

Исследование радиационного старения SiPM в ИЯФ СО РАН

Бобровников В.С.

✉ v.s.bobrovnikov@inp.nsk.su

11/03/2026

Сессия–конференция СЯФ ОФН РАН



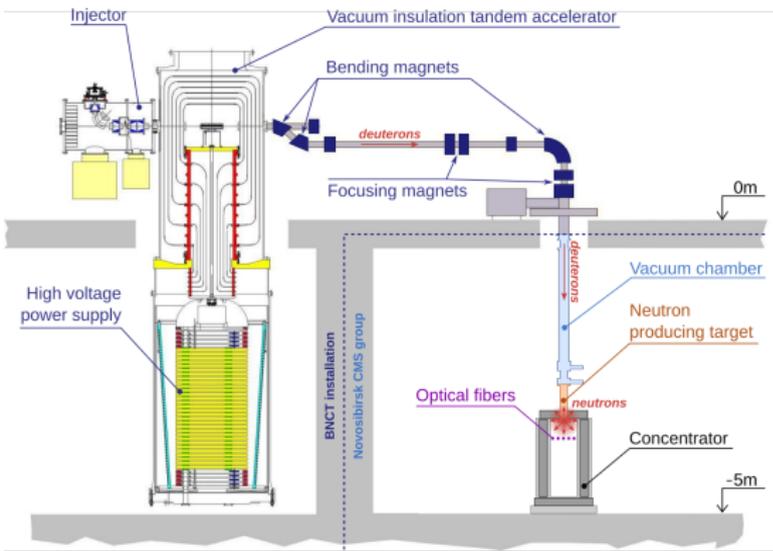
Содержание доклада

- 1 Введение
- 2 Прототип стенда
- 3 Первая версия стенда
- 4 Эксперимент в декабре 2025
- 5 Заключение и планы

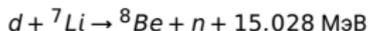
1. Введение



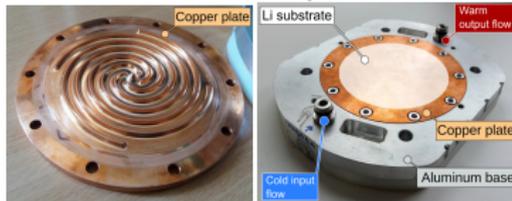
Схема установки



- В источнике отрицательных ионов (инжектор) водород заменяется на дейтерий
- Основные ядерные реакции при взаимодействии пучка дейтронов с литиевой подложкой



Мишенный узел



- внешний контур водяного охлаждения
- Li подложка: толщина 100 мкм, диаметр 90 мм
- внутри расположены 9 термо датчиков для определения положения пучка дейтронов

Свинцовый концентратор



- назначение – первый уровень защиты (генерация нейтронов происходит внутри) и повышение эффективности облучения (часть нейтронов отражается от стен)
- толщина свинца 100 мм (стены, дно и крышка)
- внутренние размеры 350 × 350 × 1000 мм



Прямое измерение нейтронного потока (неq/см²) невозможно по причине высокого уровня радиации ≈ 100 Зв/час – по крайней мере нам не известны приборы работающие в таких экстремальных условиях

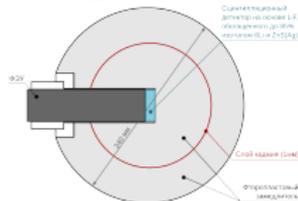


Пакет FLUKA для расчета нейтронного потока

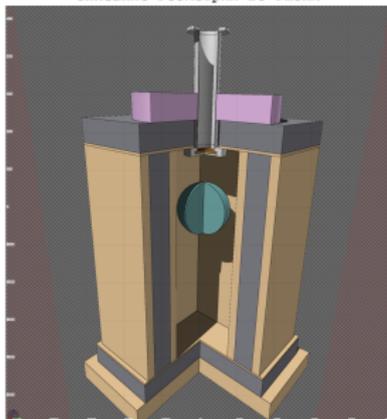
Экспериментальная верификация расчетов

- Устройство детектирования УДМН-100 размещалось внутри концентратора для измерения **мощности амбиентного эквивалента дозы** нейтронного излучения $H^*(10)$
- Эксперимент проводился с использованием малого тока пучка дейтронов ≈ 1 мкА по причине связанной с ограничением (насыщением) на максимальное значение измеряемой дозы УДМН-100, равной 0.1 Зв/ч (рабочий ток при генерации нейтронов больше на 3 порядка)

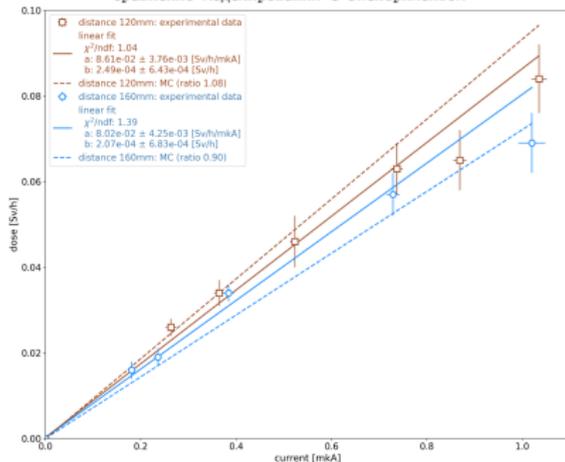
Вид и схема УДМН-100



Описание геометрии во FLUKA



Сравнение моделирования с экспериментом

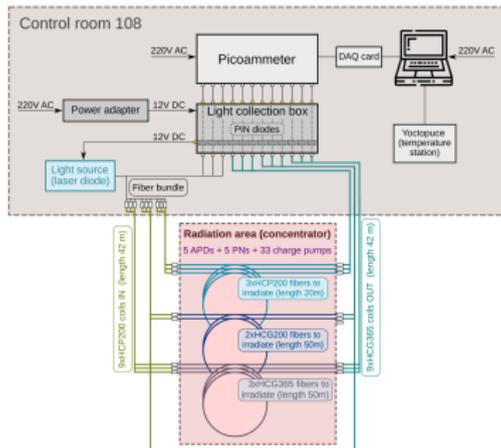


Отличие между экспериментальными данными и результатами моделирования составило 10%

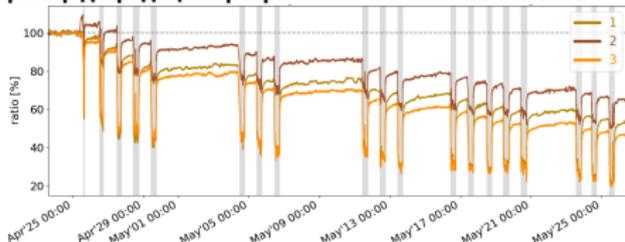


- В системе лазерной калибровки электромагнитного калориметра детектора CMS (CERN) используется оптическое волокно для доставки света в кристаллы и PIN диоды. Под действием облучения волокно теряет свою прозрачность, особенно сильно этот эффект проявляется в области близкой к месту встречи
- Новосибирская группа (НГУ ↔ Лаборатория физики адронных взаимодействий) являлась членом международной коллаборации CMS, поэтому, было решено попробовать провести эксперимент в ИЯФ СО РАН

Схема эксперимента



Пример деградации прозрачности НСР200–20 волокна



- Продолжительность эксперимента 18 дневных смен
- Параметры пучка дейтронов: $E_d = 1.5$ МэВ & $I_d = 1.0$ МА
- Измеренная деградация прозрачности составила от 20% до 35% (на всей длине волокна)
- Такое падение амплитуды может быть восстановлено путем простого увеличения величины калибровочного сигнала. Это вполне успокоило группу калибровки детектора CMS, поскольку подобный уровень дозы по их оценкам будет набран на LHC в течении 3 – 5 лет

В свою очередь это был наш первый эксперимент на БНЗТ, давший нам два основных результата

- БНЗТ обеспечивает набор дозы на уровне 10^{14} neq/cm² (в случае непрерывной генерации время составит 110 часов), что вполне достаточно для проведения исследования радиационного старения материалов в ИЯФ СО РАН
- Уникальность проведения подобного рода экспериментов у нас состоит, в отличие от облучения на реакторах, в сравнительно точном контроле набираемой дозы с возможностью одновременного измерения параметров исследуемых объектов
- В 2023 году появилось предложение создать стенд для исследования радиационного старения SiPMs

2. Прототип стенда



Прототип стенда

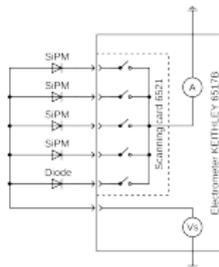
Реализован в 2024: состоит из климатической камеры, системы распределения света и ССД

Общий вид прототипа в лаборатории



ССД выполнена на базе электрометра Keithley 6517B

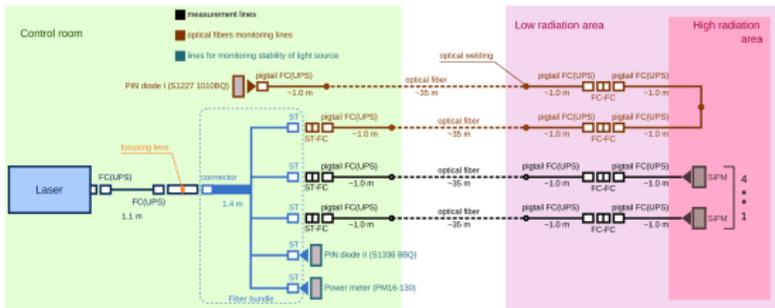
- Карта сканирования (модель 6521) обеспечивает измерение 10 каналов
- Управление через стандарт RS-232 (командный язык SCPI)
- SiPMs схема подключения ⇒



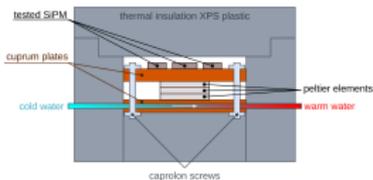
Использовались SiPMs производства Hamamatsu (2012), модернизация HCAL детектора CMS (phase I upgrade)

Система распределения света

- В качестве источника света постоянный лазер MCLS1 (ThorLabs)
 - гармоника $\lambda = 640$ нм
- 4 линии для исследования SiPMs
- 2 линии для контроля стабильности источника света
- 1 линия для оценки возможной деградации транспортного оптоволокна



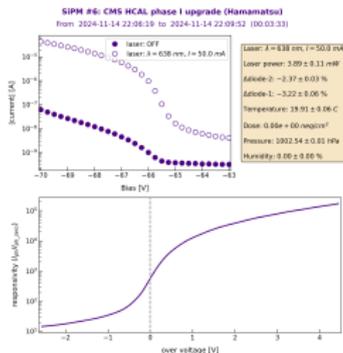
Климатическая камера



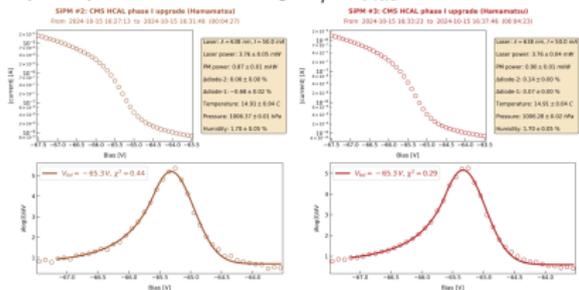
- В основе элемент Пельтье (с внешним контуром охлаждения) и нагреватели
- Алгоритм управления мощностью Пельтье и нагревателей "прошит" в электронике – быстрая реакция по обратной связи (термодатчик) на аппаратном уровне без необходимости внешнего программирования
- Точность установки температуры и дальнейшая стабильность ее поддержания составляет $\pm 0.06^\circ\text{C}$
- Достигнутый в текущей реализации диапазон температур от -10°C до $+55^\circ\text{C}$



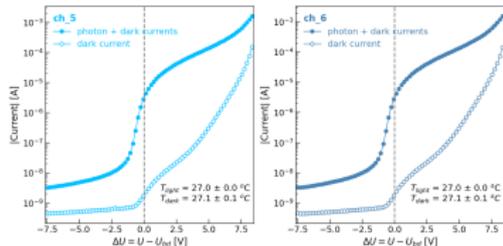
- 1 Линейность (фоточувствительность) \Leftrightarrow $I_{photo}/I_{photo,0}$, где:
 - I_{photo} – ток в лавинном режиме ($V_{bias} \geq V_{bd}$)
 - $I_{photo,0}$ – ток в диодном режиме ($V_{bias} \approx 0$)
 - где $I_{photo} = I_{light} - I_{dark}$



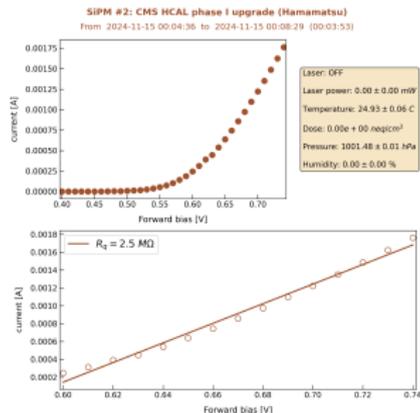
- 2 Напряжение пробоя $V_{bd} \Leftrightarrow$ положение пика характеристики $LD = \partial \log(I) / \partial V_{bias}$



- 3 Шум I_{dark} для одного значения $V_{bias} \Rightarrow$ точка
- 4 Шум I_{dark} в диапазоне напряжений $V_{bias} \Rightarrow$ кривая



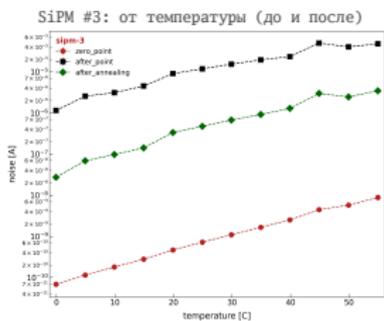
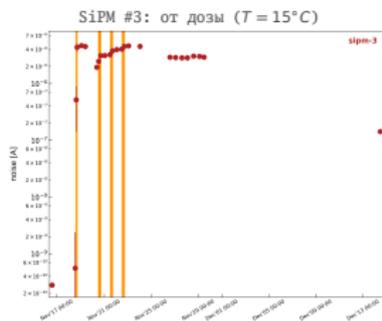
- 5 Сопротивление R_q ячейки SiPM на прямом напряжении \Leftrightarrow фит полиномом первой степени $\partial V_{bias} / \partial I_f \approx R_q / N_{cell}$ (N_{cell} – число ячеек)



Измерения температурной зависимости параметров



- Продолжительность 4 дневных смены, продолжительностью около 7 часов каждая. Интеграл дозы составил 7.40×10^8 neq/cm²
- В процессе облучения температура SiPMs была постоянной и равнялась 15°C (измерялся I_{dark} при $V_{bias} = V_{bd}$). В промежутках между генерацией нейтронов проводились измерения остальных параметров в диапазоне температур от 0°C до 55°C с шагом 5°C
- После облучения был выполнен отжиг SiPMs в печи с целью исследования возможности восстановления: продолжительность 6 суток при $T = 240^\circ\text{C}$

Темновой ток SiPM ($V_{bias} = V_{bd}$)

- Первый день, быстрый рост на 4 порядка: $3 \times 10^{-10} \Rightarrow 4 \times 10^{-6}$
 - Отжиг in situ (сутки, $T = 55^\circ\text{C}$), снижение в 4 раза: $4 \times 10^{-6} \Rightarrow 1 \times 10^{-6}$
 - Остальные 3 смены: плавный рост до 4×10^{-6}
 - Самовосстановление (3 суток), понижение в 2 раза: $4 \times 10^{-6} \Rightarrow 2 \times 10^{-6}$
 - Отжиг в печи, уменьшение в 20 раз: $2 \times 10^{-6} \Rightarrow 1 \times 10^{-7}$
- Основная цель – проверка работоспособности прототипа под потоком быстрых нейтронов
 - Подтверждена работоспособность прототипа (электроника климатической камеры и ССД) при радиационном облучении

Что необходимо переделать и учесть

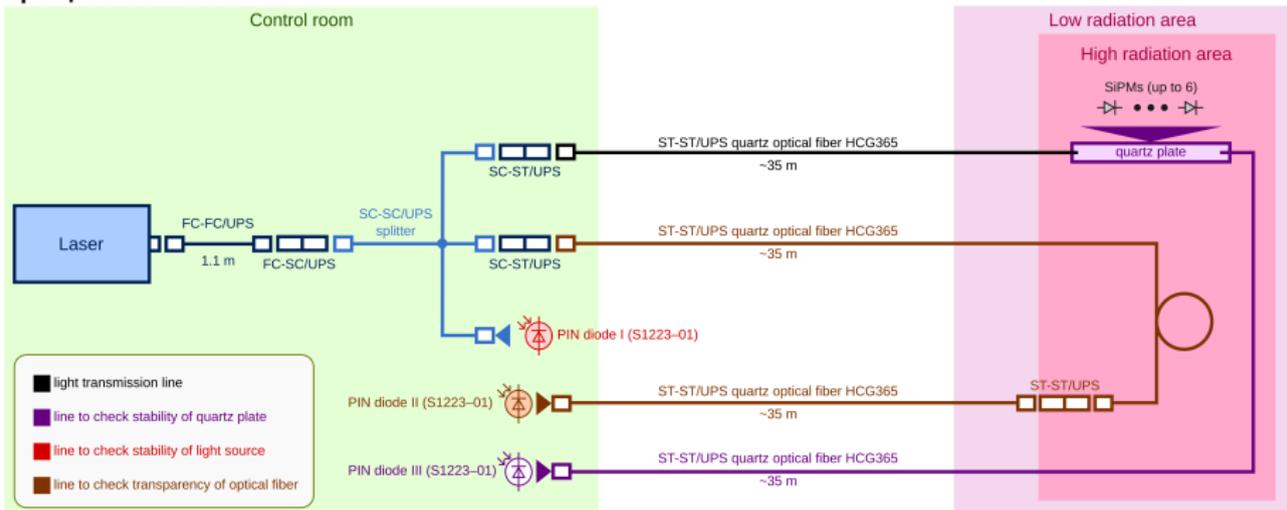
- Система распределения света нуждается в кардинальной переработке для обеспечения однородной интенсивности засветки SiPMs и стабильности при перемещении оборудования из лаборатории на БНЗТ
- Температурный диапазон климатической камеры нужно расширить, особенно в область отрицательных температур
- Начальный уровень дозы должен быть $\approx 10^7$ neq/cm² для обеспечения "мягкого" старта

3. Первая версия стенда



- Устойчивость частей системы к радиационному облучению
- Обеспечение однородности засветки исследуемых SiPMs на уровне несколько процентов
- Повторяемость уровня/интенсивности светового потока при работе со стендом в отлаочном режиме (зд.13) и при проведении облучения (зд.18)

Принципиальная схема



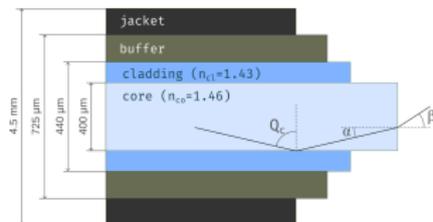
- Использование пластины из кварцевого стекла для обеспечения диффузной засветки SiPMs
- В качестве транспортного волокна – кварцевое оптическое волокно HCG365 имеющееся в необходимом количестве
- Контроль возможной деградации оптической прозрачности транспортного волокна и кварцевой пластины
- Дополнительный мониторинг стабильности источника света, помимо встроенного измерения мощности выходного излучения непосредственно в самом лазере (используется гармоника $\lambda = 638$ нм)



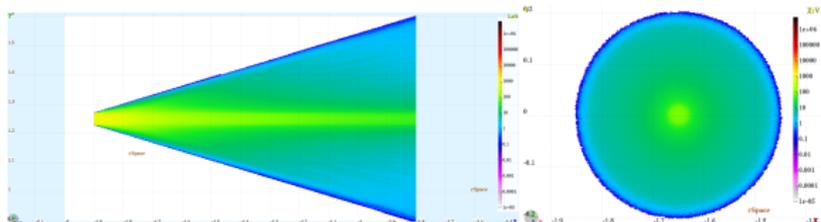
Система распределения света: выбор формы кварцевой пластины (FLUKA)

- Поскольку в настоящее время в пакете FLUKA отсутствует возможность определения источника первичных фотонов, был написан соответствующий генератор:
 - угол выхода фотонов с торца сердечника оптического кабеля β случайным образом распределяется в диапазоне $0 \div 17$ град
 - фотоны равномерно распределены по площади торца сердечника
 - энергия фотонов монохромна и соответствует $\lambda = 638$

Структура кабеля HCG365

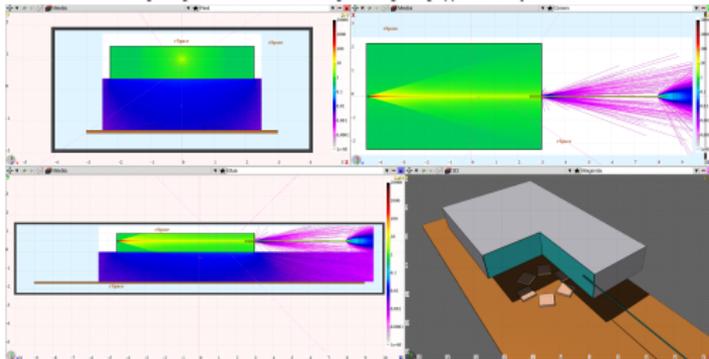


Реализация генератора, интенсивность: продольное и поперечное сечения

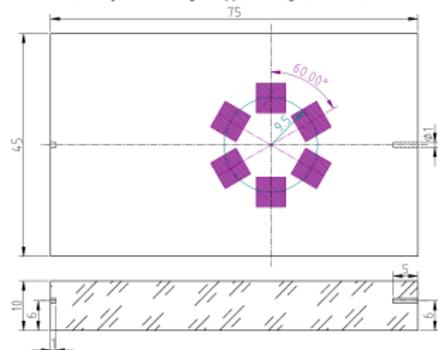


- В общей сложности было рассмотрено около 10 вариантов форм/размеров пластины и порядка 20 вариантов ввода света в нее (положение, угол)
- По итогу был выбран "классический" вариант – прямоугольной параллелепипед

Пример описания геометрии и распределение фотонов

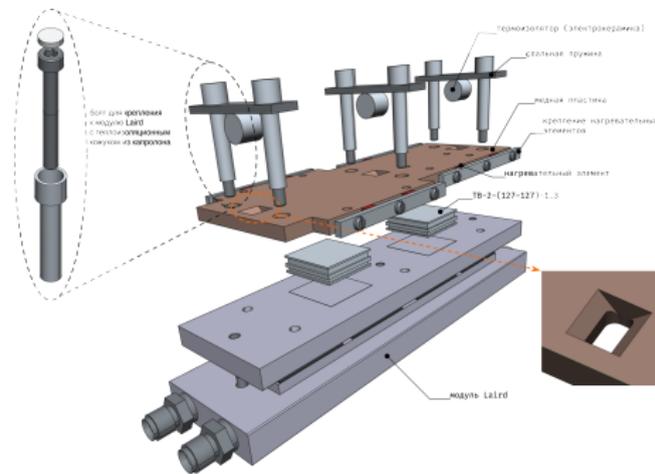


финальная форма и размеры пластины. Полученная неоднородность в числе фотонов прошедших через SiPMs 3%





- Состоит из двух каскадов
 - Первым является модуль производства компании Laird Technologies (Швеция): две пластины из сплава Al, между ними расположены 4 элемента Пельтье, нижняя пластина охлаждается внешним водяным контуром
 - В свою очередь два элемента Пельтье ТВ-2-(127-127)-1.3 образуют второй каскад, охлаждающий медную пластину с расположенными на ней исследуемыми SiPMs
- Для предотвращения возможных сколов ТВ-2-(127-127)-1.3 прижимное усилие выполняется по центру медной пластины с помощью втулок из электрокерамики ($\lambda = 0.8 \div 1.2 \text{ W/m/K}$) и стальных пружин. Втулки обеспечивают также дополнительную теплоизоляцию для развязки верхней пластины Laird с медной пластиной второго каскада



Расчет режима работы ТВ-2-(127-127)-1.3 (выбор напряжения: мощность, холодильный коэффициент)

- Расчет проводился с использованием ПО разработанного компанией KRYOTHERM, определялось тепловое сопротивление от элемента Пельтье до охлаждаемого объекта $R_c = d/\lambda$ [K/W], где: d [m] – толщина или длина, λ [W/m/K] – коэффициент теплопроводности материала

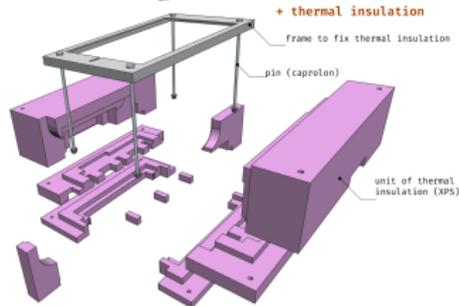
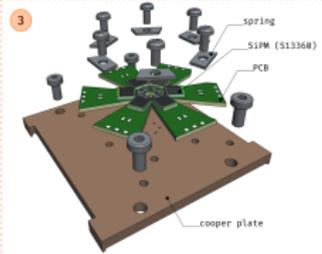
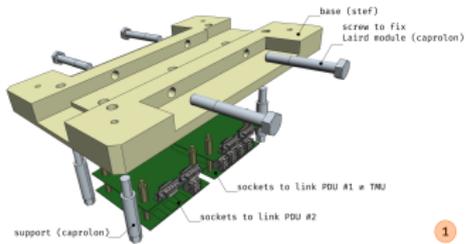
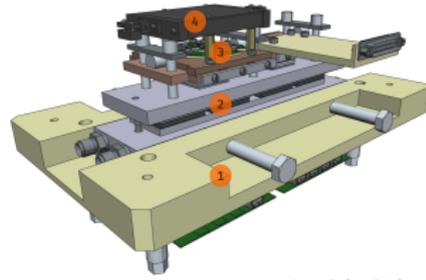
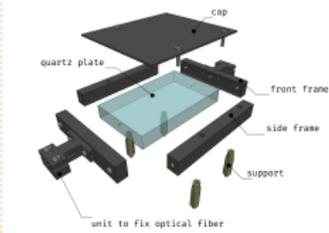
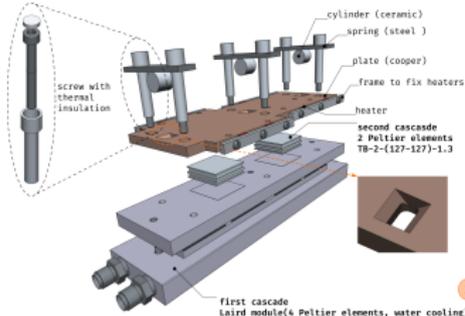
Схема определения R_c

SiPM
PCB: h=1.6 mm, $\lambda=0.4 \text{ W/mK}$ (FR4)
thermal pad: h=0.5 mm, $\lambda=15 \text{ W/mK}$
top plate: h=4 mm, $\lambda=398 \text{ W/mK}$ (Cu)
thermal pad: h=0.5 mm, $\lambda=15 \text{ W/mK}$
bottom plate: h=10 mm, $\lambda=398 \text{ W/mK}$ (Cu)
thermal pad: h=0.5 mm, $\lambda=15 \text{ W/mK}$
peltier element: ТВ-2-(127-127)-1.3
thermal pad: h=0.5 mm, $\lambda=15 \text{ W/mK}$
POPC module: h=25 mm, $\lambda=230 \text{ W/mK}$ (Al)

- Внешний теплоприток (заходящие кабели снаружи, "дыры" в теплоизоляции), был установлен равным 5 W, температура окружающей среды 25 °C
- В качестве материала для теплоизоляции использовался экструдированный пенополистерол ($\lambda = 0.35 \text{ W/m/K}$) толщиной 50 mm
- Расчеты достижимых отрицательных температур для SiPMs проводились при значениях температуры T_h верхней пластины модуля Laird: (0, -5, -10) °C



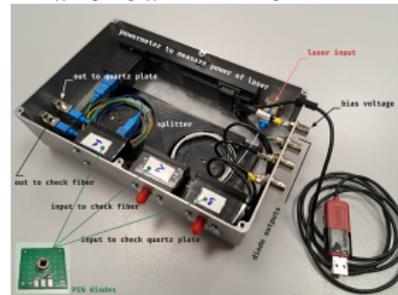
Испытания подтвердили расчеты: температура -40 °C достигается за 20 минут



Произведенные PCB с установленными SiPMs

Бокс для распределения и контроля света

- Число одновременно исследуемых SiPMs – 6 или 9
- И только одна модель SiPM ↔ ограничение по питанию
- PCB произведены для 5 моделей SiPMs и 1 модели PIN фотодиода



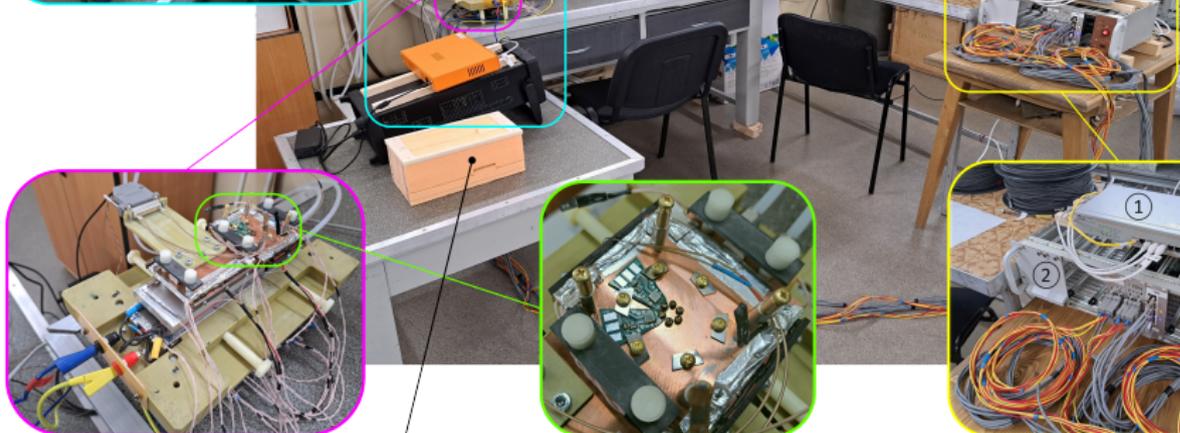


- 3. Light box
- 4. Electrometer
- 5. Laser
- 6. LVPS for Laird module
- 7. Digitizer
- 8. LVPS for SiPMs



Quartz optical fibers

Quartz plate



Climatic chamber without insulation

PCB with SiPMs

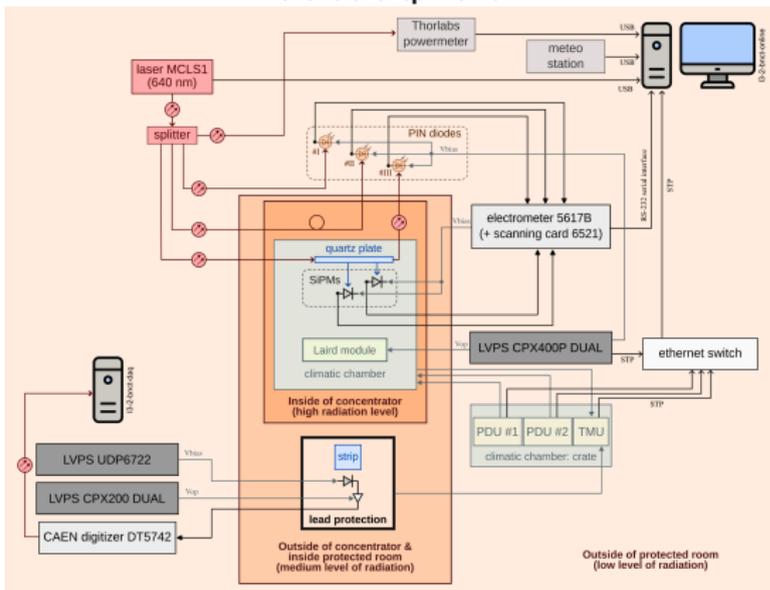
- 1. Ethernet switch
- 2. Climatic chamber electronics

- В декабре 2025 испытания двух МРРС S10931-100Р (Hamamatsu) были проведены на БНЗТ
- Параллельно исследовалась эффективность регистрации нейтронов сцинтилляционным стрипом (используются в мюонной системе детектора Belle II)

4. Эксперимент в декабре 2025



Схема эксперимента



- Стрип был дополнительно защищен свинцом для подавления потока гамма-квантов
- Подавление гамма-квантов в 9 раз, нейтронов в 1.5 раза

Оценка числа фотонов падающих на SiPMs

- Мощность светового потока в области SiPMs под кварцевой пластиной

$$P = 1.5 \times 10^{-4} \text{ мВт}$$

- Количество фотонов на единицу времени

$$N_{\gamma} = \frac{P\lambda}{hc} = 4.8 \times 10^{11}$$

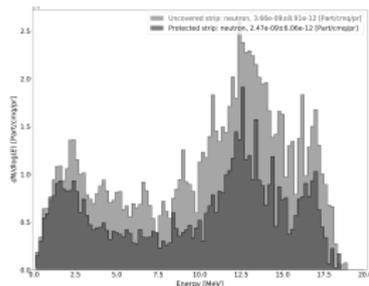
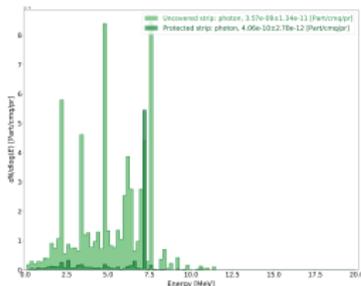
- С учетом площади окна используемого измерителя мощности ($d = 9.5 \text{ мм}$)

$$N_{\gamma} = 6.8 \times 10^9 \text{ фотон/с/мм}^2$$

- Число ячеек S10931-100P составляет 900, при площади катода $S = 9 \text{ мм}^2$

- Следовательно число фотонов попавшее на 1 ячейку, в предположении что "мертвое время" SiPM $\tau = 100 \text{ нс}$, будет

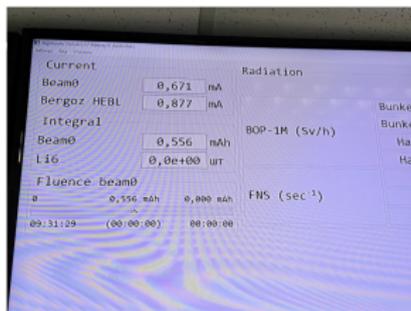
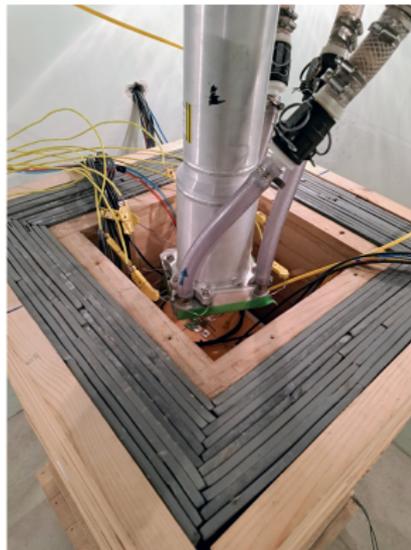
$$N_{\gamma} = 0.7 \text{ фотон/ячейку}$$





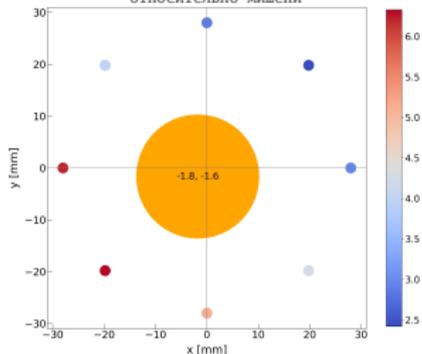
Эксперимент в декабре 2025

Расположение оборудования в бункере #2 зд.18





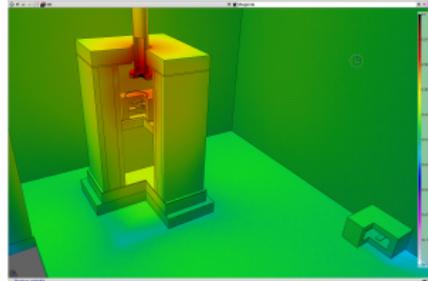
Пример определения положения пучка дейтронов относительно мишени



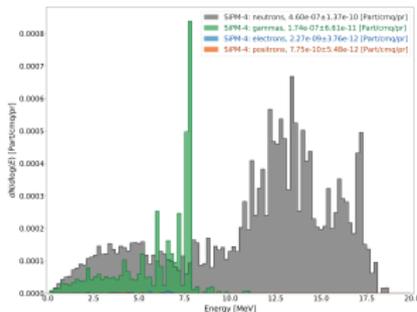
Оборудование в защищенной комнате



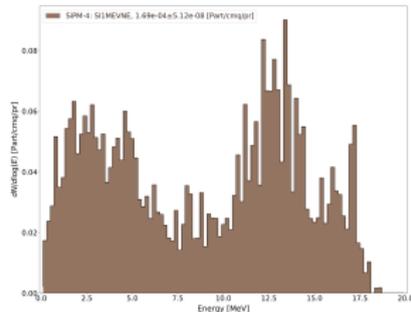
Расчитанный флюенс Si1MeV



Спектры e^- , e^+ , γ и n



Спектр 1МэВ эквивалентных нейтронов

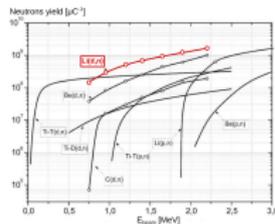


Результаты [Part/cm^2pr]

- под мишенью: 2.56×10^{-3}
- SiPM #1: 1.69×10^{-4}
- SiPM #2: 1.65×10^{-4}
- стрип: 6.57×10^{-7}
- электроника: 1.74×10^{-8}

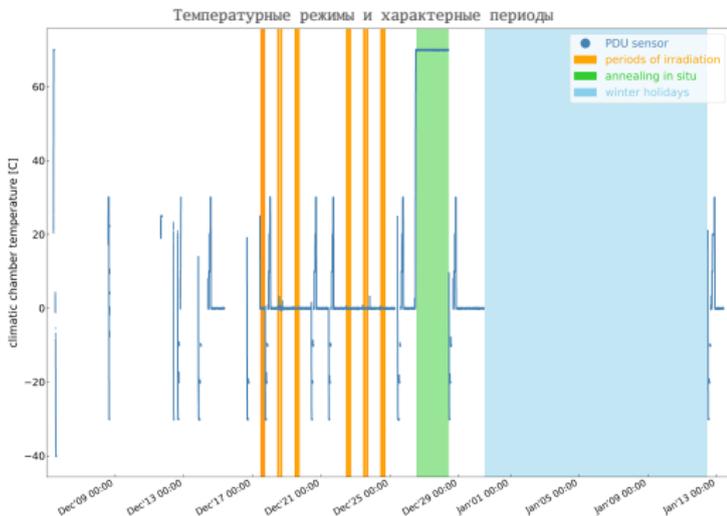
Используемая методика определения дозы

- 1 Из моделирования получаем нормализованный флюенс Si1MeV [Part/cm^2pr]
- 2 БНЗТ предоставляет параметры пучка дейтронов: ток [мА] & энергия [МэВ]
- 3 Определяем выход нейтронов [pr/s]
- 4 В итоге определяем интенсивность 1MeV neq потока [Part/cm^2/s] или флюенс [Part/cm^2]

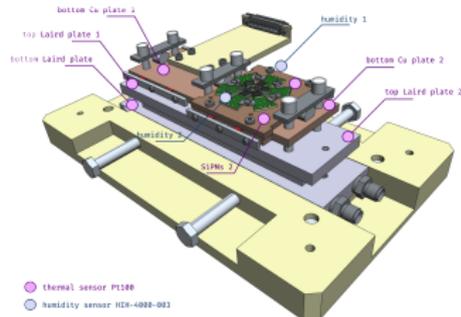
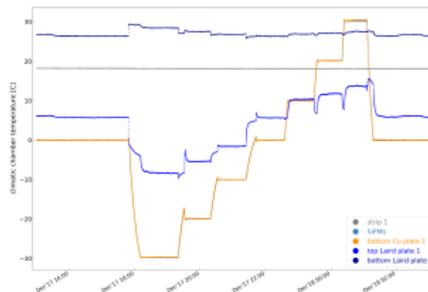




- Продолжительность эксперимента – 6 дневных смен (17–24/12/2025), каждая около 7 часов
- Полученные интегралы доз [neq/cm²]
 - SiPMs 1.4×10^{10}
 - стрип 5.6×10^7
 - электроника 1.5×10^6
- При облучении температура SiPMs была 0°C, вне этого, периодически выполнялись измерения параметров SiPMs в диапазоне от –30°C до 30°C с шагом 10°C
- После облучения проводился отжиг на месте: температура 70°C, прямое напряжение –1.4 В, продолжительность 2 суток
- Через 4 суток (29/12/2025) уровень остаточной радиации внутри концентратора составил 35 мкЗв/час
- После новогодних каникул, был также выполнен цикл измерений

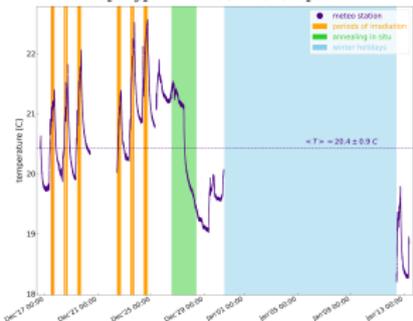


Пример цикла измерений в диапазоне температур

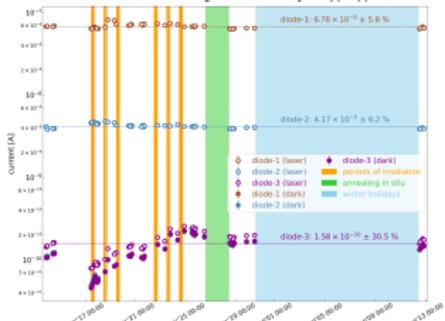




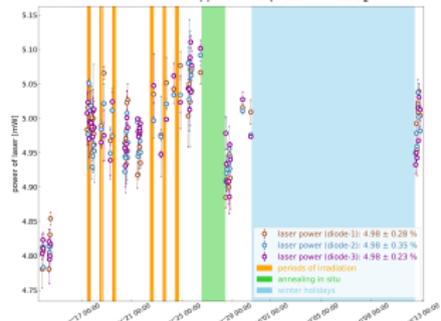
Температура в области электроники



Стабильность измерений PIN фотодиодов



Стабильность выходной мощности лазера

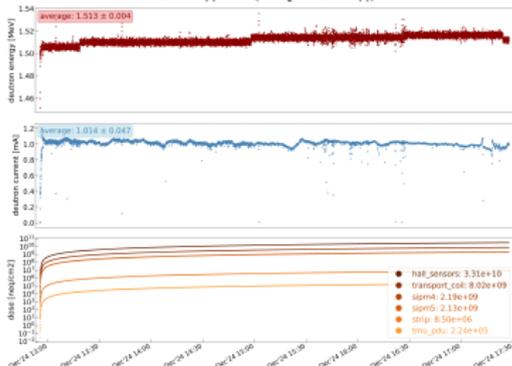


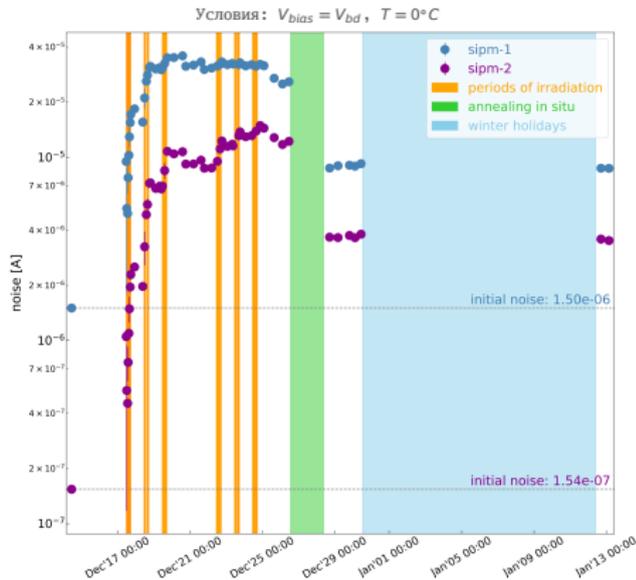
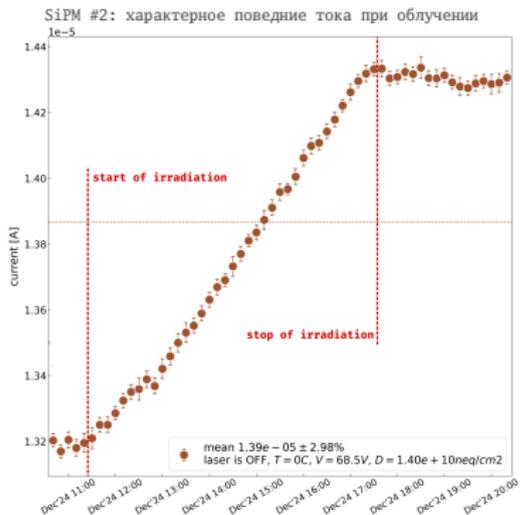
Примеры темпа набора дозы

Первый день (первый заход)



Шестой день (второй заход)



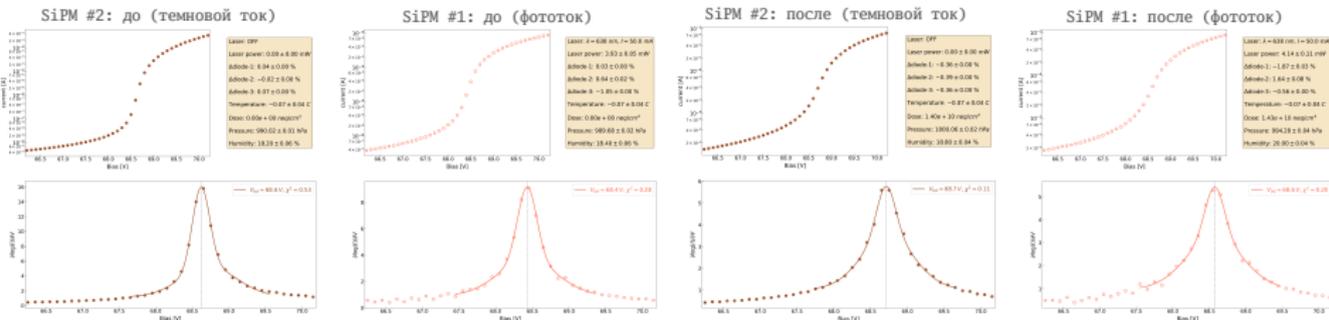
Темновой ток SiPM [A] от дозы [neq/cm²] – сводка по дням

Метка	init	первый день	второй день	третий день	выходные
Доза	0	5.6×10^8	2.6×10^9	5.5×10^9	–
SiPM #1	1.50×10^{-6}	1.84×10^{-5} (12.3)	3.13×10^{-5} (20.9)	3.50×10^{-5} (23.3)	3.07×10^{-5} (drop in 1.1)
SiPM #2	1.54×10^{-7}	2.52×10^{-6} (16.4)	7.24×10^{-6} (47.0)	1.08×10^{-5} (70.1)	8.73×10^{-5} (drop in 1.2)

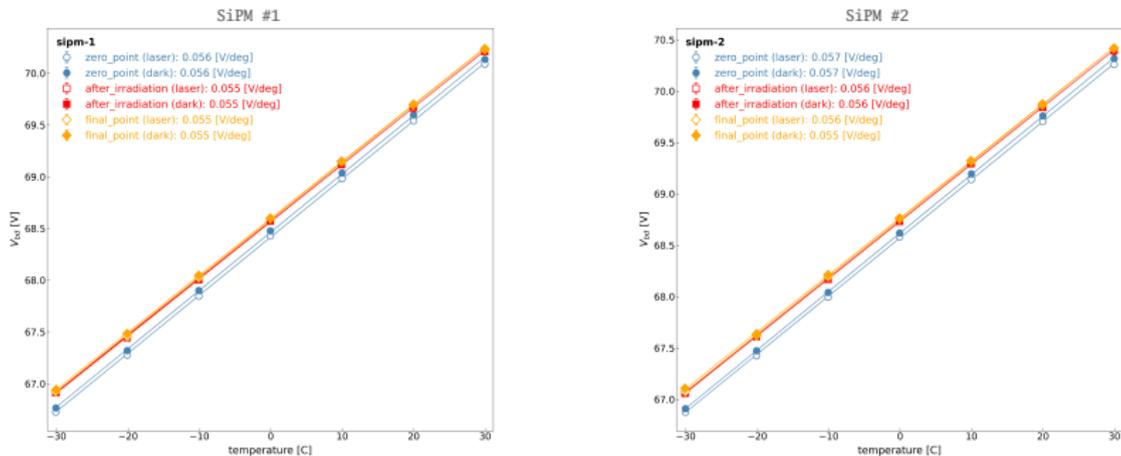
Метка	четвертый день	пятый день	шестой день	отжиг	каникулы
Доза	8.7×10^9	1.1×10^{10}	1.43×10^{10}	–	–
SiPM #1	3.31×10^{-5} (22.1)	3.27×10^{-5} (21.8)	3.21×10^{-5} (21.4)	9.21×10^{-6} (drop in 3.5)	8.70×10^{-6} (drop in 1.1)
SiPM #2	1.23×10^{-5} (79.9)	1.37×10^{-5} (89.0)	1.49×10^{-5} (96.7)	3.80×10^{-6} (drop in 3.9)	3.51×10^{-6} (drop in 1.1)



Примеры измерений при $T = 0^\circ\text{C}$



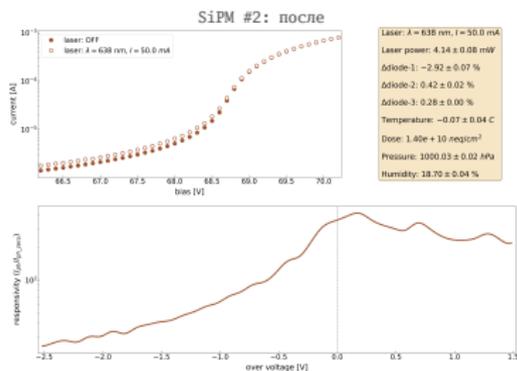
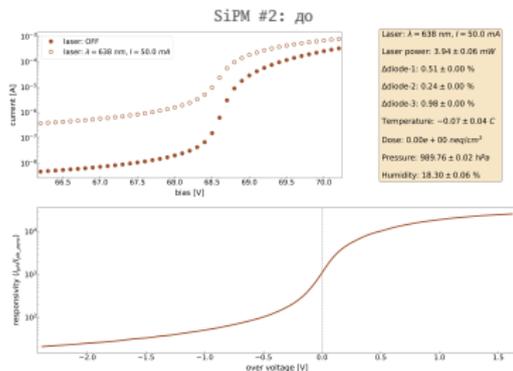
Температурная зависимость: до/после облучения, финальная точка в январе 2026



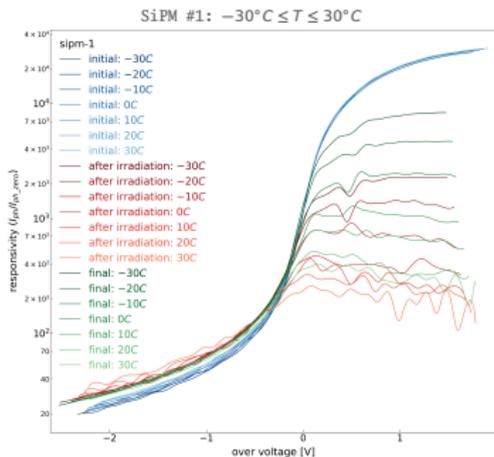
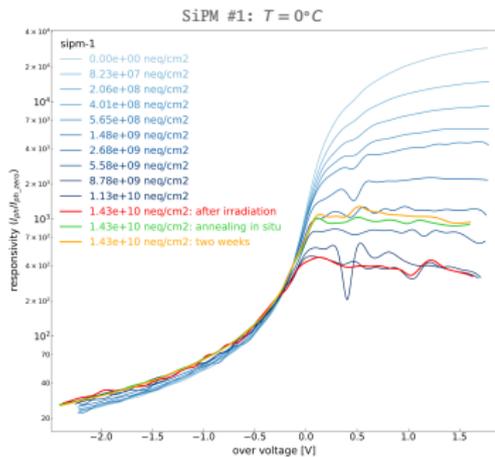
После облучения значение V_{bd} увеличилось на 0.2 В и осталось на этом уровне после отжига



Примеры измерений при $T = 0^\circ\text{C}$

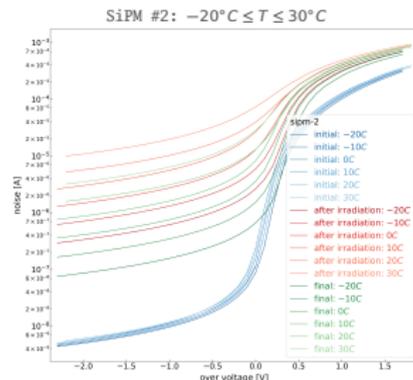
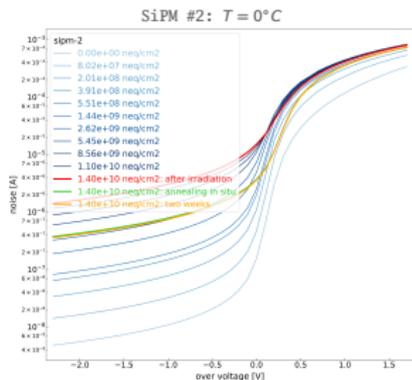


До/после облучения, финальная точка в январе 2026



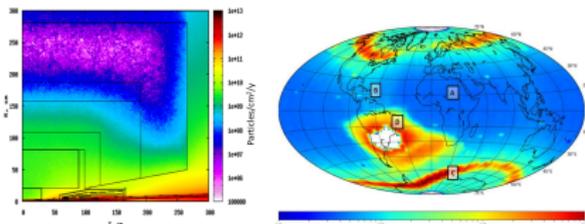


Зависимость темного тока от напряжения



Выводы

- Набранный интеграл дозы для SiPMs 1.4×10^{10} neq/cm²
- Темновой ток исследуемых S10931-100P увеличился в 21.4 для SiPM #1 ($1.50 \times 10^{-6} \Rightarrow 3.21 \times 10^{-5}$ A) и 96.7 для SiPM #2 ($1.54 \times 10^{-7} \Rightarrow 1.49 \times 10^{-5}$ A) раз
- Фоточувствительность упала на 2 порядка ($T = 0^\circ\text{C}$)
- По всей видимости данные приборы не желательно использовать в экспериментах с высоким уровнем радиационного облучения

Флюенс [neq/cm²]CMS (LHC) 6×10^{13} @HCAL@300fb⁻¹Belle-II (SuperKEKB) 10^{12} @70ab⁻¹ScTau (Novosibirsk) 10^{11} @VD, DC@1 годКосмос 1.3×10^8 @4 месяца на орбите ISS 1.2×10^{10} @6 лет на орбите 550 км

5. Заключение и планы



- В 2022 г. проведено исследование деградации прозрачности оптического волокна для детектора CMS (CERN). Впервые было продемонстрировано, что БНЗТ может обеспечить флюенс нейтронов на уровне 10^{14} neq/cm²
- Прототип стенда для изучения радиационного старения твердотельных ФЭУ реализован и успешно испытан на БНЗТ в 2024 г.
- В 2025 г. сконструирована и произведена первая версия стенда, проведено исследование радиационной стойкости MPPC S10931–100P (Hamamatsu)
- Таким образом, в Институте появилась возможность проводить подобного рода исследования, востребованные в методических работах связанных с разработкой систем детекторов элементарных частиц

Ближайшие планы

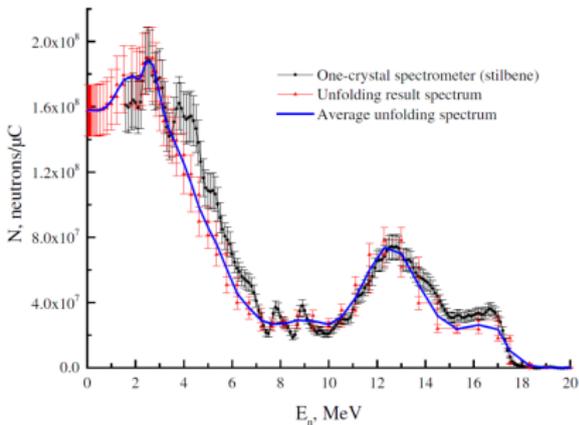
1. Дополнительная верификация FLUKA на экспериментальных данных: дозиметр–радиометр с набором сфер–замедлителей, активация фольги (Al, Mn, Ti, Zn, Ni и ??) (+ генерация нейтронов непосредственно во FLUKA)
2. Интеграция диджитайзера D500-8 (8 каналов, 14-разрядный) в ССД ↔ в декабре 2025 вышел первый вариант кроссплатформенной библиотеки. Разработана первая версия ПО для работы с прибором
3. В 2026 г. планируется выполнить исследования радиационного старения
 - приборы ООО ВТЦ «Баспик»: два МКПО (многоанодные, позиционно-чувствительные) и ВОП (волоконно-оптические пластины)
 - SiPM производства Интеграл (Беларусь), рассматриваются для модернизации ToF системы детектора КМД–3
 - запасной вариант: гейгеровский лавинный фотодиод 149 – 35 (ЦПТА), MPPC S13360 – 6025PE (Hamamatsu) и MPPC S13360 – 6050PE (Hamamatsu)
4. Приобретение пикосекундного диодного лазера (драйвер + головка) позволит значительно расширить диапазон исследуемых параметров SiPM

Запасные слайды



- В качестве исходного спектра нейтронов в моделировании используются экспериментальные данные полученные на тонких мишенях

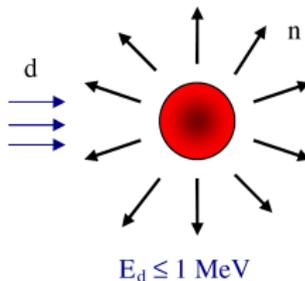
K. Mitrofanov et al. The energy spectrum of neutrons from $7\text{Li}(d,n)8\text{Be}$ reaction at deuteron energy 2.9MeV, EPJ Web of Conferences 146, 11041 (2017)



- Угловое распределение

Neutron production from $7\text{Li}(d,xn)$ nuclear fusion reactions driven by high-intensity laser-target interactions, Published 19 March 2010, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 52, Number 4

isotropic neutron source



directional neutron source

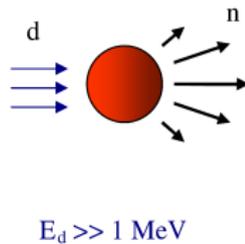




Схема ковалентных связей кремния

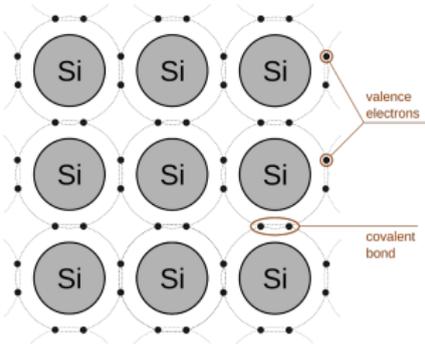


Схема легирования бора в кремний

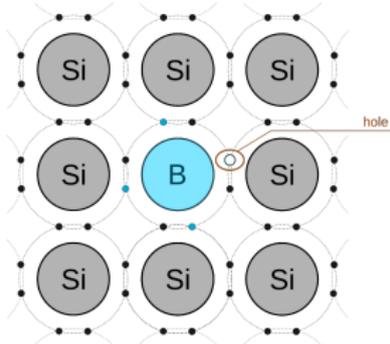


Схема легирования фосфора в кремний

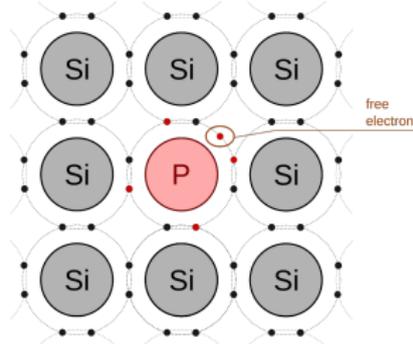
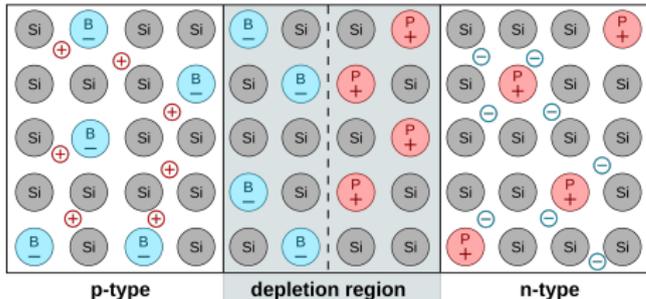
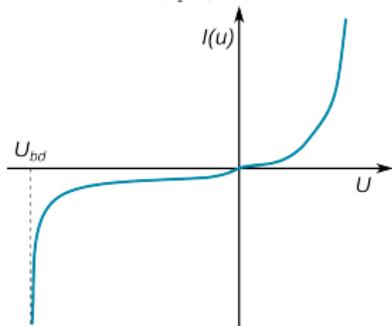


Схема p-n полупроводника



Ток диода при прямом и обратном напряжениях

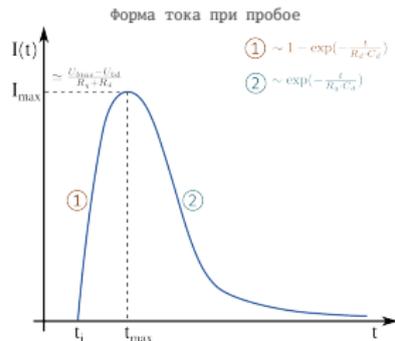
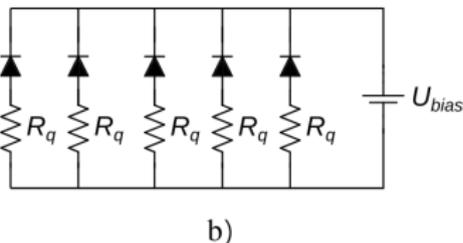
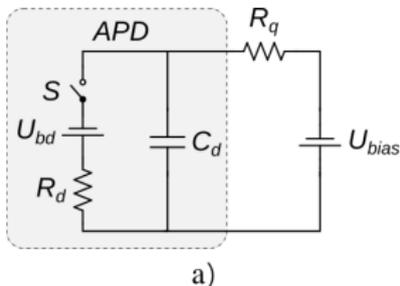




- SiPM представляет собой массив лавинных фотодиодов APD (анг. Avalanche Photo Diode) работающих в гейгеровском режиме, с обязательным включением в цепь гасящего лавину резистора R_q
- APD с R_q образуют ячейку, из которых собственно и "собирается" SiPM. Число ячеек обычно $N_{cell} = 10^3 \div 10^5$

Конструкция SiPM: а) модель ячейки (предложено Haitz в 1964)

б) параллельное подключение микро ячеек



- Параметры модели: сопротивление гасящего резистора гораздо больше сопротивления обедненной зоны (ячейки) $R_q \gg R_d$, напряжение смещения больше напряжения пробоя $U_{bias} > U_{bd}$
- Ключ S открыт, емкость C_d (соответствующая емкости обедненного перехода, иногда используют обозначение C_j) полностью заряжена и готова для разрядки
- Момент возникновения лавины в следствии ударной ионизации вызванной попаданием гамма-кванта в обедненную зону, соответствующий времени t_i , означает что ключ S закрывается и емкость C_d начинает разряжаться через резистор R_d (иногда обозначается как R_S – последовательное сопротивление ячейки) с постоянной времени $\tau_1 = R_d C_d$ ($\tau_1 \approx 1$ нс)
- В конечном итоге напряжение на C_d уменьшается до значения U_{bd} , при этом падает вероятность возникновения второй ударной ионизации при попадании гамма-кванта в этот период времени в обедненную зону
- После полной разрядки емкости в момент времени t_{max} ключ S снова открывается и емкость начинает заряжаться с постоянной времени $\tau_2 = R_q C_d$ ($\tau_2 \approx 10$ нс), при этом ток протекающий через резистор R_q начинает падать
- После того как емкость C_d снова зарядится, микро ячейка снова готова к регистрации гамма-кванта



Поверхностные повреждения

- Обусловлены ионизационными потерями (IEL) за счет рентгеновского излучения с энергиями меньше 300 кэВ
- В основном происходят в анти отражательном покрытии и, с меньшей степенью вероятности, в первом слое полупроводника
- Приводят к увеличению темнового тока

Повреждения кристаллической структуры за счет

- Жестких гамма-квантов, электронов и позитронов с энергиями более 300 кэВ
- Протонов или нейтронов, при интегральном потоке до 10^{12} частиц/см² повреждения условно легкие и средние, выше 10^{12} частиц/см² повреждения значительные
- Приводят к **значительному увеличению темнового тока**

Восстановление

- Возможно **частичное восстановление** свойств путем отжига
- Эффект за счет переупорядочивания смещенных атомов в решетке

