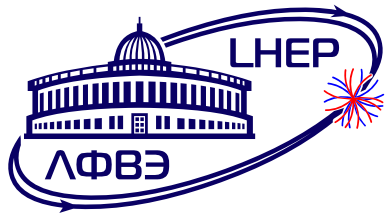


LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»



Исследование однородности пластиковых сцинтилляторов прототипа детектора локальной поляриметрии Beam-Beam Counter для эксперимента SPD с помощью сканирования рентгеновским пучком

А. М. Захаров*
НИЯУ МИФИ
Коллаборация SPD

01.07.25
Санкт-Петербург

*amzakharov1@mephi.ru

Spin Physics Detector (SPD) - эксперимент на коллайдере NICA (ОИЯИ, Дубна), предназначенный для изучения **спиновой структуры протона и дейтрона** и других спиновых явлений, используя уникальную возможность работы с **поляризованными пучками** протонов и дейтронов при энергии столкновений до 27 ГэВ и светимости до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

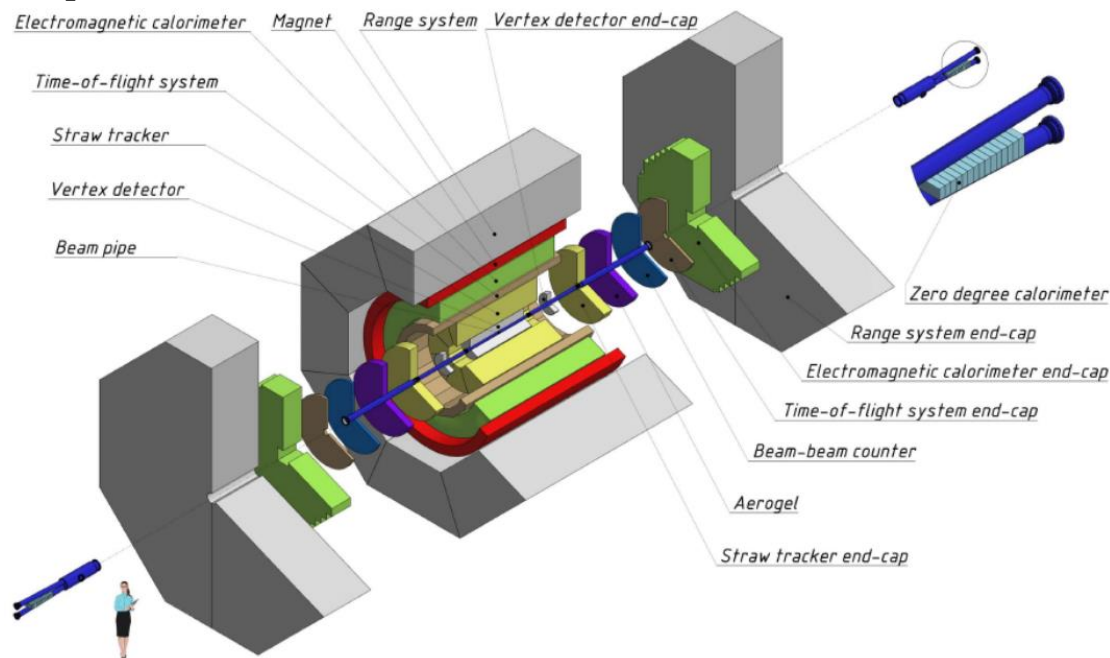


Рис. 1 – Схема SPD

В поляризованных протон-протонных столкновениях данный эксперимент **покроет кинематический разрыв** между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE, и высокоэнергетическими измерениями, полученными на БАК

Два торцевых детекторных колеса сцинтилляционных счетчиков пучковых столкновений **Beam-Beam Counters (BBCs)** планируется установить перед TOF системой установки SPD **симметрично относительно точки взаимодействия**.

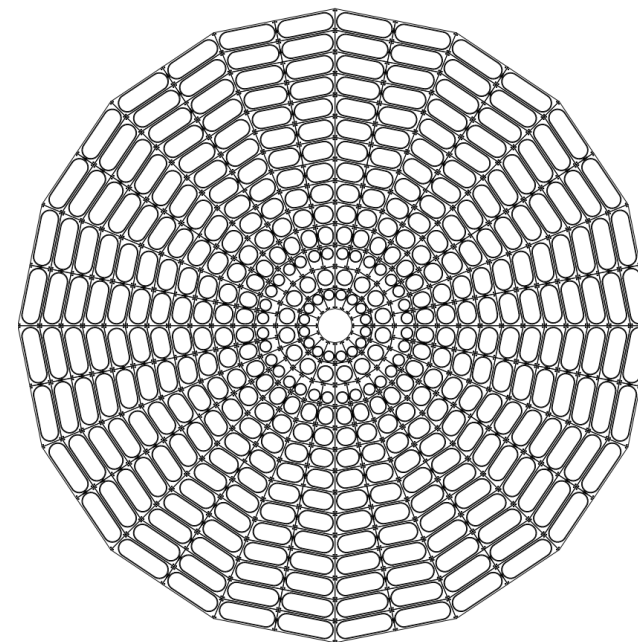


Рис. 2 – Схема BBCs

Основными задачами Beam-Beam Counters являются:

- **Локальная поляриметрия** в SPD, основанная на измерениях азимутальных асимметрий поляризованных протонных пучков;
- Мониторинг столкновений пучков;

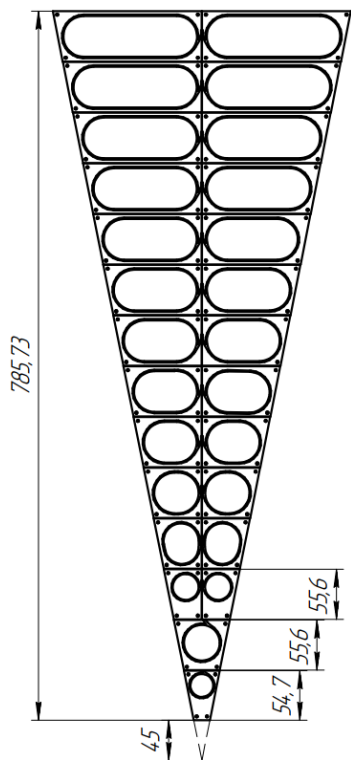


Рис. 3 – Сектор BBCs

- SPD BBC будет состоять из **16 секторов с 26 тайлами в каждом секторе в одном колесе**. Каждый тайл представляет собой отдельный источник сигнала, считывающийся с помощью кремниевого фотоумножителя (SiPM), подведенного к торцу WLS оптоволоконна.
- Одной из возможных опций FEE может быть используемая в данной работе система считывания **CAEN FERS-5200**, разработанная специально для больших массивов детекторов.



В работе используем:

- Матированное покрытие
- Saint-Gobain Crystals BCF92 WLS волокно
- Оптические клеи СКТН Б, Е, ОК-72
- SiPM Onsemi FC30035



Рис. 4 – Принципиальная схема детектора BBC

Экспериментальная установка

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

Координатный столик на основе рентгеновской трубки включает в себя:

- **AMPTEK Mini-X X-ray tube**
Ag мишень, 50 kV / 75 μ A, 2 мм коллиматор (5° X-ray конус) на высоте ~ 3.5 мм от тайла
- **NEMA 17 шаговый двигатель**
Угловой шаг 1.8°, около 20 мкм разрешение (X и Y оси, механическое)
- **Arduino and CNC Shield**
Микроконтроллерная плата для автоматизации движения
- **CAEN DT5202**
Источник питания A7585D с разрешением 1 мкА
- **Свинцовая защита**
- **Светоизолирующий корпус**

Рис. 5 – Спектр Mini-X X-Ray

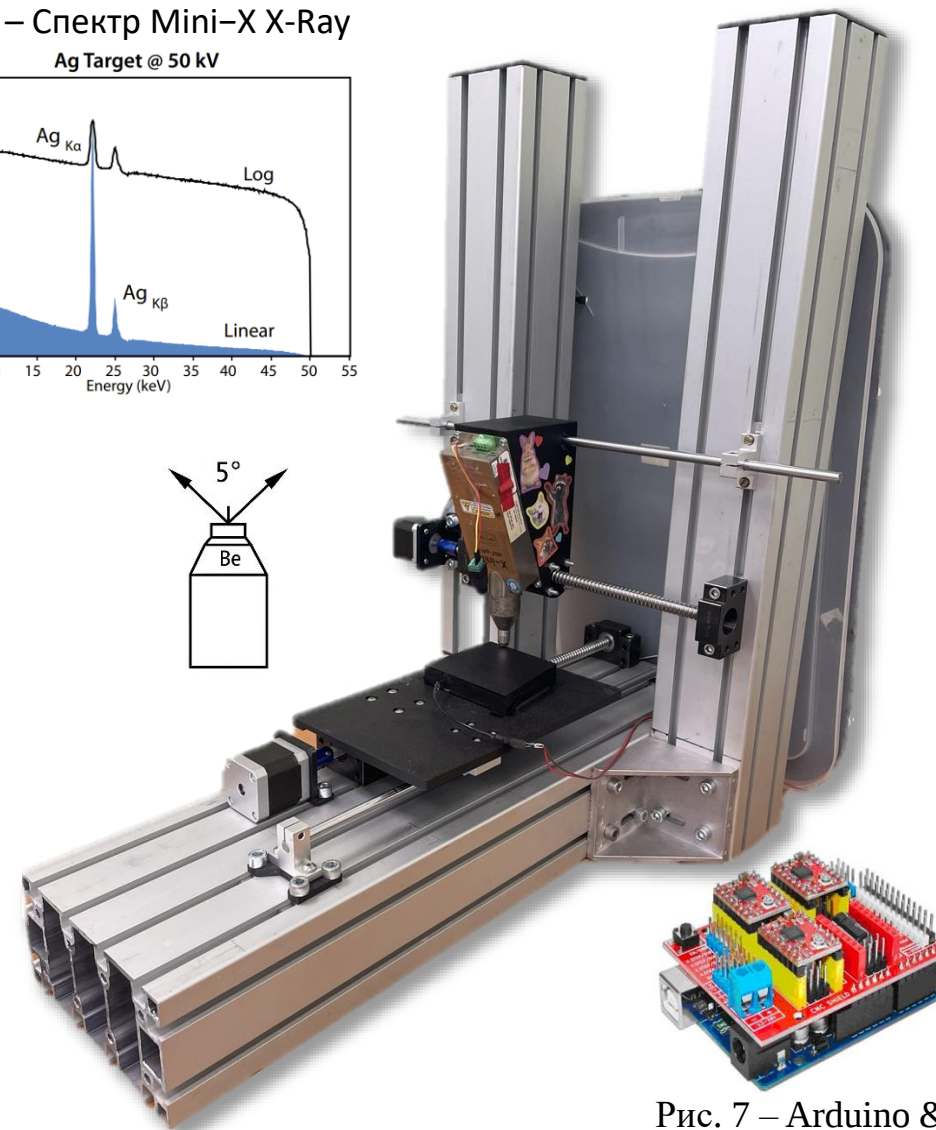
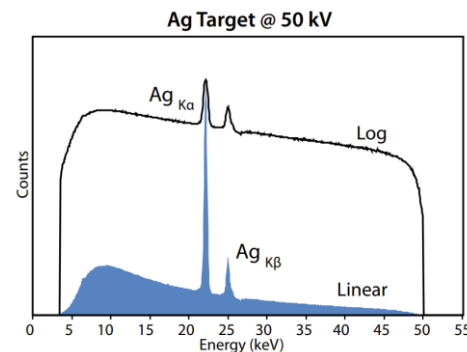


Рис. 7 – Arduino & CNC shield

Рис. 6 – Экспериментальная установка

Метод 1: Полная «тепловая карта»

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

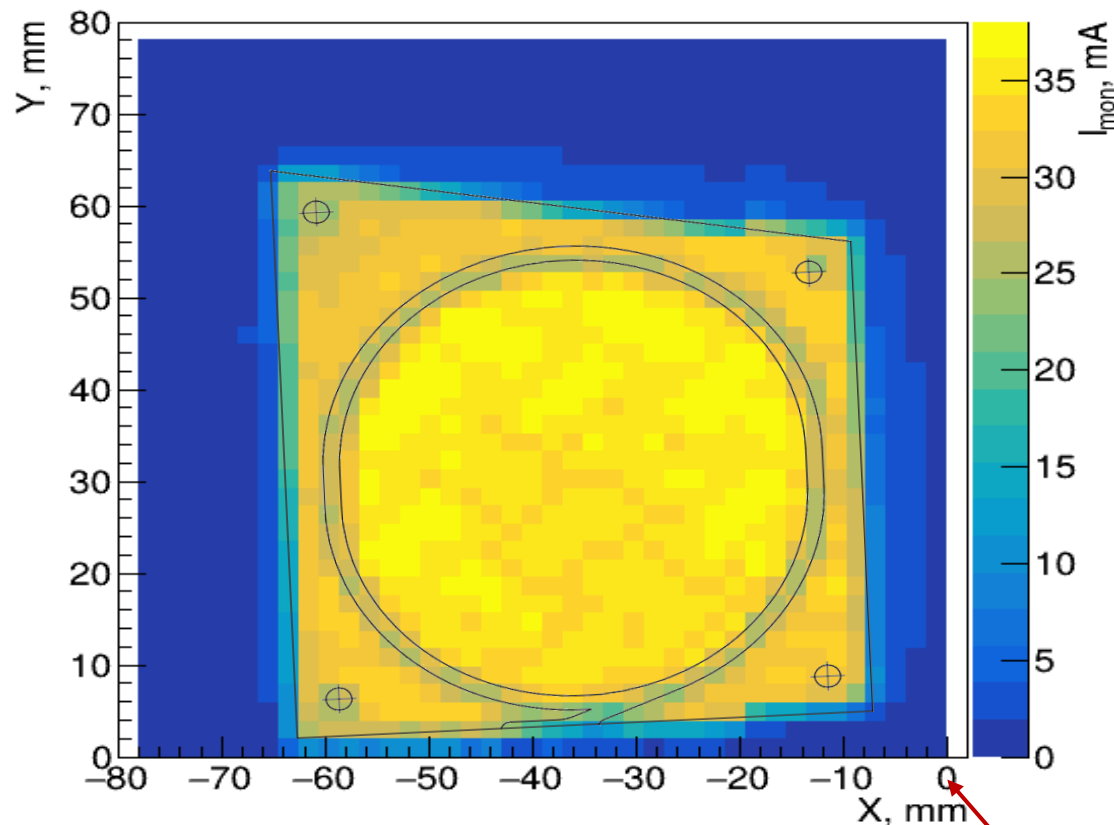
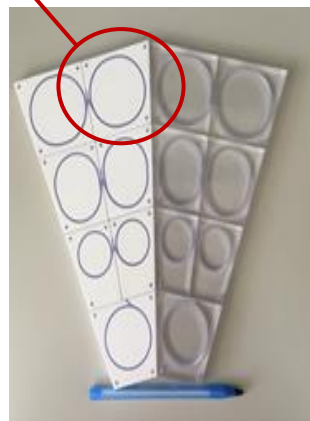


Рис. 8 – Зависимость тока кремниевого фотоумножителя от положения рентгеновской трубки

Ряд
3 (L;R)
2 (L;R)
1 (L;R)
центральный



- Отчетливо видна область пониженного отклика детектора, соответствующая области пролегания оптоволокон (до 50% потерь)
- Область пролегания волокна делит сцинтиллятор на две части: зоны максимального и слегка пониженного отклика
- Внешняя часть сцинтиллятора позволяет собирать до 85% от максимального отклика
- Методика потенциально позволит оценивать факт непригодности сцинтилляторов для прототипа и детектора
- Снятие сигнала со всего объема сцинтиллятора неэффективно с точки зрения время затраты – необходима оптимизация

Метод 1: Механические дефекты

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

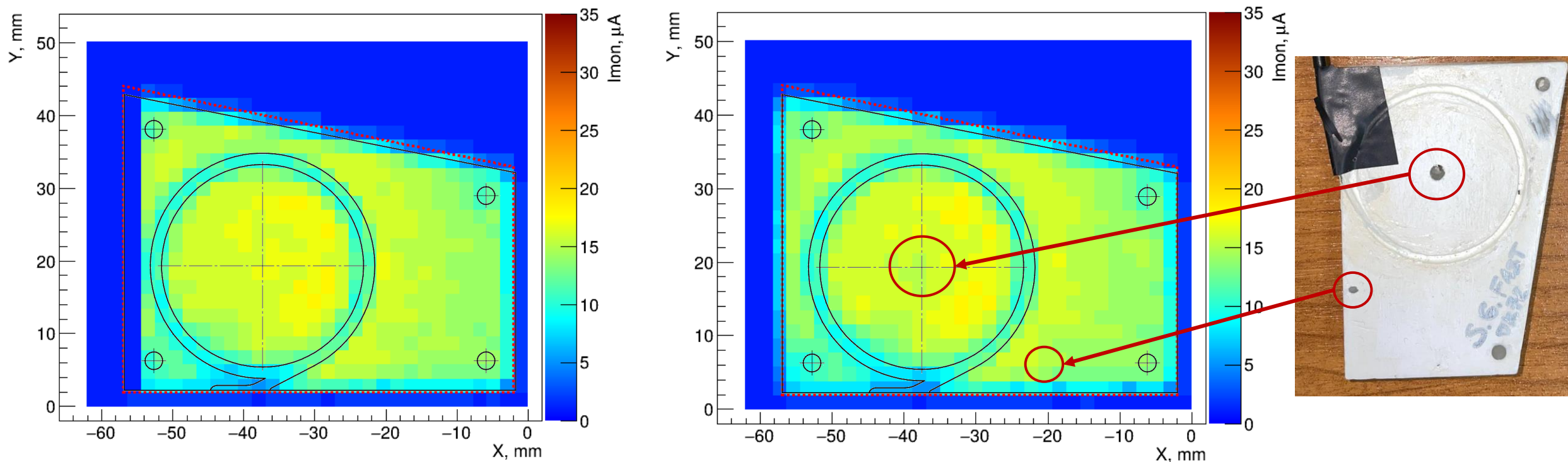


Рис. 9 – Сравнение откликов до и после нанесения механических дефектов (ОК-72)

- Тепловая карта отклика была получена с использованием ранее изготовленных образцов ряда 2, склеенных оптическим клеем ОК-72
- Отклик детектора измерялся до и после нанесения дефектов, которые включали два отверстия диаметром приблизительно 2,5 и 1 мм и примерной глубиной в половину толщины сцинтиллятора (5 мм)
- Едва заметная разница картины указывает на необходимость дальнейшего исследования

Метод 1: Механические дефекты

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

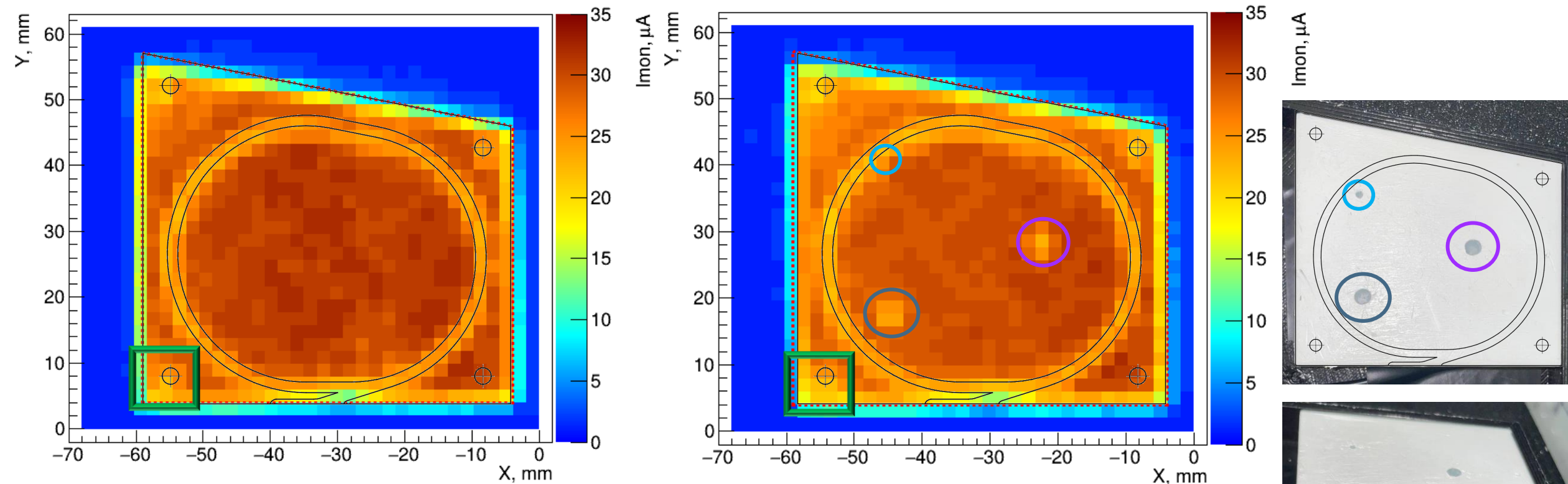


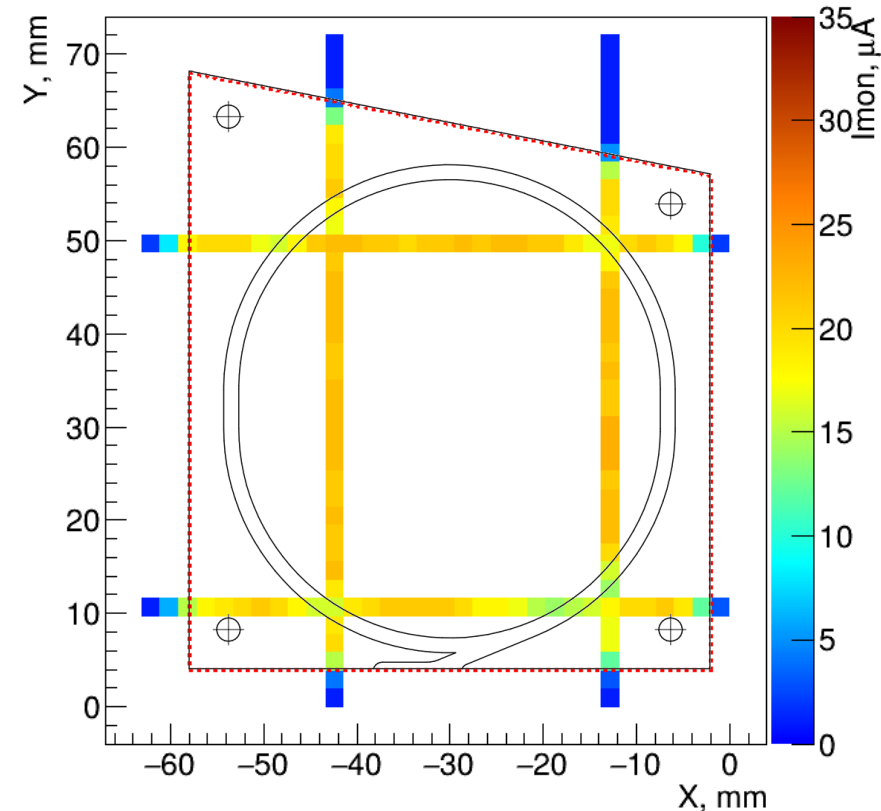
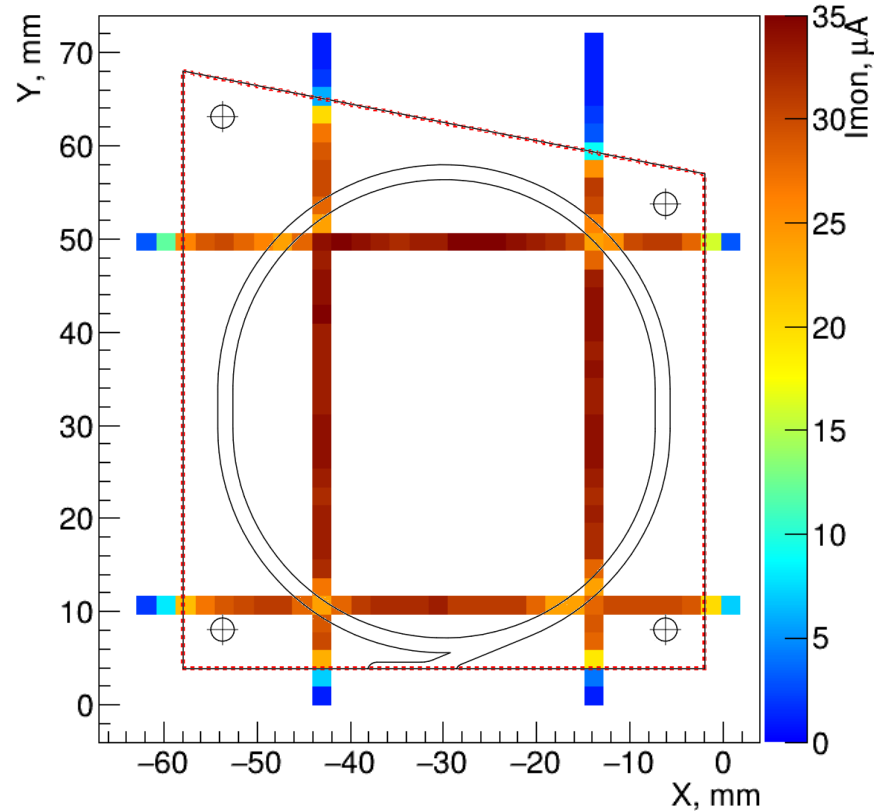
Рис. 10 – Сравнение откликов до и после нанесения механических дефектов (СКТН Е)

- Отклик детектора также измерялся до и после нанесения дефектов (три отверстия диаметром 3 мм и одно отверстие 1 мм при одинаковой глубине 5 мм)
- Средний отклик с центральной части - 30.6 vs 29.6 μA - при разрешении источника питания 1 μA
- Источник питания А7585D позволяет однозначно устанавливать факт наличия или отсутствия только крупных дефектов

Метод 2: Производственные дефекты

СКТН МЕД
Б

Средний
отклик:
32.8 μA



Без клея

Средний
отклик:
21.2 μA

Рис. 11 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (отсутствие клея)

- Тепловые карты отклика были собраны для двух образцов: с оптическим клеем СКТН Б (32.8 μA) и без него (21.2 μA) – средний отклик в центральной области сцинтиллятора отличается на 35%. В случае аномального радиационного повреждения детектора он по-прежнему будет выполнять свои функции.
- Первоначальный метод информативен и точен, однако снятие полной карты занимает слишком много времени
- Был предложен более быстрый, но менее подробный метод на основе сетки (на этапе разработки)

Метод 2: Производственные дефекты

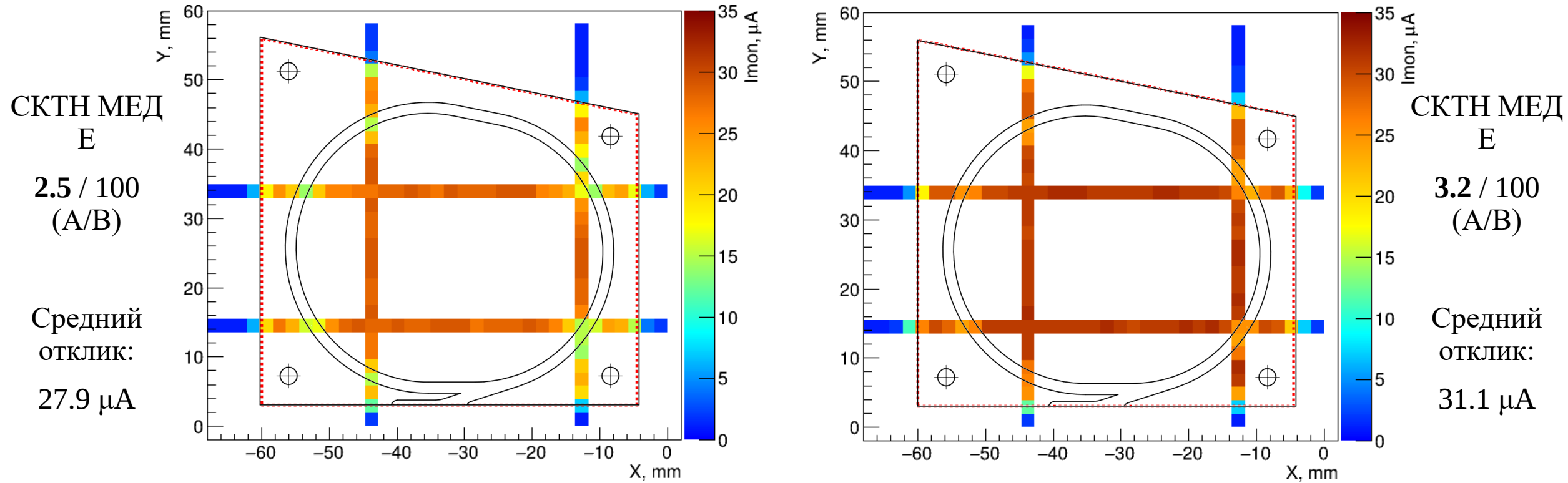


Рис. 12 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (разные концентрации клея)

- Тепловые карты отклика были собраны для двух сцинтилляторов с разными концентрациями двухкомпонентного оптического клея СКТН Е – средний отклик разнится на $11 \pm 7\%$ (с учетом погрешности)
- Согласно ранее проведенным измерениям на космическом излучении, разность положений среднего распределений составляет около 18%
- Методика может устанавливать факт критического нарушения концентрации клея в изготовленных образцах

Метод 2: Производственные дефекты

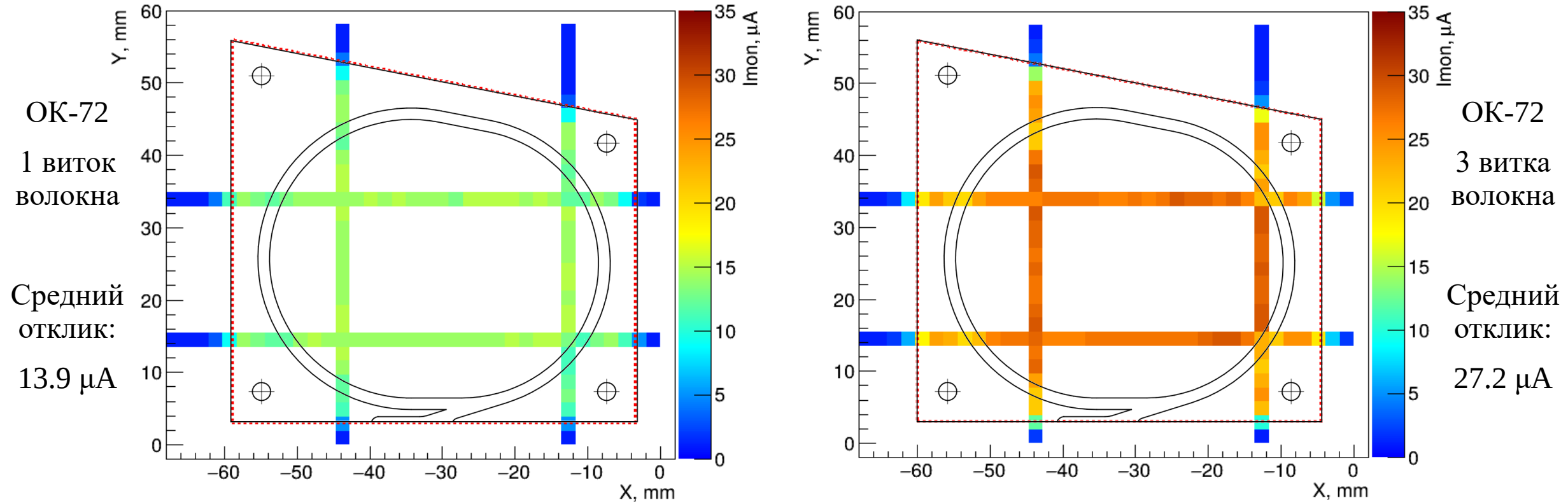


Рис. 13 – Сравнение откликов с тайлов с производственным дефектом (разное число витков волокна)

- Зависимость отклика от положения трубки также была построена для двух сцинтилляторов с разным числом витков оптоволокна – средний отклик детектора с 1 витком на 50% ниже, чем в случае 3 витков.
- Согласно ранее проведенным измерениям на космическом излучении, разность положений среднего распределений составляла от 40% до 70%
- Методика может устанавливать факт неверного числа витков волокна в изготовленных образцах

В рамках данной работы была разработана и апробирована методика оценки пространственной однородности пластиковых сцинтилляторов для прототипа Beam-Beam Counter детектора SPD с использованием рентгеновского пучка.

- Полученные тепловые карты отклика позволили выявить чувствительность к различным видам дефектов — как механическим, так и производственным, включая отсутствие клея, отклонение от его документальной концентрации и неверное число витков спектросмещающего волокна. Было показано, что изменения средней амплитуды сигнала могут достигать 35–50% в зависимости от качества сборки и используемых материалов.
- Несмотря на высокую информативность полного сканирования, данный метод требует значительных временных затрат, что ограничивает его применимость на стадии массового прототипирования. В связи с этим предложен альтернативный подход на основе сеточного сканирования, обеспечивающий баланс между точностью и скоростью измерений.

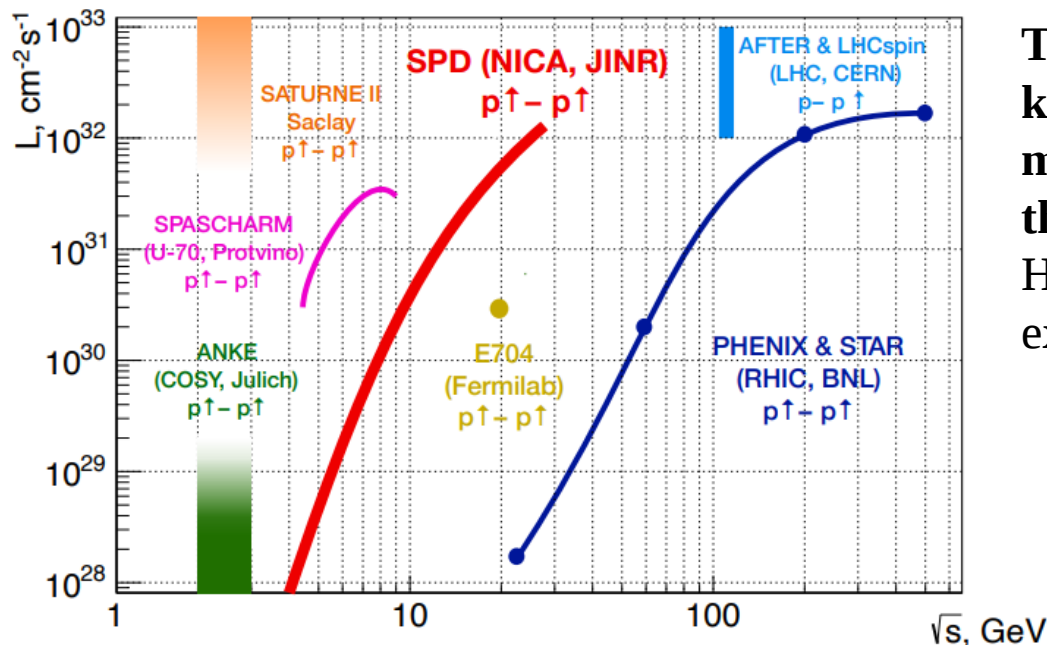
Разработанная методика может быть внедрена в процедуру входного контроля сцинтилляторов на этапе сборки ВВС и масштабирована для проверки целых секторов. В дальнейших исследованиях планируется расширение тестов на сектор и реализация автоматизированной системы анализа полученных тепловых карт.

Спасибо за внимание!

BACK UP

Physics behind the research

- According to astrophysical and cosmological data, about 5% of the mass of the Universe consists of **visible baryonic matter**, the properties of which are determined by strong and electromagnetic interactions. With respect to the two other components, dark matter and dark energy, baryonic matter **seems to be a well-studied subject**. In fact, despite the great advances in quantum chromodynamics made in describing the interaction of quarks and gluons, **the question of why nucleons are exactly like we see them, remains open**.
- **This spin is responsible for such fundamental properties of Nature** as the nucleon magnetic moment, different phases of matter at low temperatures, the properties of neutron stars, and the stability of the known Universe.
- **Since the famous "spin crisis"** that began in 1987, **the problem of the nucleon spin structure remains** one of the most intriguing puzzles in contemporary high-energy physics.



The SPD experiment at NICA will cover the kinematic gap between the low-energy measurements at ANKE-COSY and SATURNE and the high-energy measurements at the Relativistic Heavy Ion Collider, as well as the planned fixed-target experiments at the LHC

Fig. 5. NICA SPD and the other past, present, and future experiments with polarized protons

Methods and equipment

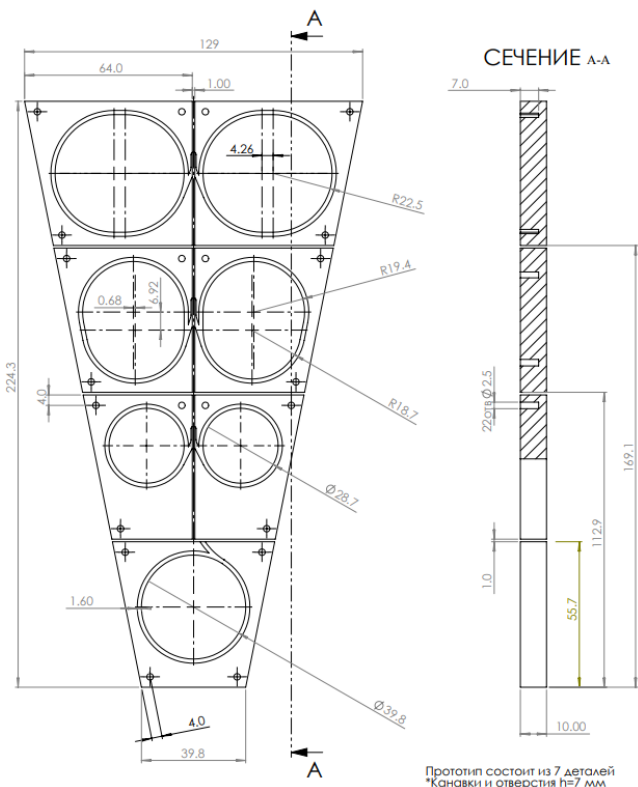


Fig. 10. Geometry of tiles, used in this work (3 rows & central tile). Similar to STAR EPD, but higher polar angle granularity

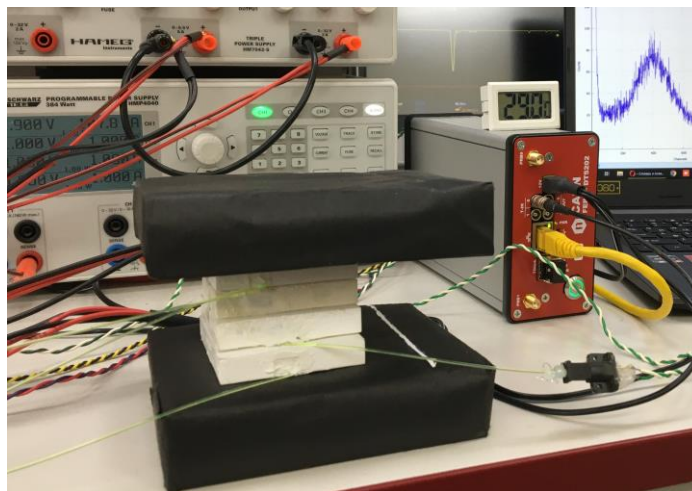


Fig. 11. Tile system with external trigger – two scintillators with PMTs readout, covered in black paper

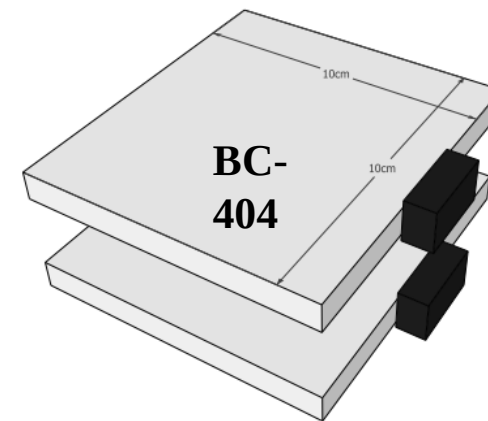


Fig. 12. Trigger time resolution ~ 650 ps

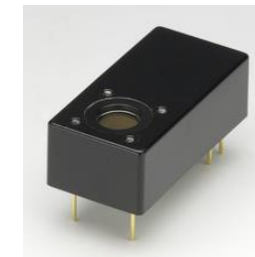


Fig. 13. PMT Hamamatsu H10720-110

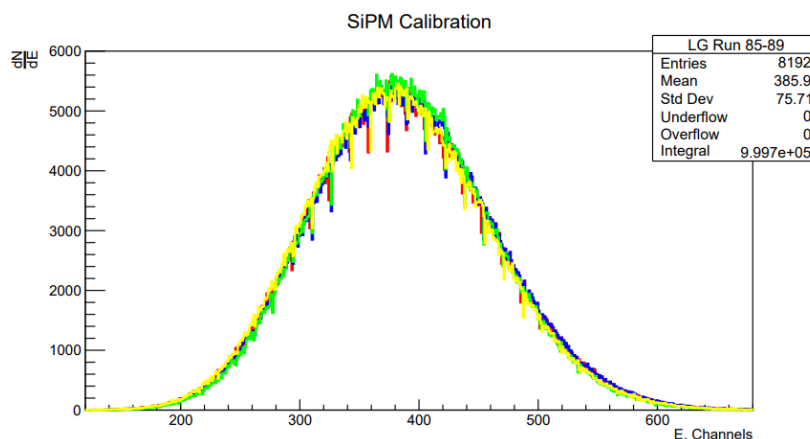


Fig. 14. 4 SiPM calibration

Although CAEN FERS-5200 has an internal coincidence circuit, an external trigger proved to be more efficient for measurements on cosmic rays. Internal CC is used for radioactive source measurements.

Convolution of Gaussian and Landau functions (langaus) used as fit function for resulting energy values

Material selection results

Scintillator cover - **Matted** VS Tyvek:

- Matted collects more light (approximately);
- Matted is more convenient for mass production;
- Chemically matted tiles are more resistant to outer interactions and could be easily repaired;
- Tiles are matted by the scintillator manufacturer (Uniplast Vladimir), which is also cheap.

Optical cement – **CKTN B**, E, OK-72:

- Viscosity of CKTN MED type B is reduced by 50 times in comparison with type E and relatively similar to the OK-72 – mass production convenience;
- CKTN B collects about the same number of photons as the E type, but significantly more than OK-72;
- According to data, CKTN series has a higher throughput to high-energy particles.

WLS fibers – SGC VS **Kuraray**:

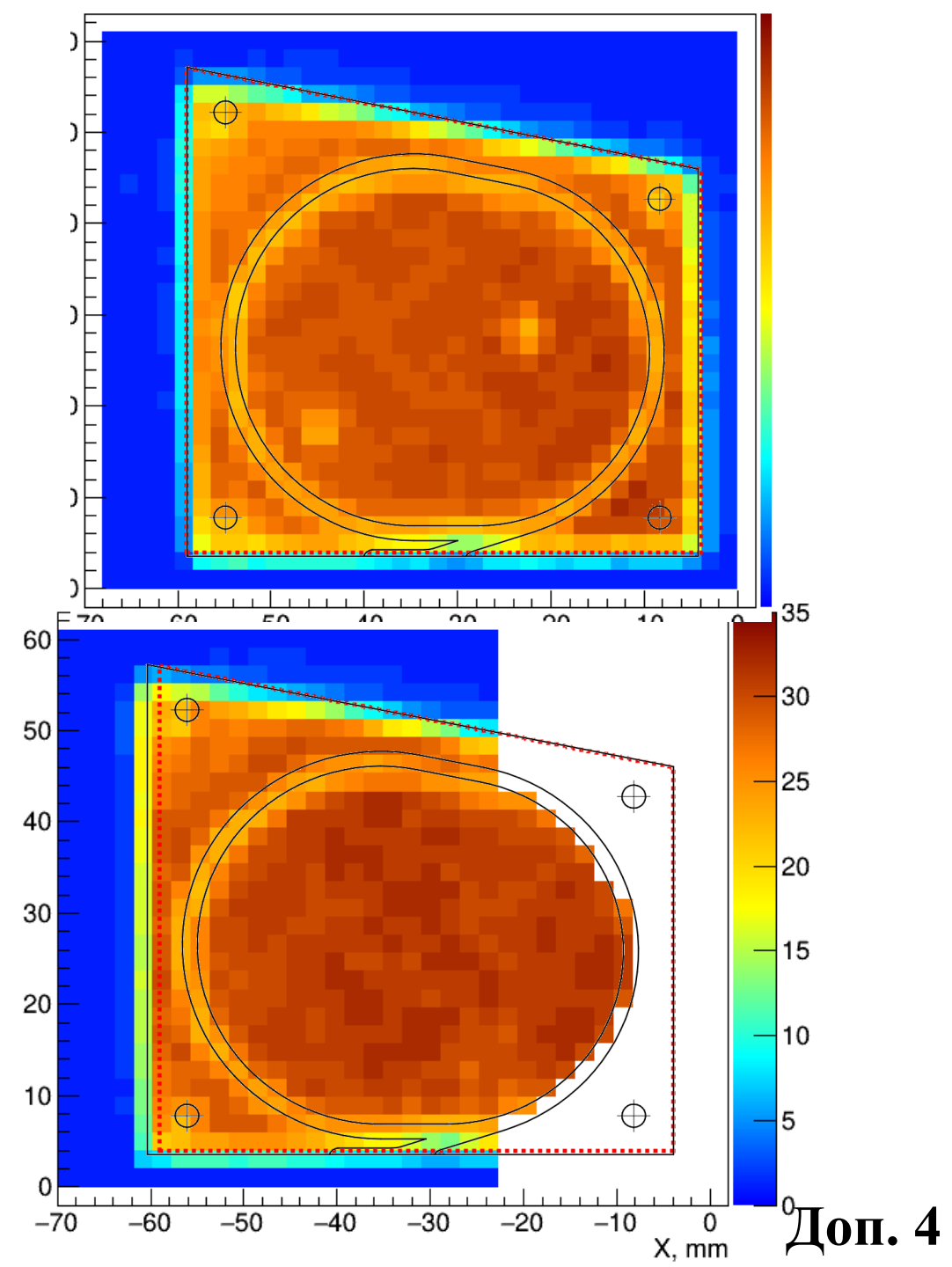
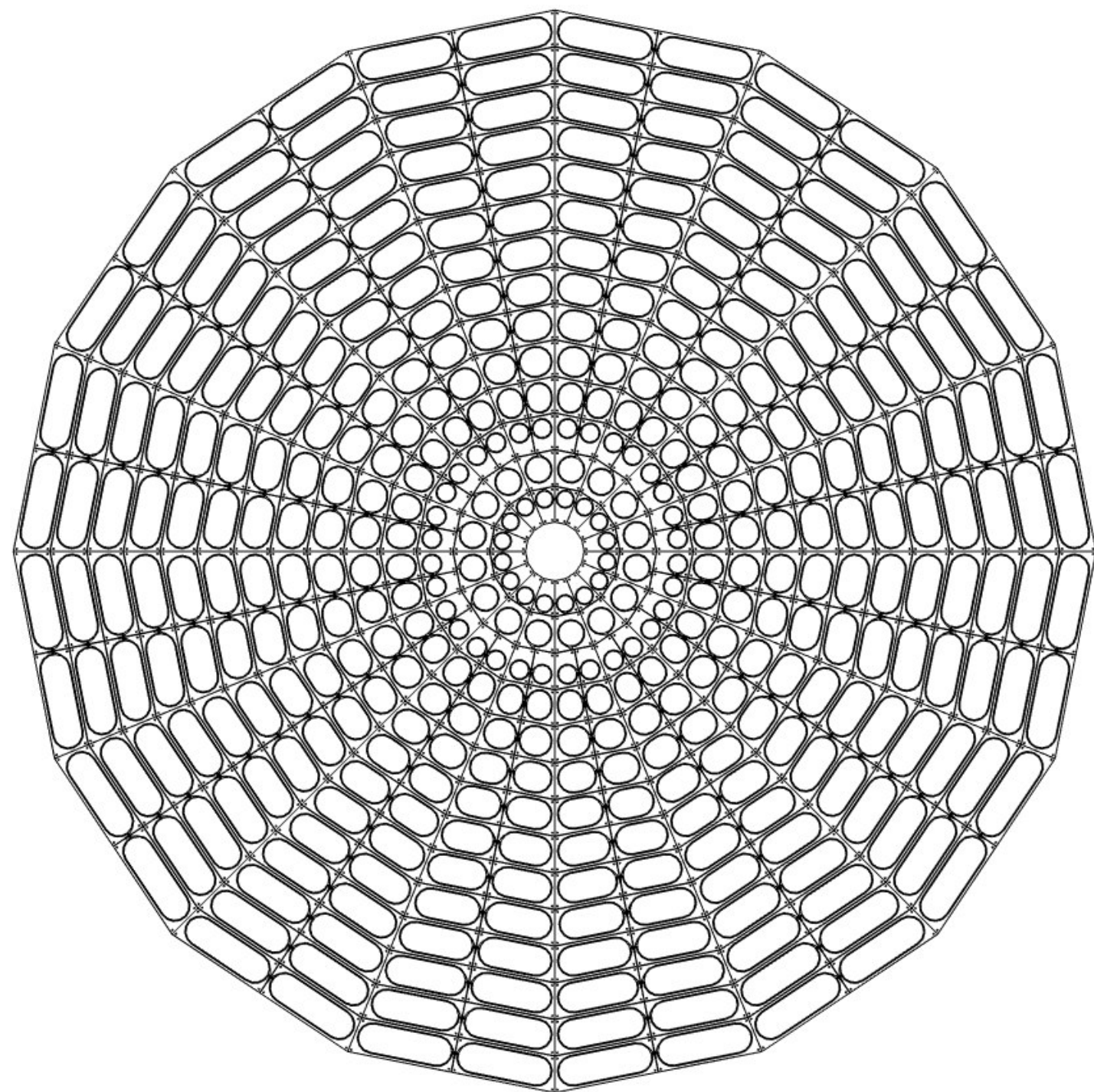
- According to experimental data, Kuraray Y-11 collects more photons than Saint-Gobain Crystal BCF92;
- Experiment was performed with the same conditions – same run, positioning, cosmic rays as the source, e.t.c

Fit Param-s	Row 1 Matted	Row 1 Tyvek	Row 3 Matted	Row 3 Tyvek
Mean, Channels	372.9	346.7	406.9	348.3
Width, Channels	28.5	30.0	30.3	27.5

Fit Params	CKTN MED E	CKTN MED B	OK-72
Mean, Channels	354.5	387.6	307.2
Width, Channels	262.2	299.9	249.5

Fit Params	BCF92	Y-11
Mean, Channels	387.6	599.2
Width, Channels	299.9	370.2

Tables 1, 2, 3, correspondingly: fit parameters for covers, optical cements and WLS fibers comparisons



$$\frac{\langle N_{cktn\ E} \rangle}{\langle N_{cktn\ B} \rangle} |cosmic = \frac{340.3}{378.4} = 0.899 \pm 0.018$$

$$\frac{\langle N_{cktn\ E} \rangle}{\langle N_{cktn\ B} \rangle} |XRay = \frac{31.1}{32.8} = 0.948 \pm 0.042$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\Delta I_E}{I_E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_B}{I_B}\right)^2$$

$$\frac{\Delta R}{0.948} = \sqrt{\left(\frac{1}{31.1}\right)^2 + \left(\frac{1}{32.8}\right)^2}$$

$$\frac{\Delta R}{0.948} \approx \sqrt{(0.03215)^2 + (0.03049)^2} \approx \sqrt{0.001034 + 0.000930} = \sqrt{0.001964} \approx 0.0443$$

$$\Delta R \approx 0.948 \cdot 0.0443 \approx 0.042$$

$$\frac{\langle N_{ok-72} \rangle}{\langle N_{cktn\ B} \rangle} |cosmic = \frac{263.7}{378.4} = 0.697 \pm 0.014$$

$$\frac{\langle N_{ok-72} \rangle}{\langle N_{cktn\ B} \rangle} |XRay = \frac{27.2}{32.8} = 0.829 \pm 0.040$$

Параметры фита	СКТН МЕД Е	СКТН МЕД Б	ОК-72
Среднее, каналы	340.3	378.4	263.7
Ширина, каналы	240.7	265.4	212.6