

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

Калибровка детектора реакторных антинейтрино ТАО
с помощью светового источника

Выступающий: П. В. Рудаков
Руководитель: н.с. НИИЯФ МГУ, к.ф.-м.н. М. Б. Громов

27 мая 2026

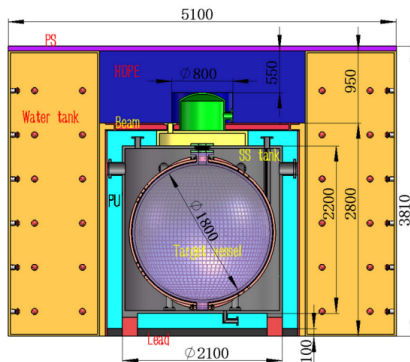
Детекторы JUNO и TAO

- Цель — определение иерархии нейтринных масс
- JUNO:
жидкосцинтилляционный детектор (20 кт), 52,5 км от АЭС Янцзян и Тайшань
- TAO: малый детектор (2,8 т, 1 т в доверительном объёме) в 44 м от реактора
- Измеряет модельно-независимый опорный спектр
- Регистрация антинейтрино по обратному β -распаду:
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



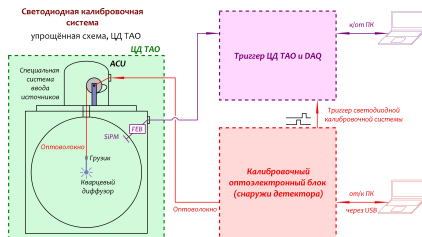
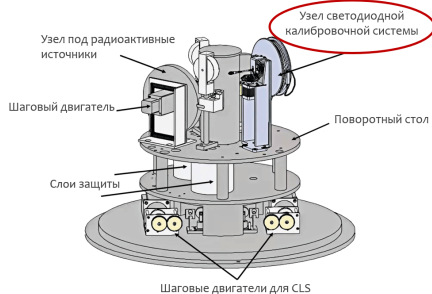
Детектор TAO

- 2,8 т гадолиний-содержащего жидкого сцинтиллятора
- 4024 матрицы SiPM ($50 \times 50 \text{ мм}^2$, по 32 SiPM в каждой, 8048 каналов сбора данных)
- Температура эксплуатации: -50°C
- 94% покрытие внутренней поверхности фотодетекторами
- Беспрецедентное энергетическое разрешение: $< 2.8\%$ при 1 МэВ
- Высокие требования к калибровке детектора



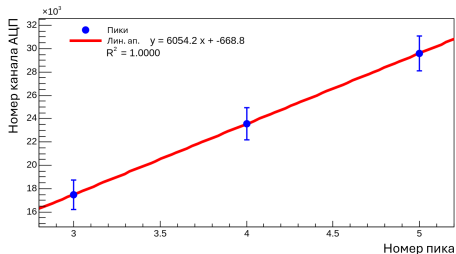
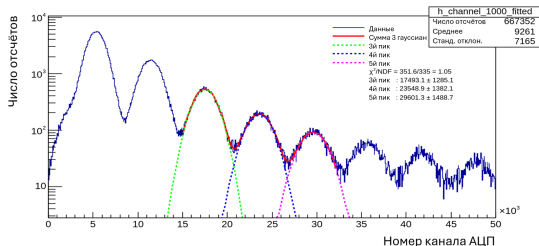
Калибровочные системы TAO

- Автоматизированная система калибровки (ACU) + кабельная петлевая система (CLS)
- Радиоактивный источник ^{68}Ge и светодиодная калибровочная система — калибровка усиления SiPM
- Светодиодная калибровочная система:
 - ▶ калибровка усиления SiPM
 - ▶ калибровка эффективности SiPM
 - ▶ временная синхронизация
 - ▶ мониторинг свойств сцинтиллятора
- Проблема: поломка ACU на этапе пусконаладки $\Rightarrow$ необходима валидация через моделирование



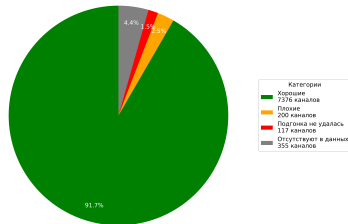
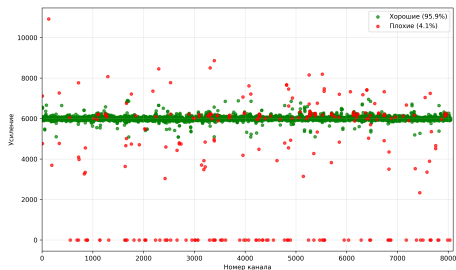
Методика измерения коэффициента усиления SiPM

- Данные: спектры собранного заряда АЦП для каждого из 8048 каналов
- Отбор по временным меткам: 240–400 нс — подавление шумов, улучшение видимости пиков
- Мультигауссова подгонка пиков 3, 4, 5
- Коэффициент усиления = наклон линейной зависимости положения пика от номера пика
- Калибровка ^{68}Ge $\Rightarrow$ Создание Монте-Карло модели $\Rightarrow$ Моделирование калибровки светодиодной калибровочной системой $\Rightarrow$ Реальная калибровка

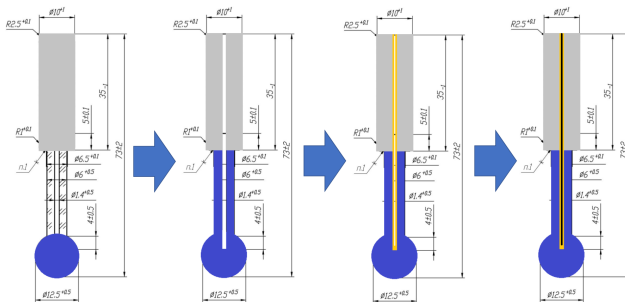


Результаты калибровки с ^{68}Ge

- Измерены коэффициенты усиления всех 8048 каналов SiPM
- Каналы классифицированы как «хорошие» ($\chi^2/\text{ndf} \in [0,72; 4]$ и коэффициент усиления $\in [5000; 7000]$) и «плохие»
- Для «плохих» каналов — рекомендации: оптимизация напряжения питания, проверка FEB-модулей, качества соединений



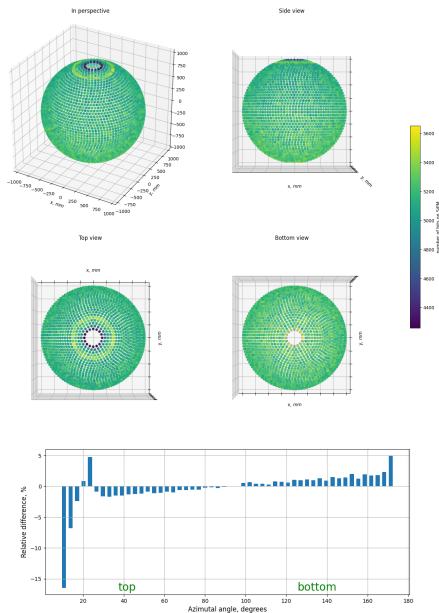
Монте-Карло модель светодиодной калибровочной системы



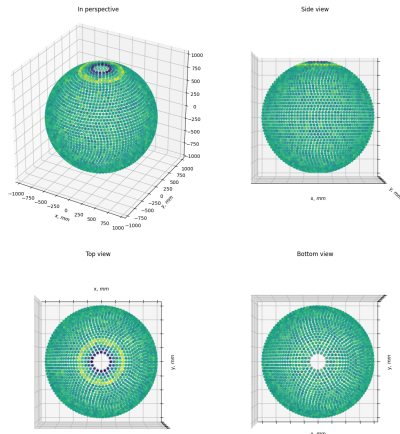
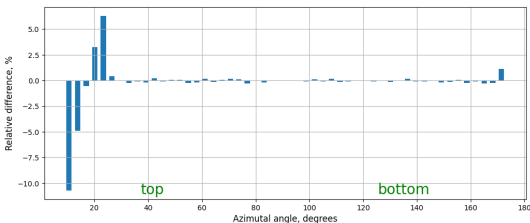
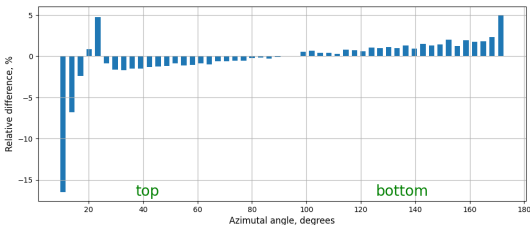
- Разработано с использованием Geant4 + SNIpER
- Создан генератор OptGunGenTool:
 - ▶ до 10^7 оптических фотонов на вспышку
 - ▶ изотропный и конический режимы излучения
 - ▶ моноэнергетические фотоны
- Построена геометрическая модель диффузора и грузика (кварцевая сфера, инваровый цилиндр, клеевой слой, канал оптоволокну)
- Оптимизация: время счёта $12 \text{ мин} \rightarrow 0,7 \text{ мин}$; логи $1 \text{ ГБ} \rightarrow 130 \text{ КБ}$

Кольцевая и отражённая засветка

- **Кольцевая засветка** в верхней полусфере — свет уходит через канал оптоволокну (клей — световод)
 - ▶ Тест: «толстое волокно» полностью убирает кольцо
- **Отражённая засветка** в нижней полусфере — отражение от инварового груза
 - ▶ Тест: коэффициент отражения инвара = 0 → эффект исчезает
- **Рекомендации:** зачернить поверхность груза



Чувствительность к вертикальному сдвигу источника



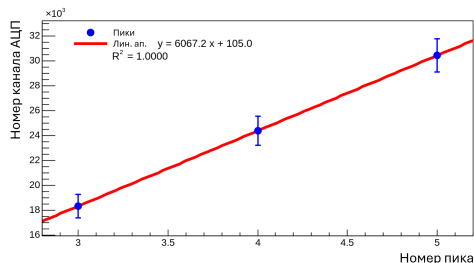
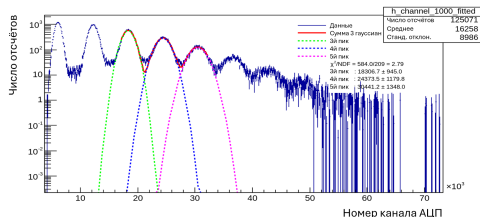
- Сдвиг диффузора вверх на 8 мм (дно кварцевой сферы — в центре мишени)
- Исходная асимметрия «верх–низ» полностью исчезает
- **Рекомендация:** позиционировать диффузор так, чтобы центр излучения вторичных фотонов находился точно в центре мишени

Постановка МК-моделирования

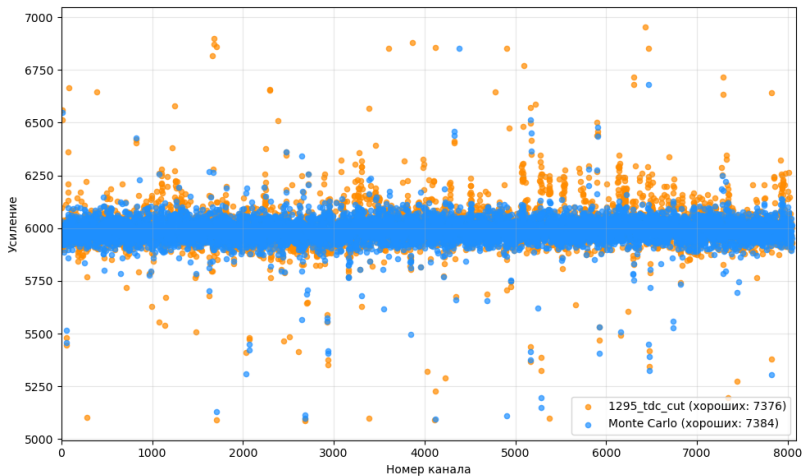
- Реальные усиления SiPM интегрированы в MC-модель детектора
- Параметры моделирования:
 - ▶ энергия фотонов: 4,7 эВ (УФ)
 - ▶ угол раствора конуса: 24°
 - ▶ число фотонов на вспышку: 70 000
- Полная геометрия детектора ТАО
- Вычислительный кластер ОИЯИ (HTCondor)
- 10^5 событий (1000 задач $\times$ 100 событий)
- Обработка по той же методике, что и с источником ^{68}Ge

Результаты моделирования: спектры и аппроксимация

- Успешное воспроизведение методики калибровки в моделировании
- Чёткое выделение фотоэлектронных пиков
- Форма спектров хорошо согласуется с реальными данными



Сравнение усилений: МК и эксперимент



- Наложение распределений коэффициентов усиления «хороших» каналов из двух выборок: МК и экспериментальной (модельный и источник ^{68}Ge)

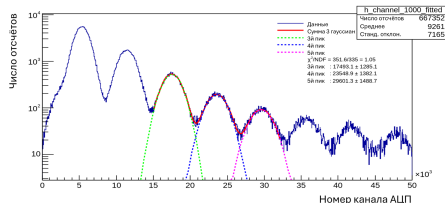
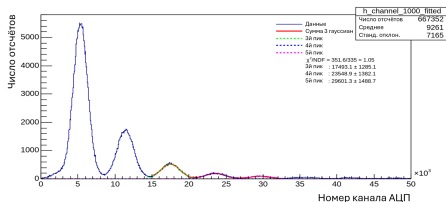
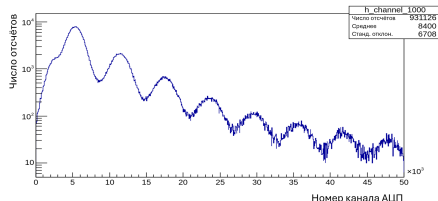
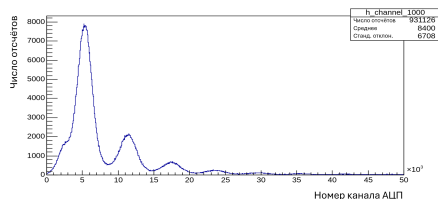
Выводы

- 1 Выполнены измерения коэффициентов усиления кремниевых фотоумножителей в детекторе ТАО с помощью источника ^{68}Ge .
- 2 Разработана и внедрена в ПО Монте-Карло модель светодиодной калибровочной системы детектора ТАО.
- 3 Измеренные коэффициенты усиления SiPM включены в качестве параметров модели.
- 4 С помощью моделирования подтверждена возможность использования светодиодной калибровочной системы для определения коэффициентов усиления SiPM детектора ТАО.
- 5 Проведённые работы — основа для подготовки калибровочных процедур.

Спасибо за внимание!

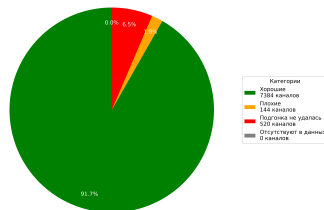
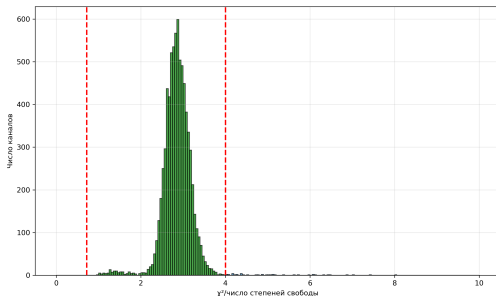
Запасные слайды

Спектры запуска номер 1295



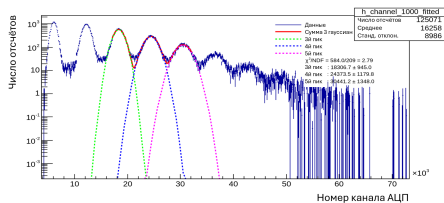
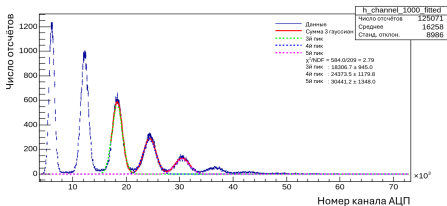
Верхний ряд — без отбора по временным меткам, нижний — с отбором. Слева — линейная шкала, справа — логарифмическая.

МК: качество подгонки и статус каналов



Распределение χ^2/ndf по каналам в МК и круговая диаграмма классификации.
Критерии те же, что для экспериментальных данных.

МК: качество подгонки и статус каналов



Результаты Монте-Карло моделирования в линейном и логарифмическом масштабах

