



Мобильный мюонный годоскоп для мюонографии крупномасштабных объектов

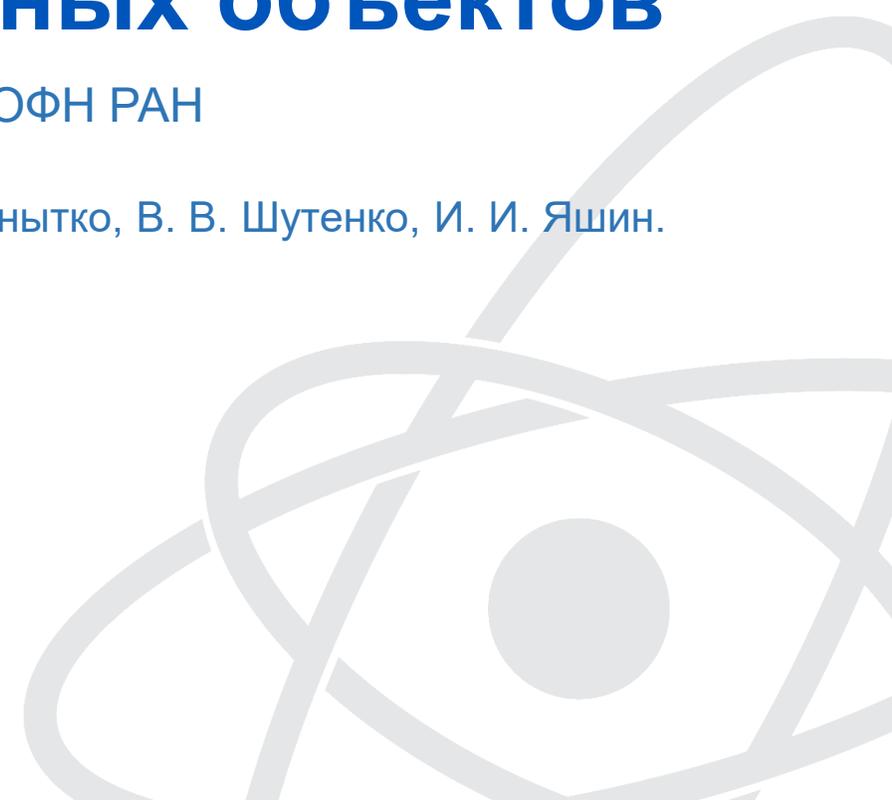
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН

М. Ю. Целиненко, К. Г. Компаниец, Н. А. Пасюк, А. А. Петрухин, Л. М. Снытко, В. В. Шутенко, И. И. Яшин.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

MYTselinenko@mephi.ru

г. Новосибирск
10-13 марта 2026 г.



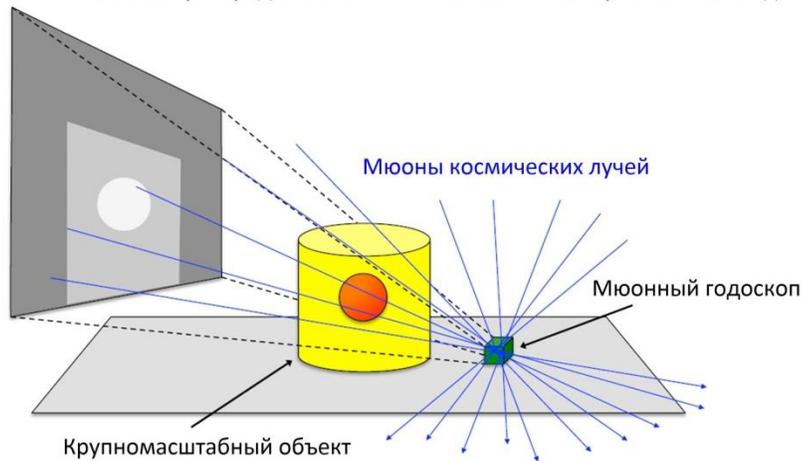
Мюонография

- **Мюонография** - метод исследования структуры крупномасштабных объектов с использованием естественного потока мюонов. Принцип метода аналогичен рентгенографии, но вместо рентгеновских лучей используются мюоны космических лучей.
- **Преимущество метода:** использование проникающего потока мюонов естественного происхождения.
- **Области применения:**
 - **Фундаментальные и прикладные исследования:** мониторинг и изучение атмосферы, магнитосферы и гелиосферы.
 - **Практическое использование:** «просвечивание» пирамид, вулканов, транспортных контейнеров, промышленных и ядерных объектов, геологоразведка, изучение объектов археологии и культурного наследия и др.

Для реализации метода в режиме on-line необходимо создание прецизионных детекторов – мюонных годоскопов

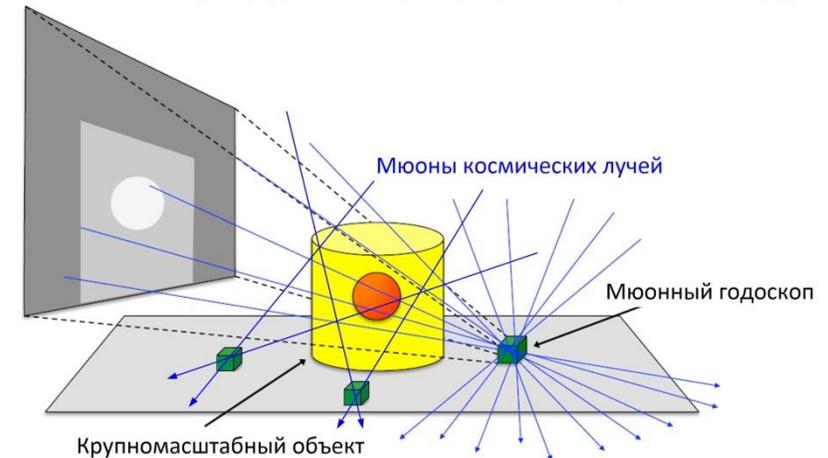
2D-мюонография

Угловое распределение потока мюонов в месте расположения детектора



Мюонная томография

Угловое распределение потока мюонов в месте расположения детектора



Годоскопы НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ)

Мюонный годоскоп УРАГАН



Сцинтилляционный мюонный годоскоп
(Заказ института геофизики РАН)

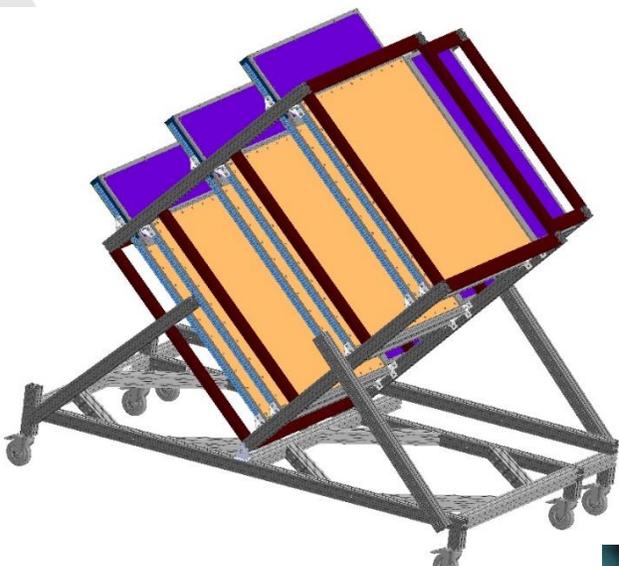


Гибридный мюонный годоскоп
(МИФИ совместно с АО
«ВНИИАЭС» РОСАТОМ)



Мобильный мюонный годоскоп (ММГ)

3D модель детектора



Конструкция детектора



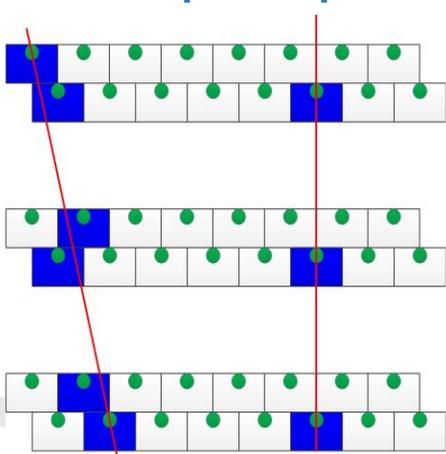
ММГ представляет собой сборку из 6-ти однопроекционных координатных плоскостей (ОКП).

- Каждая ОКП включает в себя **192** сцинтилляционных стрипа ($1000 \times 10 \times 7 \text{ мм}^3$) с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители.
- Стрипы в ОКП уложены в два, смещённые относительно друг друга на половину ширины стрипа.
- Всего 1152 канала регистрации
- Чувствительная площадь: $\sim 1 \times 1 \text{ м}^2$.
- Угловая точность $\sim 0.1^\circ$

Сборка плоскостей



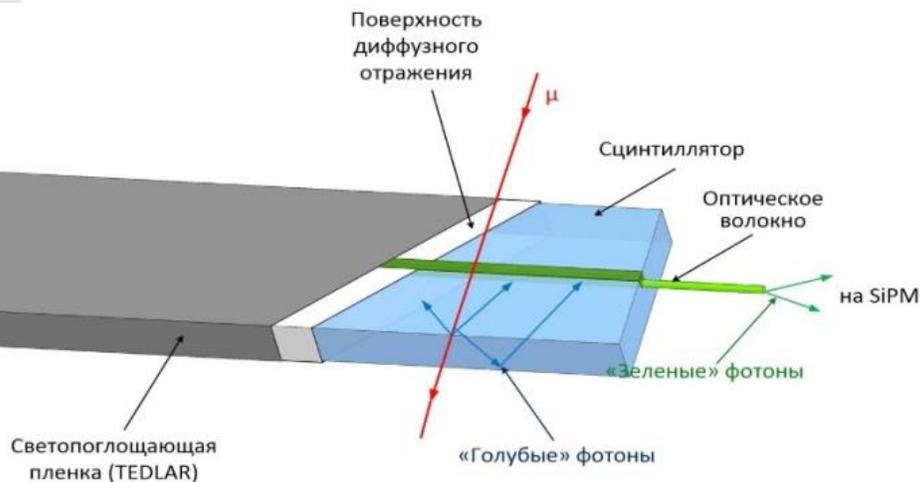
Схема регистрации



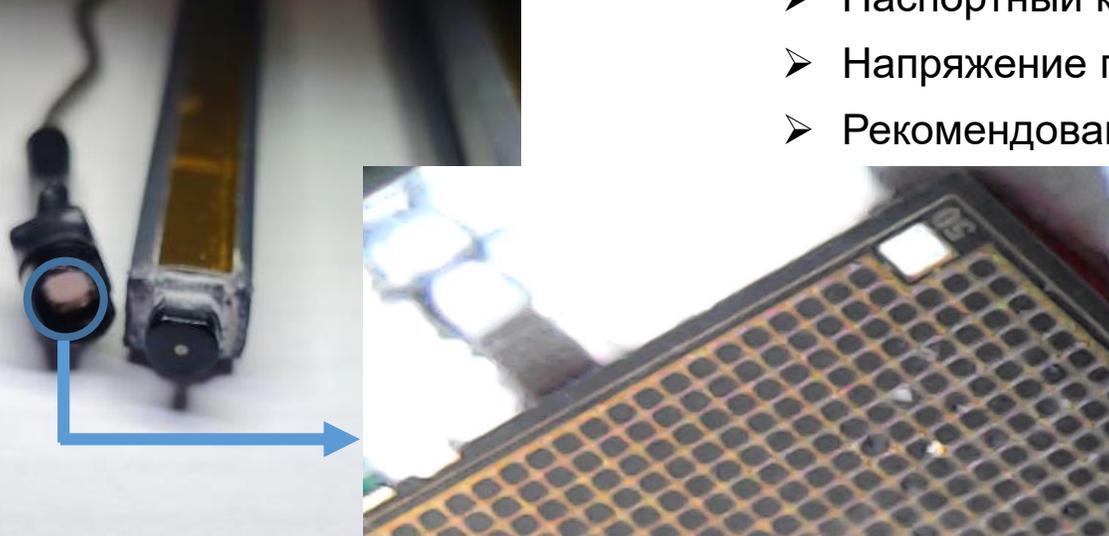
Стрипы в соседних ОКП ориентированы ортогонально.

Детектирующие элементы

Сцинтилляторы – АО «УНИПЛАСТ» г. Владимир



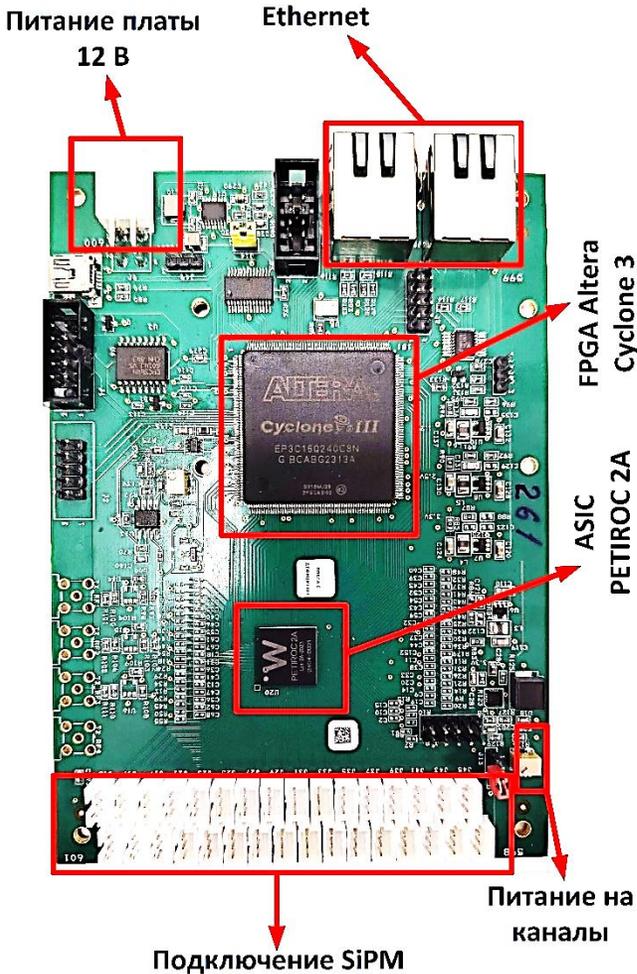
Детектирующие элементы ММГ



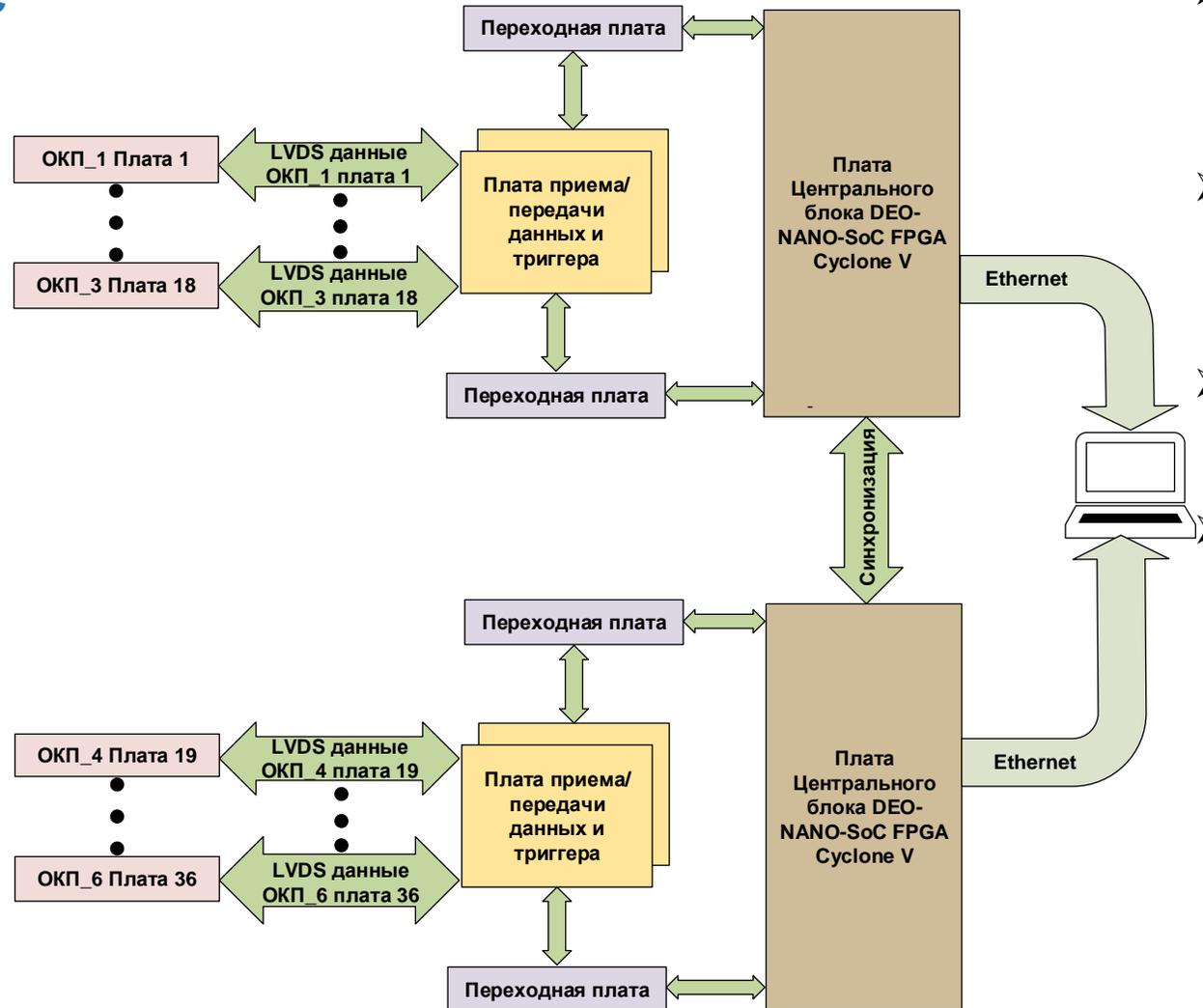
- **Стрип** (производство АО «УНИПЛАСТ», г. Владимир) – полоска сцинтиллятора на основе полистирола с добавлением р-терфенила и РОРОР.
- Габаритные размеры стрипа **1000×10×7 мм³**.
- На одной из граней находится фрезерованная канавка, куда клеено спектросмещающее оптическое волокно
- Съём оптического сигнала со стрипов осуществляется с помощью **SiPM Joinbon TN-3050 smt** (Китай).
- Размеры входного окна – **3×3 мм²**
- Паспортный коэффициент усиления – **2.6×10⁶**
- Напряжение пробоя – **25±0.2 В.**
- Рекомендованный диапазона смещения – **1–5 В.**

Система считывания данных

Плата считывания на основе 32-х канальной ASIC PETIROC2A



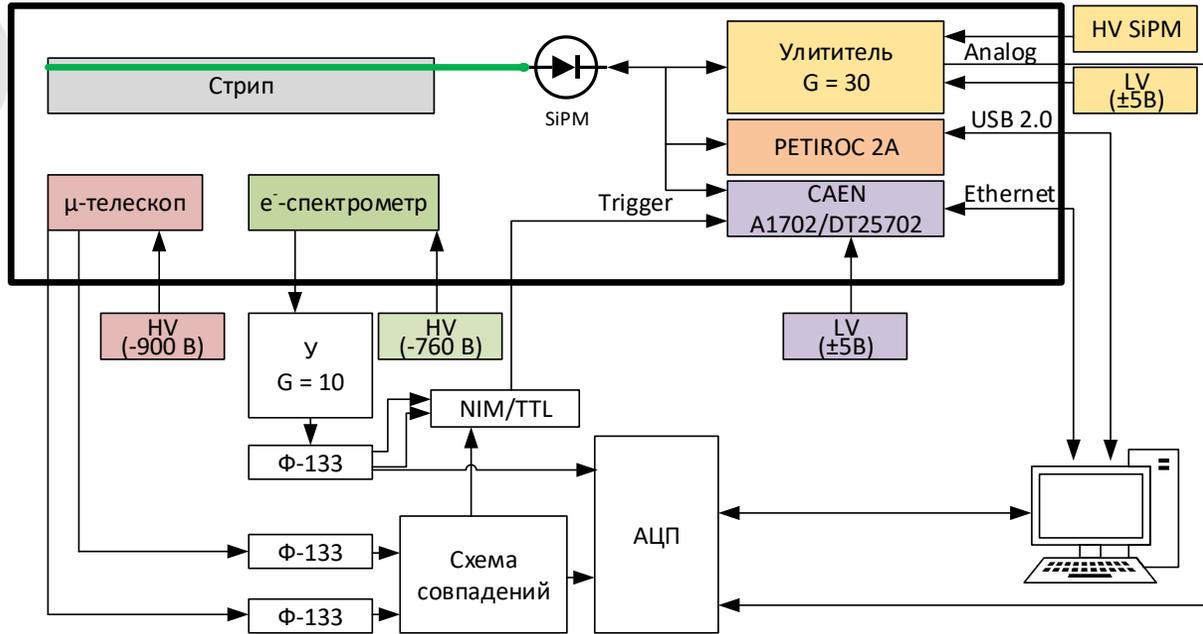
Система считывания данных ММГ



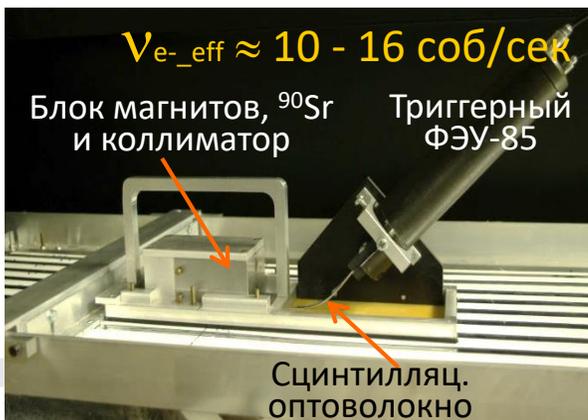
- Считывание электрического сигнала с кремниевых ФЭУ осуществляется с помощью ASIC PETIROC2A.
- В составе одной ОКП используется 6 плат считывания. Всего в ММГ 36 плат.
- Настройками ASIC управляет FPGA Altera Cyclone 3.
- Данные со всех ОКП передаются на центральный блок который осуществляет формирование выходного пакета данных.

Тестирование сцинтилляционных стрипов

Блок схема станда для тестирования сцинтилляционных стрипов



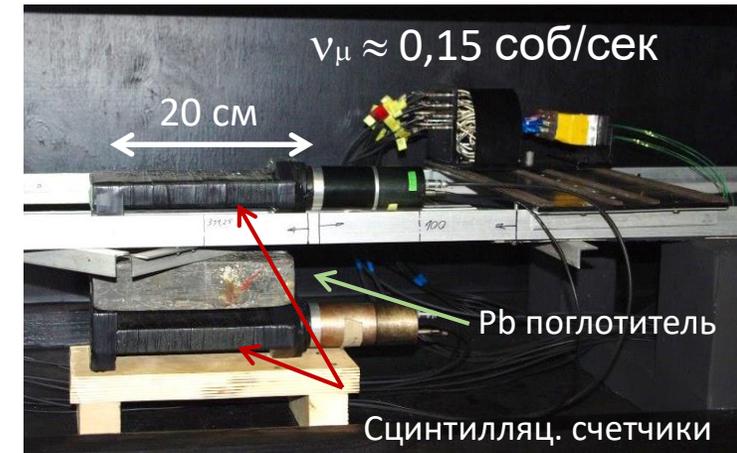
Тестирование с помощью бета – спектрометра



- Бета–спектрометр на основе источника ^{90}Sr .
- Блок магнитов позволяет отбирать электроны по энергиям.
- Энергии при тестирования $E_e \approx 1.8 - 2.5$ Мэв.
- Частота триггера $f \approx 16$ соб/сек.

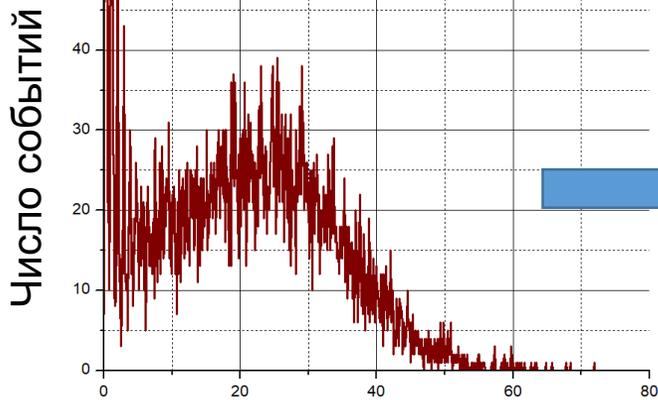
Тестирование с помощью мюонного телескопа

- Мюонный телескоп – два сцинтилляционных счетчика просматриваемые ФЭУ-85.
- на нижний счетчик устанавливается свинцовый блок.
- Скорость счета КТ в режиме совпадения составляет около 0.16 соб/сек.



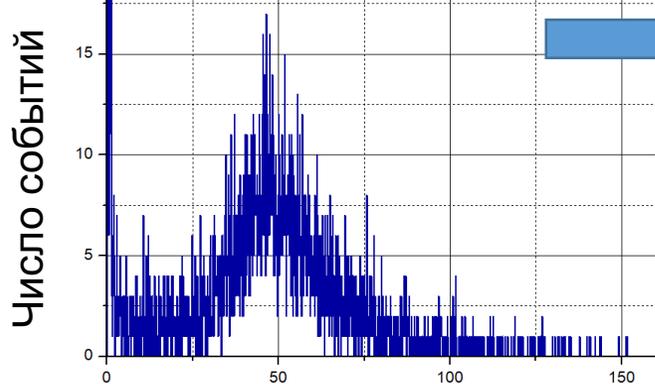
Тестирование сцинтилляционных стрипов

Спектр сигналов откликов сцинтилляционного стрипа (бета – спектрометр)



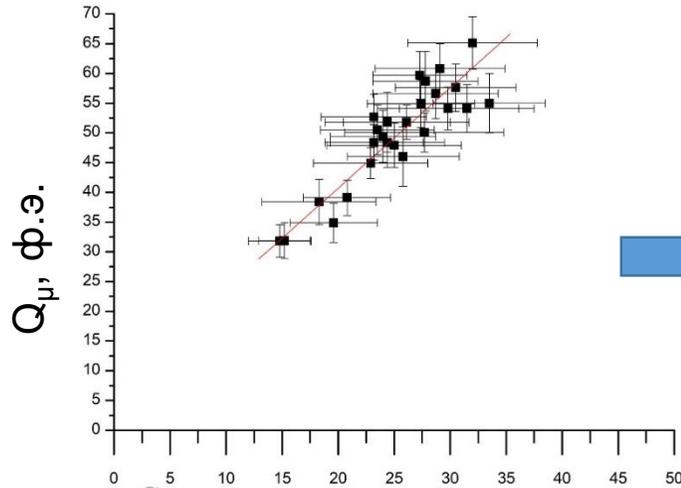
Q_e , ф.э.

Спектр сигналов откликов сцинтилляционного стрипа (мюонный телескоп)



Q_μ , ф.э.

Калибровочная зависимость между показаниями спектрометра и телескопа

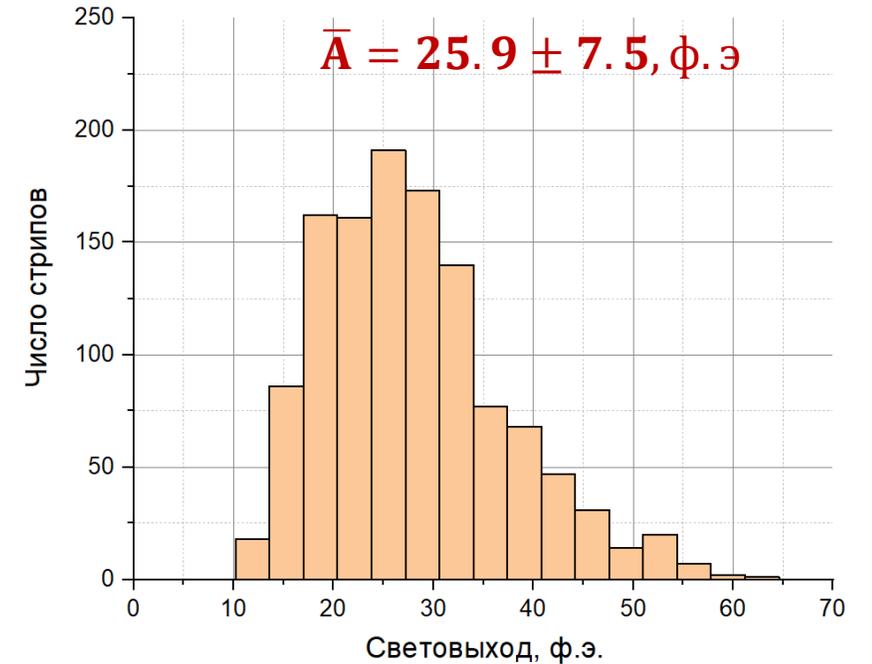


Q_e , ф.э.

$$A_\mu = A_e * K_{\frac{\mu}{e}} + B$$

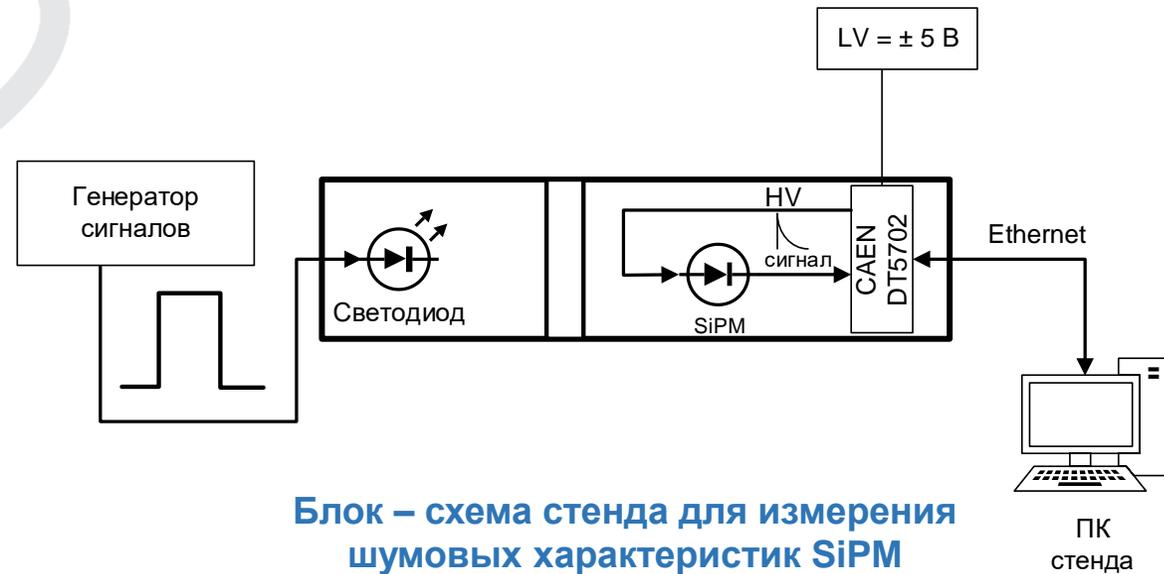
$$K_{\frac{\mu}{e}} = 1.7 \pm 0.2$$

Распределение количества стрипов по световыходу по результатам поточного тестирования

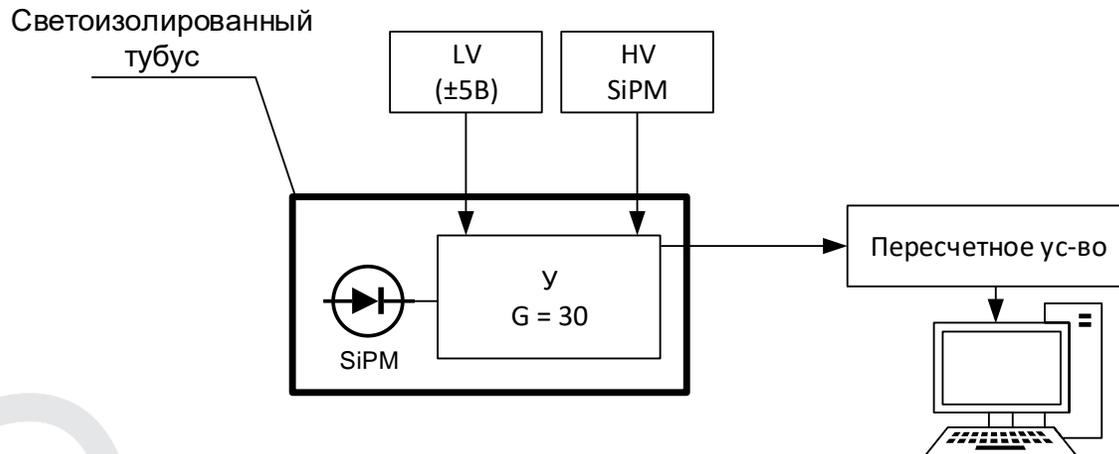


Тестирование кремниевых ФЭУ

Блок – схема станда для измерения амплитудных спектров SiPM



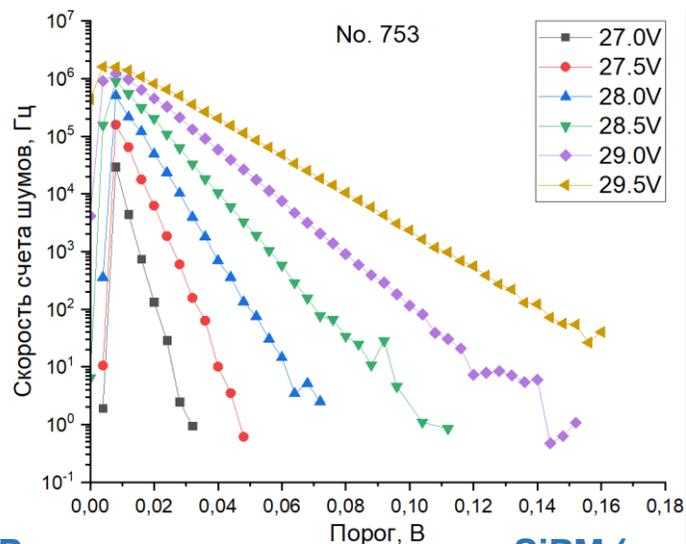
Блок – схема станда для измерения шумовых характеристик SiPM



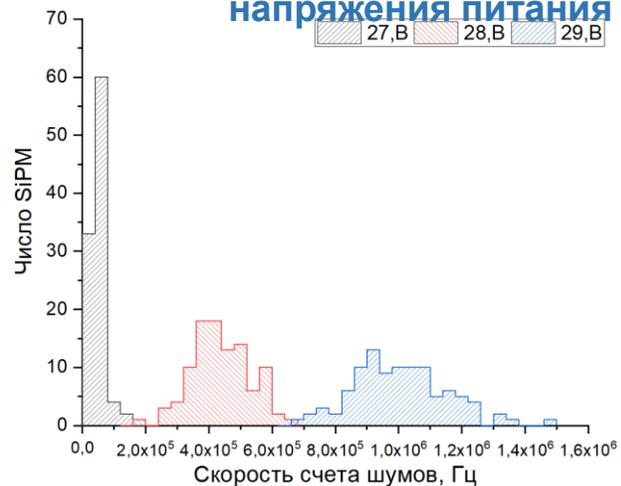
- Цель тестирования кремниевых фотоумножителей – ранжирование их по коэффициентам усиления и шумовым характеристикам для последующего оснащения ОКП ММГ.
- Стенд для измерения амплитудных спектров SiPM работает на базе специализированной платы CAEN A1702/DT5702.

Тестирование кремниевых ФЭУ

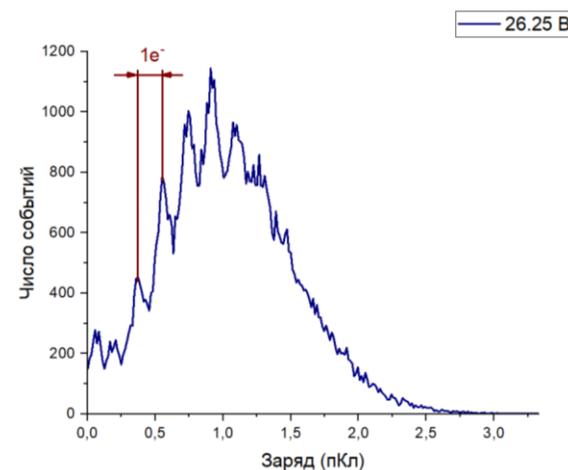
Шумовые характеристики SiPM № 753



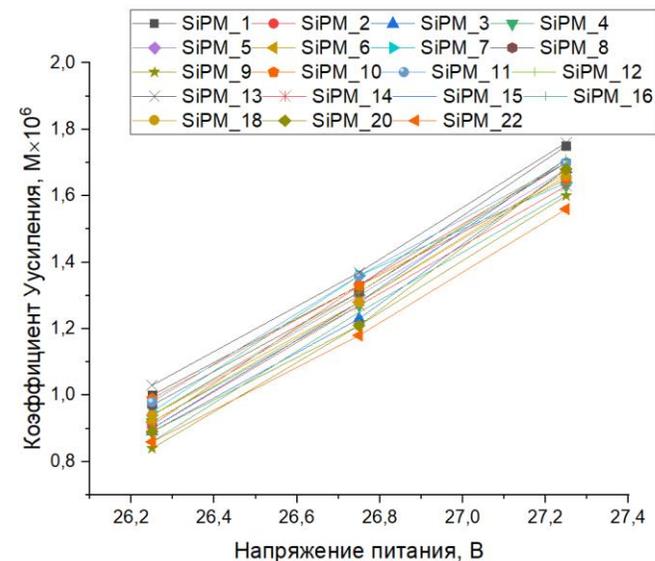
Распределение количества SiPM (партия 100 шт.) по скорости счета шумов в зависимости от напряжения питания



Спектр сигналов откликов SiPM

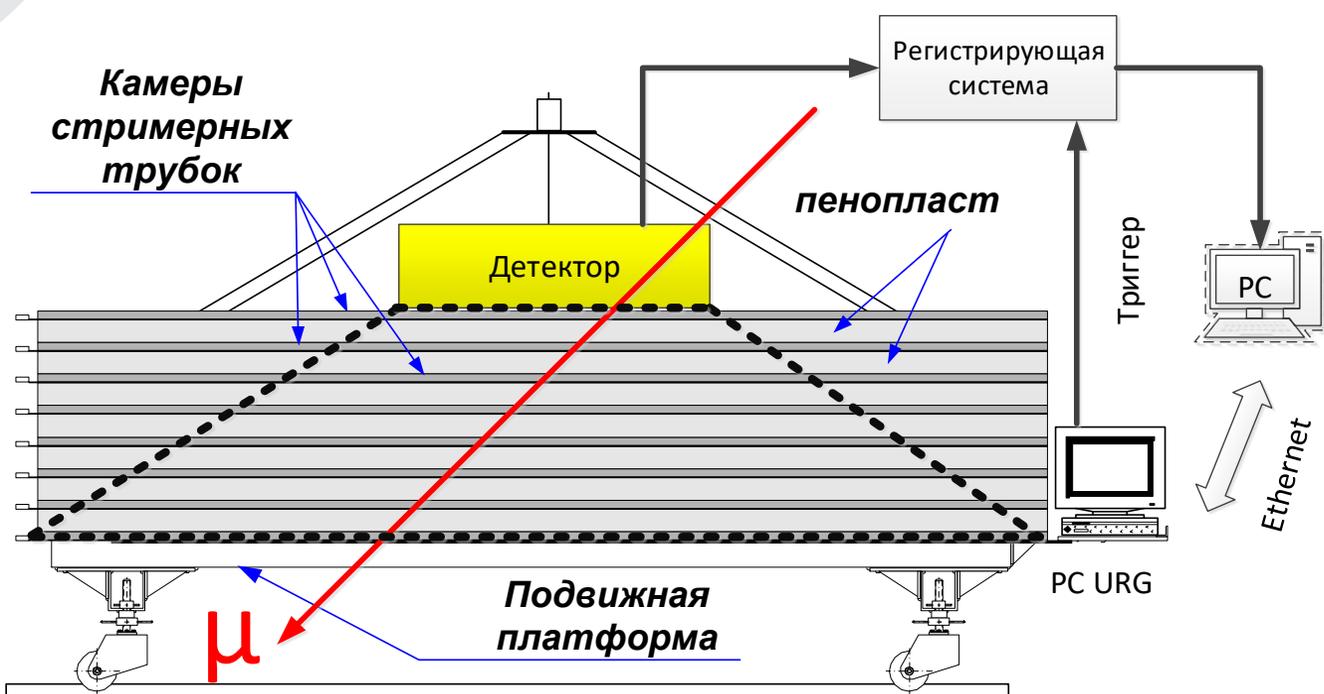


Зависимость коэффициента усиления 22 SiPM от напряжения питания



Тестирование ОКП

Блок – схема станда для тестирования детекторов на базе МГ УРАГАН



- Выбор триггерной зоны, исходя из геометрии тестируемого детектора.
- Триггирование регистрирующей системы детектора от локальной машины УРАГАН.
- Данные с PC передаются на ПК станда.
- Проверка пересечения реконструированным в УРАГАНе треком с детектором, анализ отклика в случае успеха.
- Заполнение матриц – мюнограмм.

Угловое разрешение

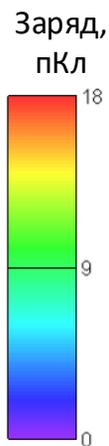
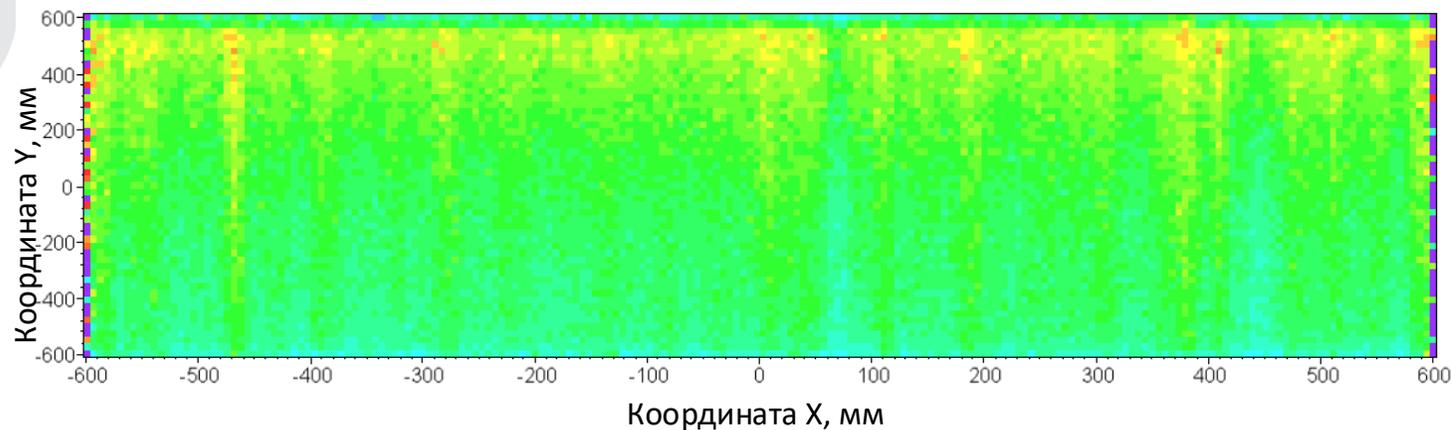
< 1°

Пространственная точность

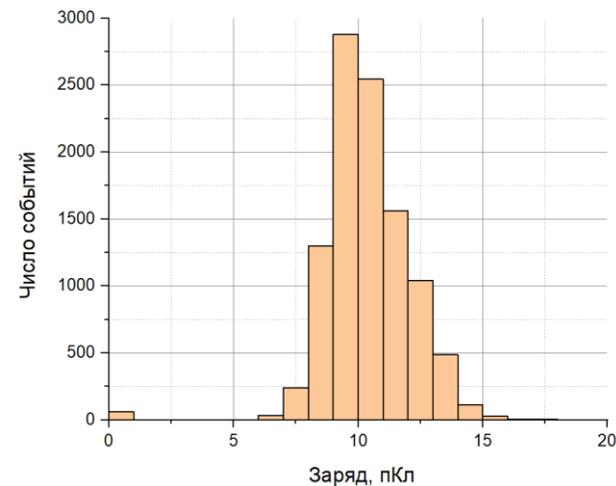
~ 1 см

Тестирование ОКП

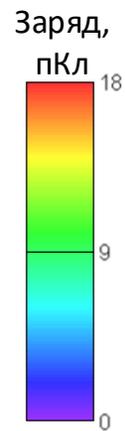
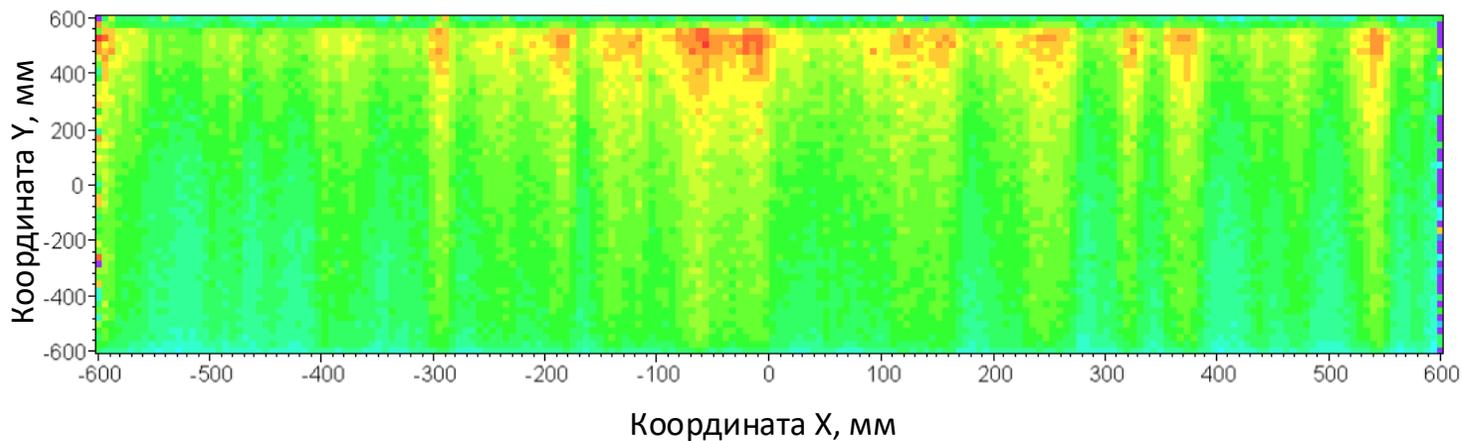
Распределение отклика по площади ОКП_1



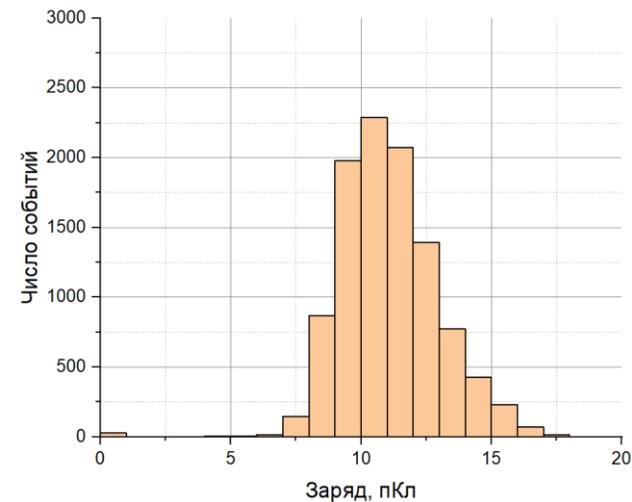
Распределение отклика по площади ОКП_1



Распределение отклика по площади ОКП_2



Распределение отклика по площади ОКП_2



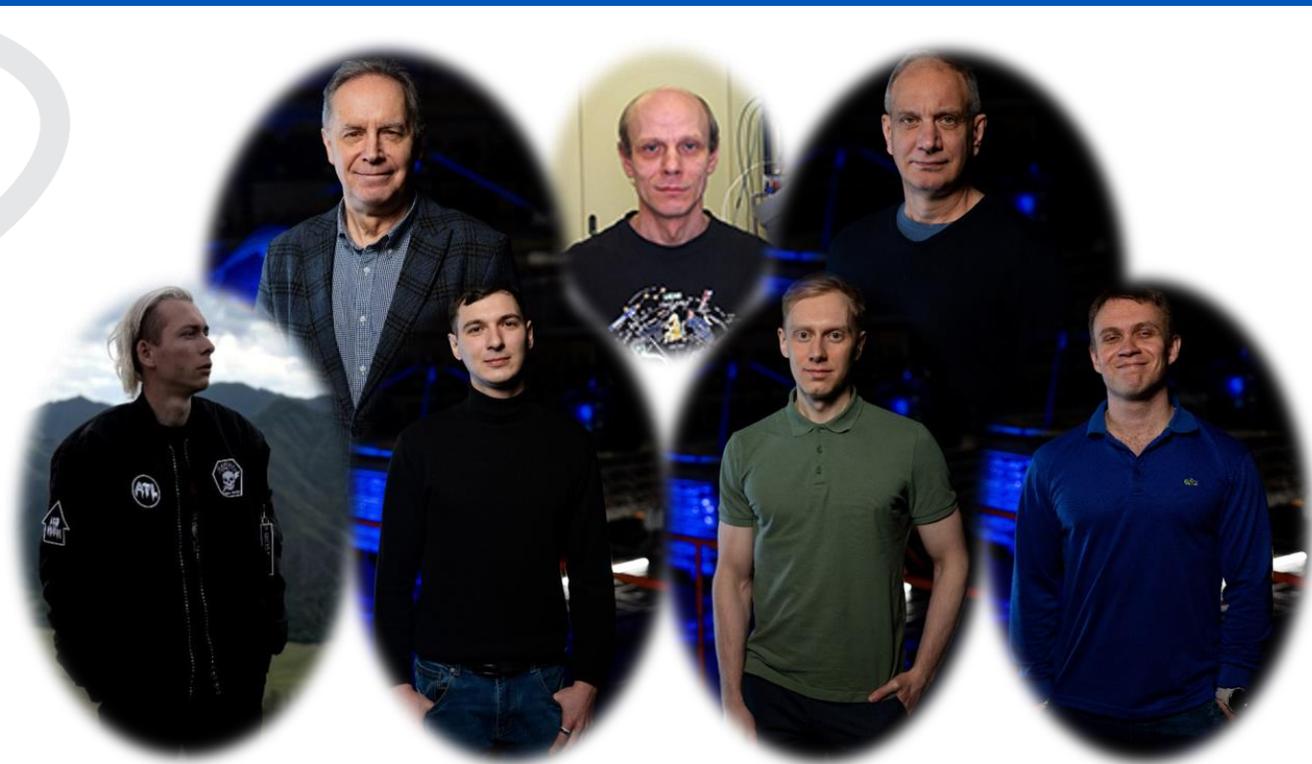
Тестирование ОКП

	ОКП_1	ОКП_2
Средняя амплитуда отклика, пКл	10.44 ± 0.02	11.12 ± 0.02
Среднеквадратичное отклонение σ , пКл	1.5 ± 0.01	1.89 ± 0.01
Неоднородность отклика, %	14.60	16.29

Заключение

- Для реализации метода мюнографии внутренней структуры различных крупномасштабных объектов был разработан и собран мобильный мюонный годоскоп с эффективной площадью 1 м^2 , который позволяет в режиме on-line регистрировать мюоны КЛ со всех направлений в пределах апертуры детектора.
- В качестве детектирующих элементов используются сцинтилляционные стрипы на основе полистирола производства АО «УНИПЛАСТ» (г. Владимир).
- Для создания детектирующей системы было протестировано 1200 стрипов, средний отклик составил $A = 25.9 \pm 7.5$, ф.э.
- В качестве фотодетектора применяются SiPM Joinbon TN-3050 smt (Китай). Для партии из 1200 шт. среднее напряжение пробоя составило $U_{\text{проб}} = 24.9 \pm 0.2$ В, что согласуется с паспортным значением (25.0 ± 0.2) В. По результатам анализа тестирования амплитудных спектров было выявлено, что для напряжений питания 26.25 В, 26.75 В, 27.25 В средние коэффициенты усиления составили соответственно $(1.07 \pm 0.15) \times 10^6$, $(1.45 \pm 0.15) \times 10^6$, $(1.84 \pm 0.16) \times 10^6$.
- В рамках тестирования однопроекционных координатных плоскостей на специализированном стенде на базе мюонного годоскопа УРАГАН было установлено что средний отклик по площади ОКП_1 составляет 10.44 пКл, для ОКП_2 – 11.12, пКл, неоднородность отклика составляет 14.6% и 16.3% для ОКП_1 и ОКП_2 соответственно.

Наша команда

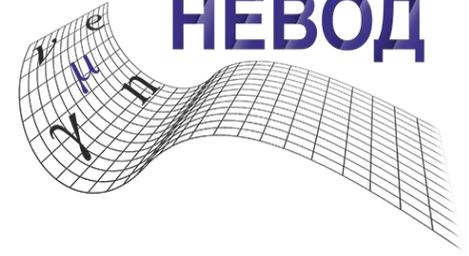


- Д.ф.-м.н, проф. Яшин Игорь Иванович.
- Д.т.н., с.н.с. Компаниец Константин Георгиевич.
- К.ф.-м.н, с.н.с. Шутенко Виктор Викторович.
- К.ф.-м.н, м.н.с. Пасюк Никита Александрович.
- Инж. 2 кат. Целиненко Максим Юрьевич, аспирант
- Инж. 2 кат. Хомчук Евгений Павлович, аспирант
- Лаборант Снытко Леонид Михайлович, бакалавр.

+ все сотрудники НОЦ НЕВОД



Научно-образовательный центр
НЕВОД



Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

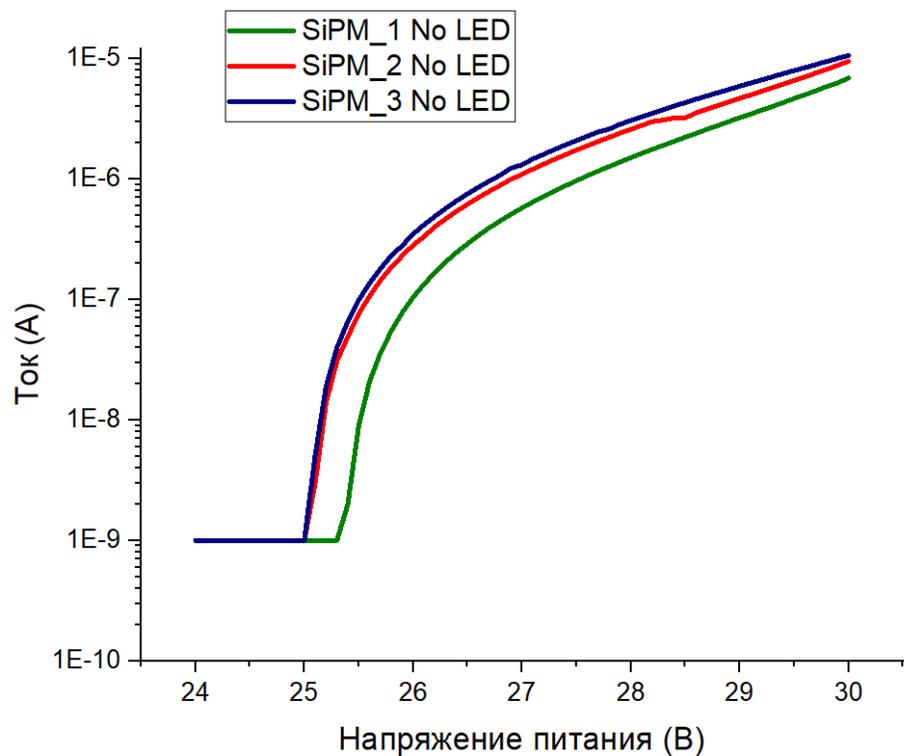
MYTselinenko@mephi.ru

г. Новосибирск
10-13 марта 2026 г.

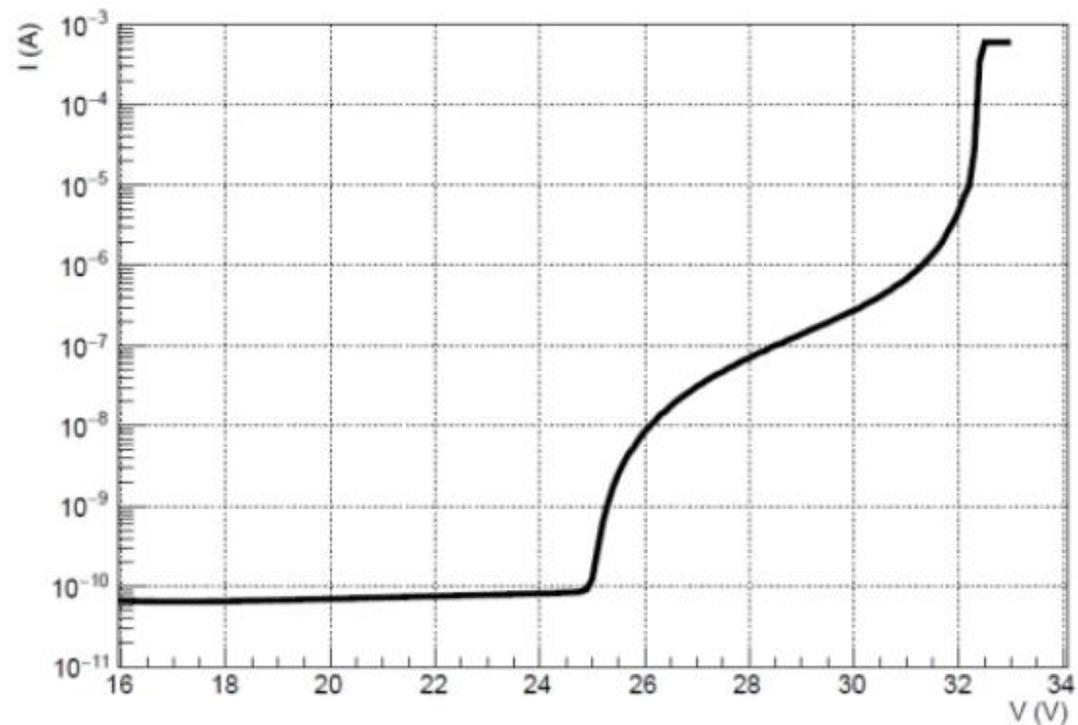


Приложение 1

ВАХ для трех кремниевых фотоумножителей



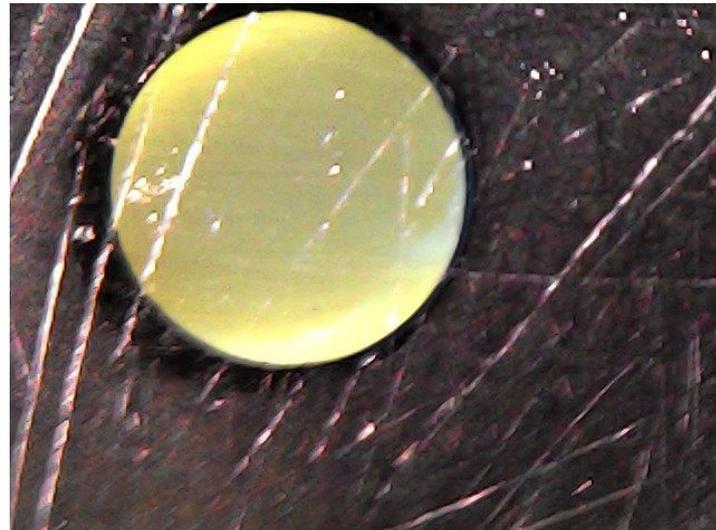
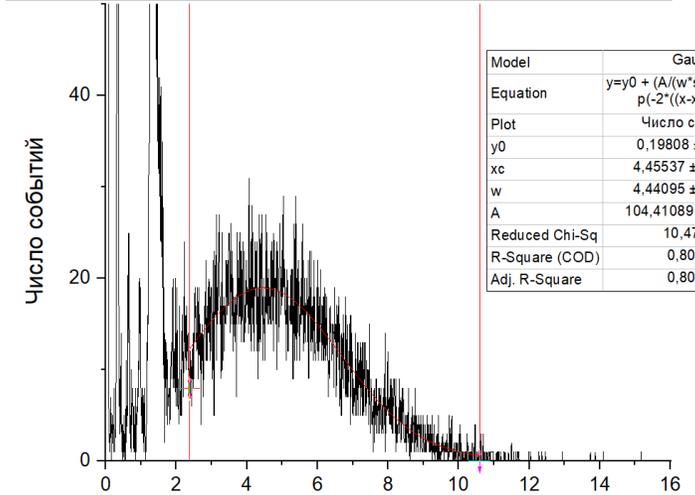
Типичная ВАХ кремниевого фотоумножителя



Приложение 2



— Поточное тестирование
 — Gauss Fit of strip_205_AP_SP_90cm G"Число событий"



— Обработка образцом + полироль для блеска
 — Gauss Fit of strip_205_ACAEN_22_blesk_90cm D"Число событий"

