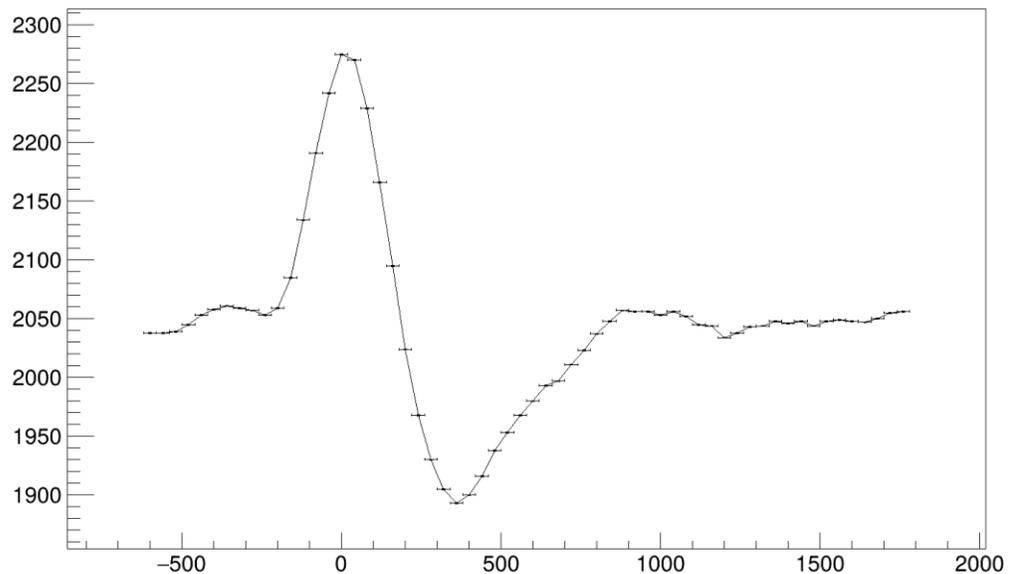


	Количество событий	Экспозиция	Скорость счета	Скорость счета (ожидаемая)	Эффективность регистрации
Вертикальная пластина	1000	641	1.56 мюонов/с	4.6 мюонов/с	33.9 %
Горизонтальная пластина	1000	526	1.9 мюонов/с	6.6 мюонов/с	28.8 %



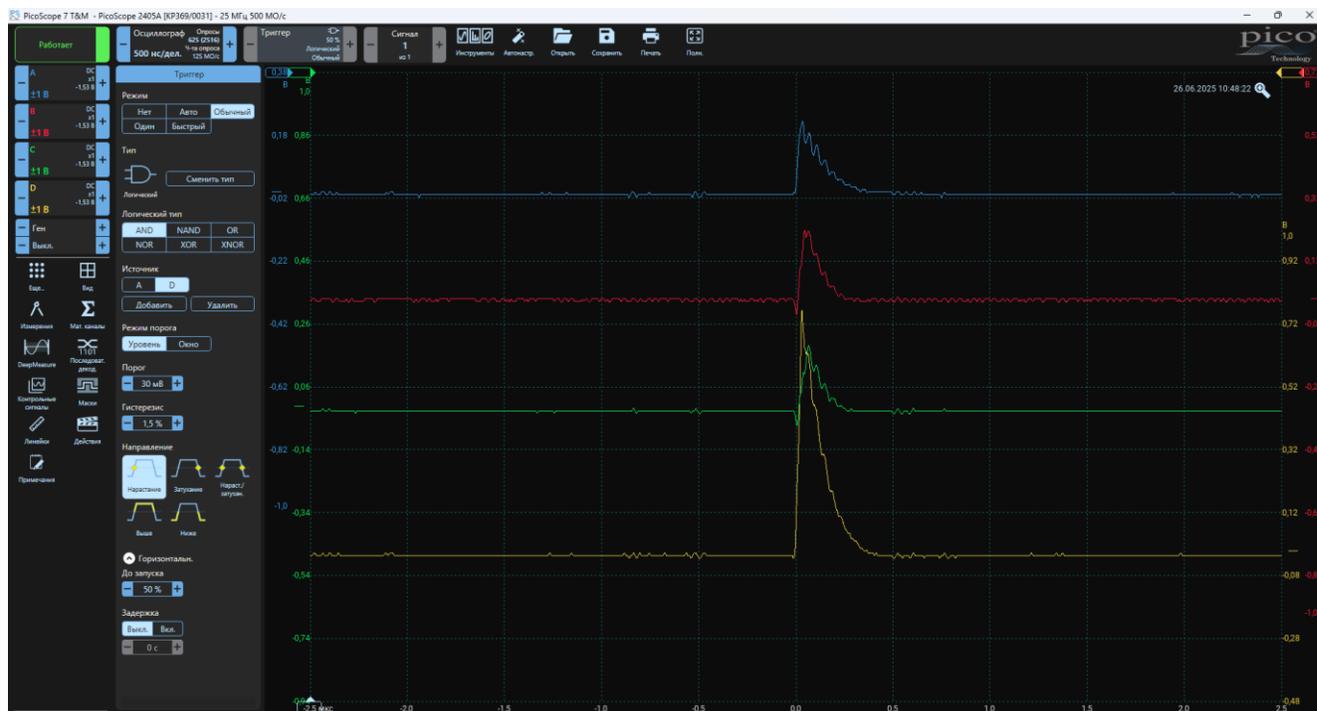
Регистрация космического излучения

C00CH01 t=15.15s min=1892.8[24] max=2277.6[15] q=5





Регистрация космического излучения



PicoScope Spectrum from 20250626_0943.txt

