

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЧАСТИЦ

Студент

Л. С. Аюков

Научный руководитель

И. Г. Григорьева

Научный консультант

А. П. Ивашкин

Цели и задачи исследования

- сборка и настройка детекторной установки на основе сцинтилляционного телескопа, состоящего из 20 сегментированных сцинтилляционных дисков, с использованием кремниевых фотоумножителей в качестве фотоприёмников;
- составление карты каналов для идентификации соответствия между номером канала в регистрирующей программе и его реальным физическим положением на электронной плате
- проведение серии измерений с мюонами космических лучей для построения энергетических спектров;
- энергетическая калибровка каналов детектора с использованием сигнала от мюонов как минимально ионизирующих частиц с известным энерговывделением;
- регистрация электронов с использованием источника ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ и построение их энергетических спектров;

Описание детектора

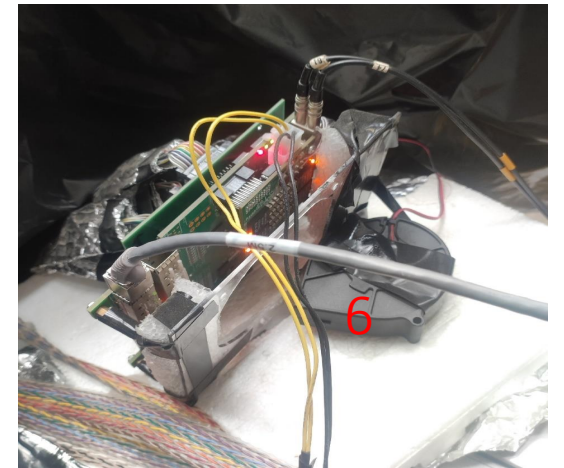
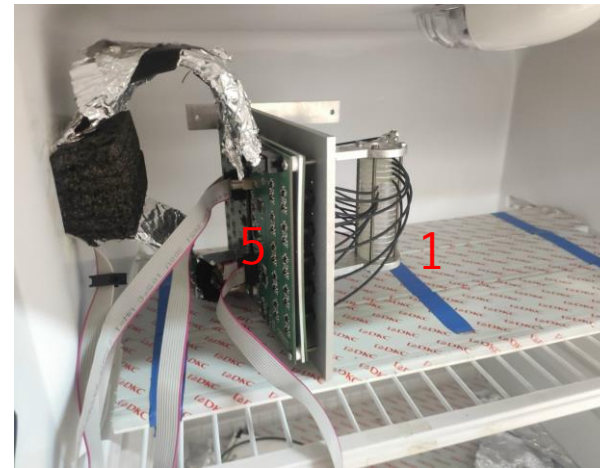
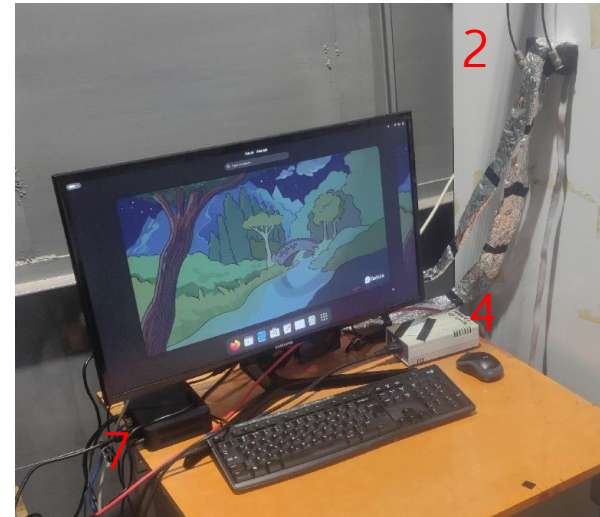
- Активный объём: 20 независимых сцинтилляционных дисков (полистирол, толщина 4 мм, диаметр 3 см)
- Оптическая изоляция: каждый диск обернут в высокоотражающую плёнку Tyvek (повышает светосбор, предотвращает перекрёстные помехи)
- Светосбор: спектросмещающие волокна Kuraray Y-11(200) (максимум эмиссии ~ 520 нм)
- Фотодетекторы: кремниевые фотоумножители (SiPM) Hamamatsu S14160-3010PS
- Температурная стабилизация: SiPM на общей теплопроводящей подложке, термопара, программная коррекция напряжения (58.5 мВ/°С)
- Электроника: две платы с 10 SiPM каждая, усилители AD8051ART, дифференциальные усилители THS4531
- Рабочее напряжение: 71.5 В (при +20°С)



Схема экспериментальной установки и фотографии ключевых элементов



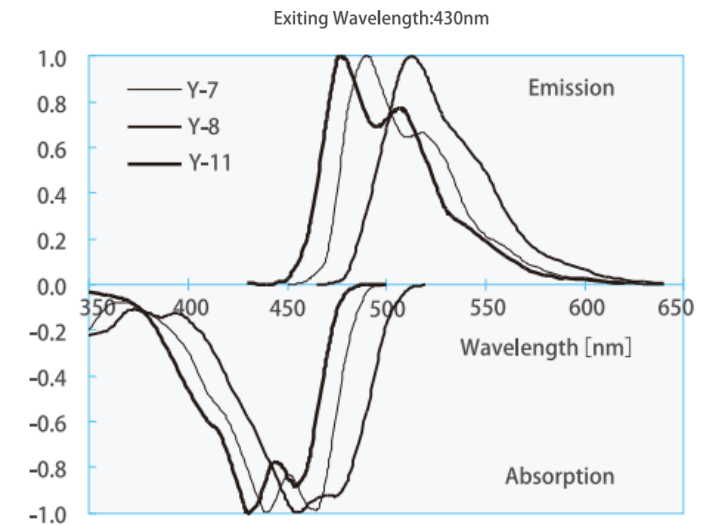
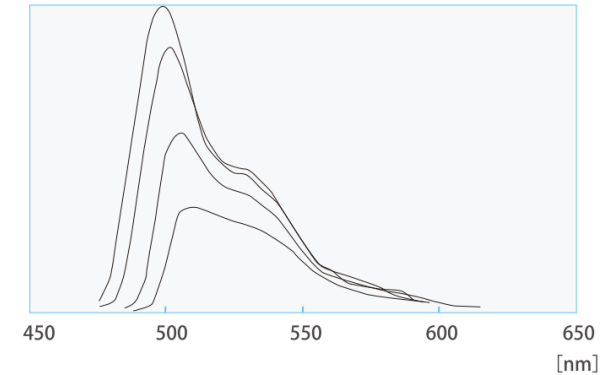
Блок-схема установки



Спектросмещающие оптические волокна Kuraray Y-11(200)

- Тип: многооболочечные (multi-cladding) → более высокий световыход по сравнению с однооболочечными
- Пик эмиссии: $\approx 500\text{--}520$ нм (зелёная область, хорошо согласуется с SiPM)
- Длина затухания: > 3.5 м (эффективная транспортировка на расстояние до фотодетектора)
- Эффективность захвата света: 5.4% (для многооболочечного волокна)
- Применение: индивидуальный подвод волокна к каждому диску → оптическая изоляция каналов

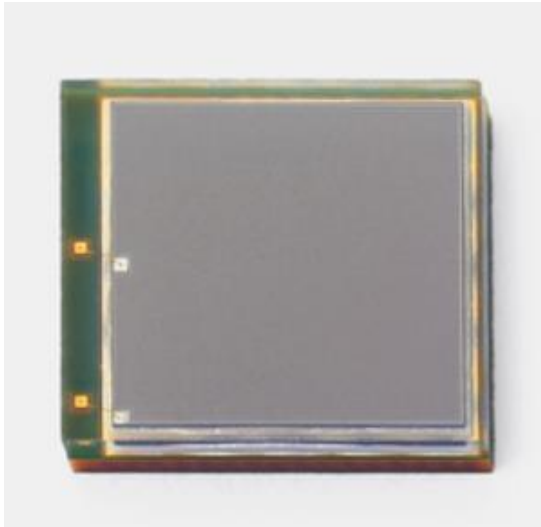
Y-11(200)



Спектры эмиссии и поглощения волокна Y-11(200)

SiPM Hamamatsu S14160-3010PS

- Размер пикселя (ячейки): 10 мкм
- Фоточувствительная площадь: $3 \times 3 \text{ мм}^2$
- Коэффициент усиления: $\sim 1.8 \times 10^5$
- Рабочее напряжение: $\approx 43 \text{ В}$
- Время восстановления ячейки: $\sim 10 \text{ нс}$



Внешний вид SiPM Hamamatsu S14160-3010PS

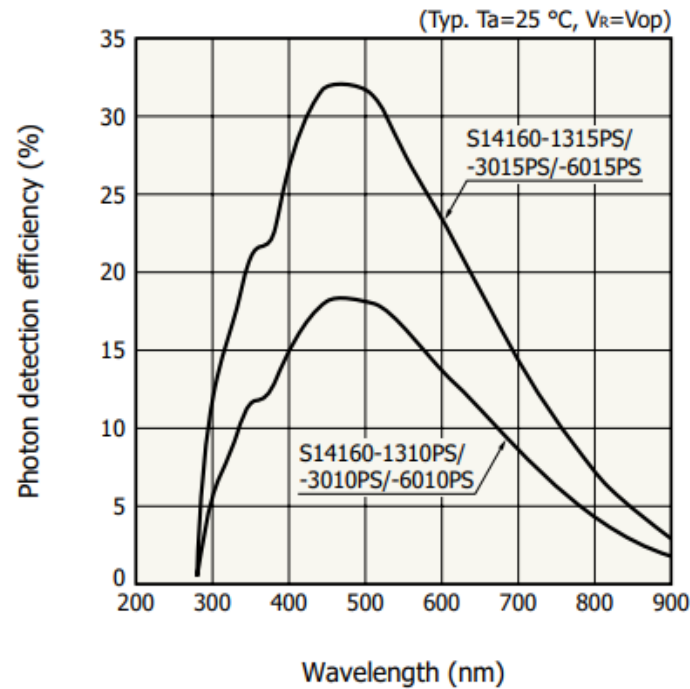


График зависимости эффективности регистрации фотона от длины волны излучения

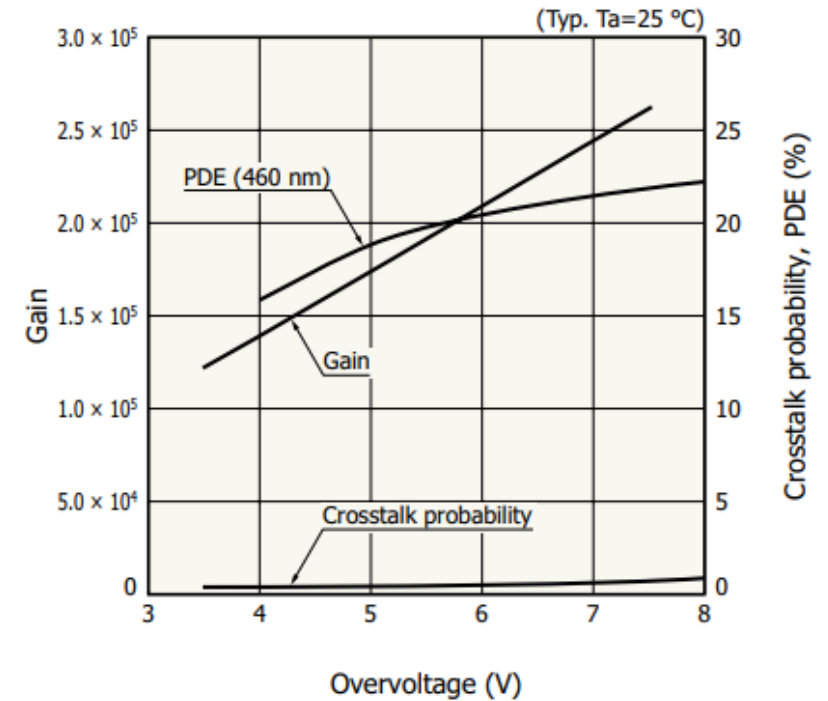
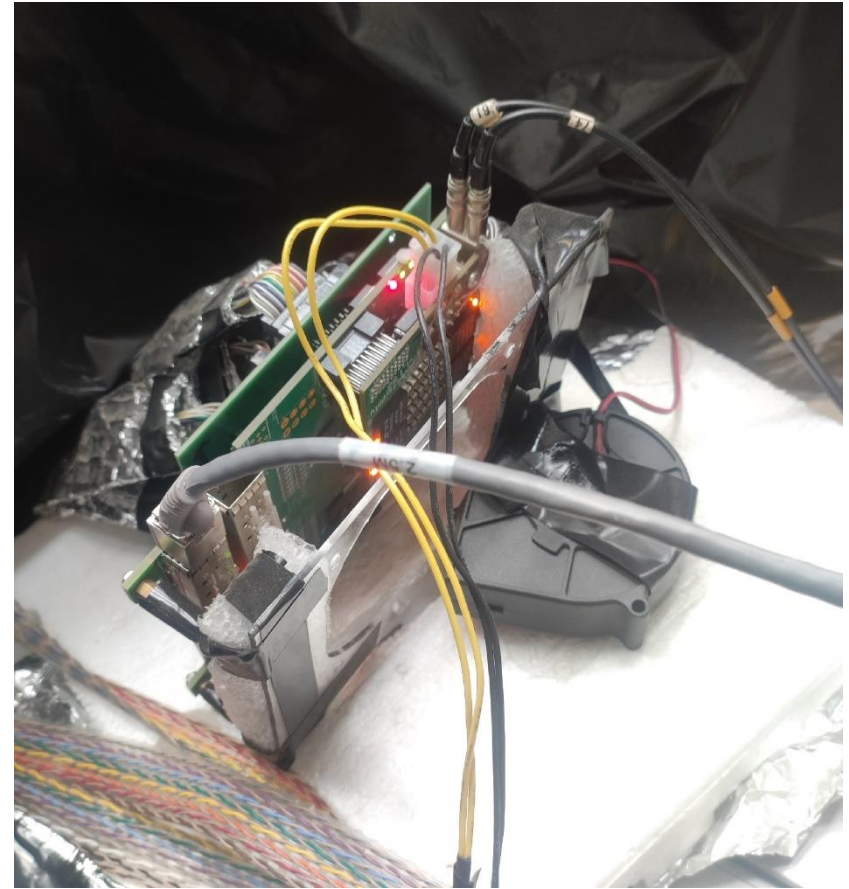


График зависимости коэффициента усиления от перенапряжения

Аналого-цифровой преобразователь ADC64

- Количество каналов: 64 (в работе задействовано 20)
- Разрядность: 12 бит (4096 отсчётов)
- Частота оцифровки: 62.5 МГц → шаг 16 нс
- Максимальная ширина кадра: 2048 отсчётов (~33 мкс)
- Формат данных: data (бинарные файлы)
- Оптимизация: Zero Suppression (подавление каналов с сигналом ниже порога)



Внешний вид 64-канального АЦП ADC64

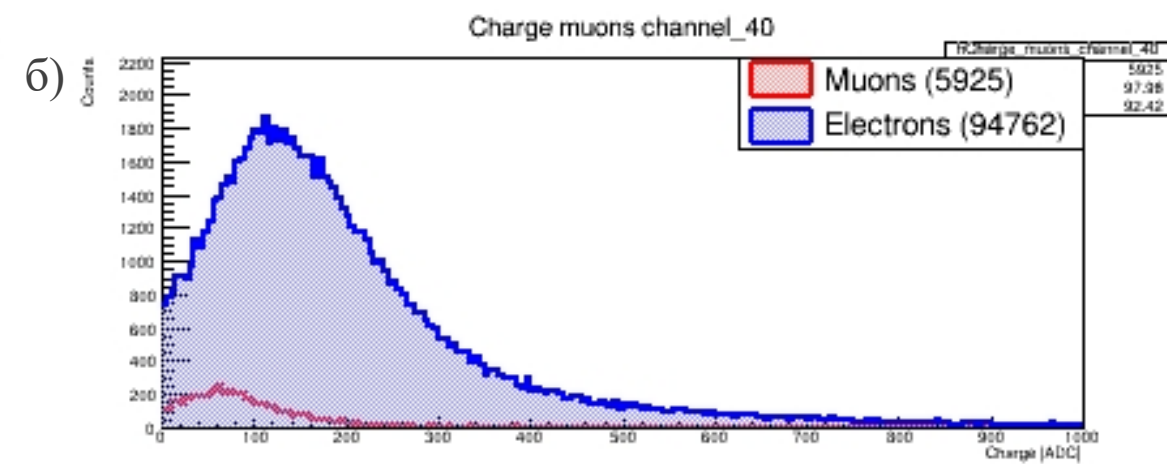
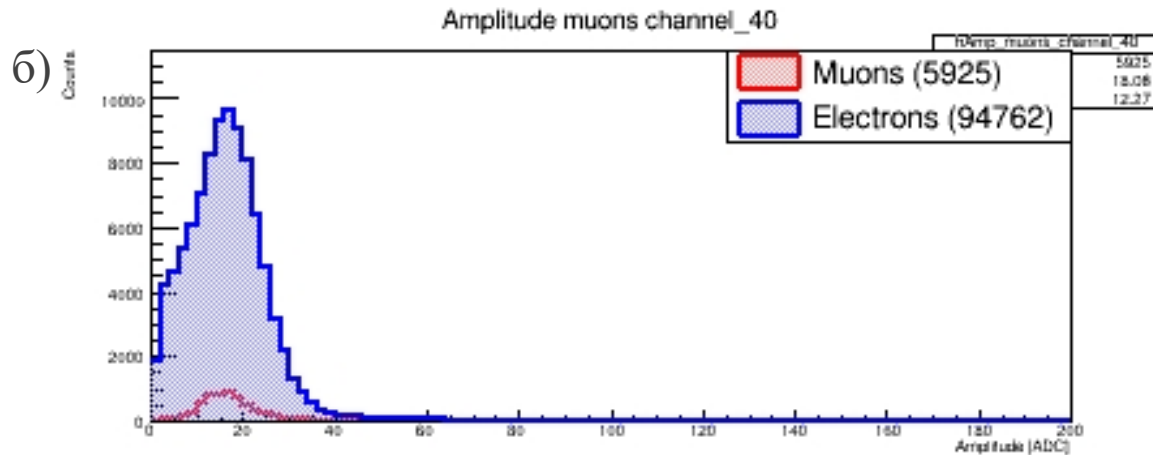
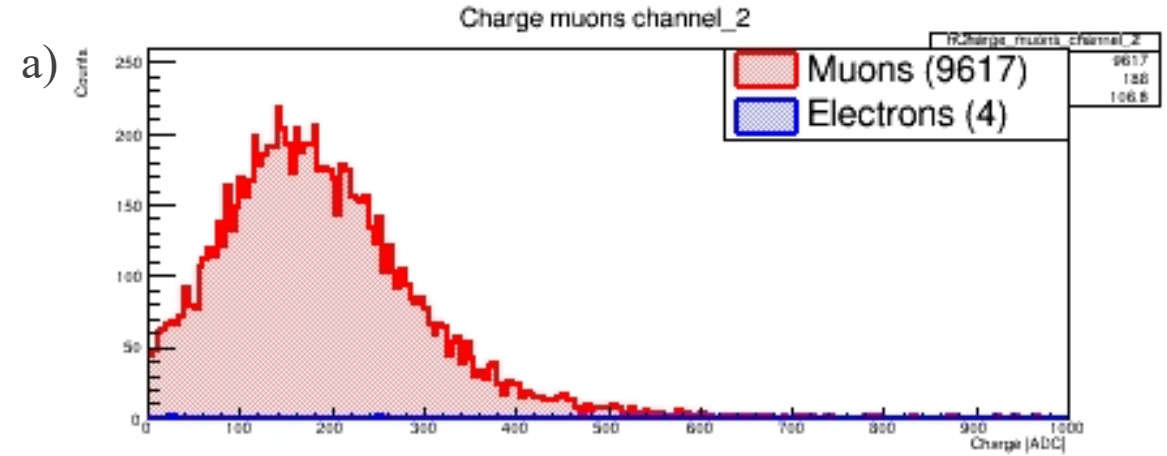
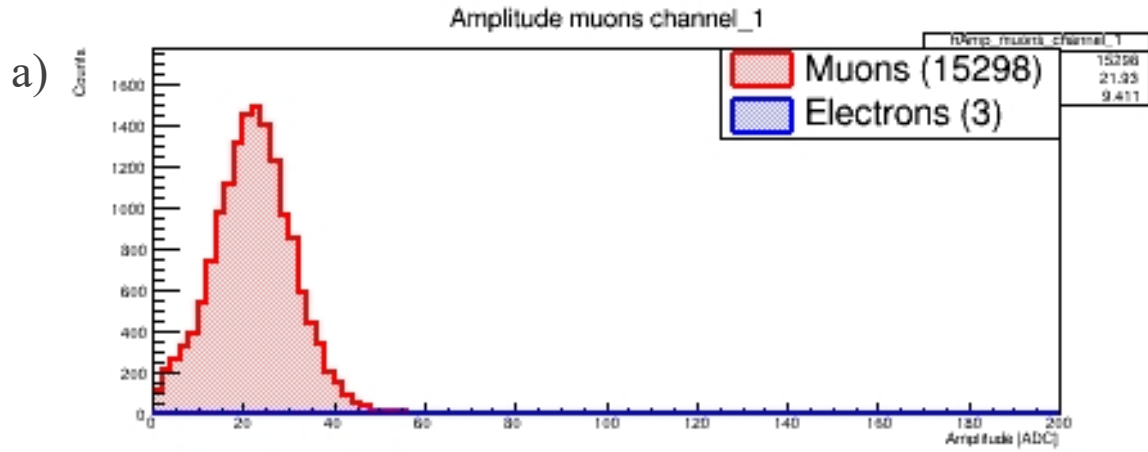
Карта каналов детектора

- Цель: установить соответствие между номером канала в программе и физическим расположением диска/платы
- Метод: облучение дисков источником Sr-90 и анализ интенсивности регистрации в программе afi-adc64
- Выявлены неработающие каналы:
 - 1) Канал 23 (1-й диск сверху) – предположительно внутренние повреждения
 - 2) Канал 37 (5-й диск снизу) – отсоединившееся оптоволокно (изолировано фольгой)
- Каналы с пониженной эффективностью: 21 и 31 (событий на порядок меньше)

	1 модуль	2 модуль
1	37 (5 нижний)	21(5 верхний)
2	45 (4 нижний)	29 (4 верхний)
3	38 (3 нижний)	22 (3 верхний)
4	46 (2 нижний)	30 (2 верхний)
5	39 (1 нижний)	23 (1 верхний)
6	47 (10 нижний)	31 (10 верхний)
7	0 (9 нижний)	48 (9 верхний)
8	8 (8 нижний)	56 (8 верхний)
9	1 (7 нижний)	49 (7 верхний)
10	9 (6 нижний)	57 (6 верхний)

Схема соответствия каналов (карта каналов)

Мюонные и электронные пики



Гистограммы распределения амплитуды: а) без электронного пика; б) с электронным пиком

Гистограммы распределения заряда: а) без электронного пика; б) с электронным пиком

Селектирующие условия для выделения сигнала

- Условия для мюонов:

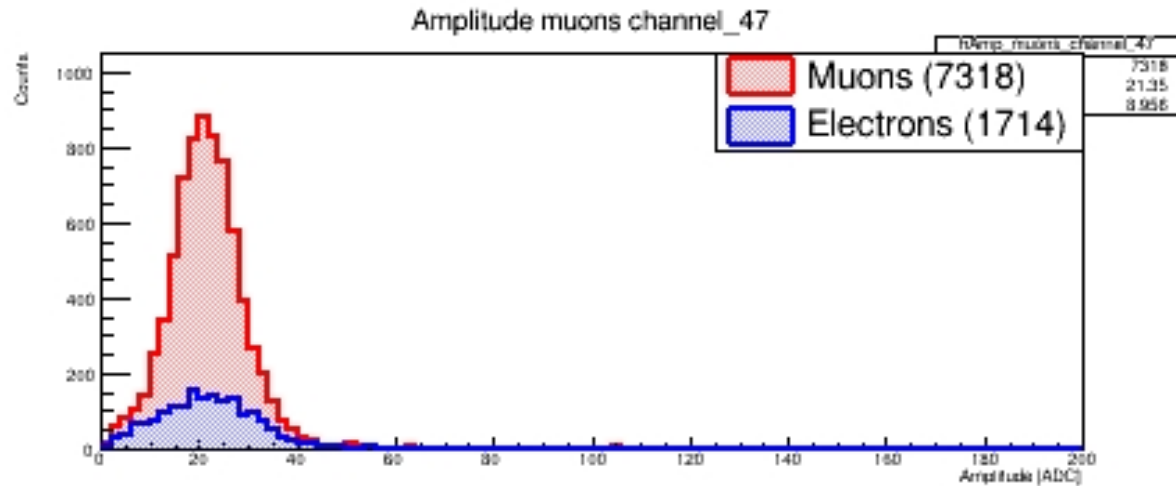
Множественность (количество сработавших дисков)

Физический смысл: мюон – минимально ионизирующая частица, пронизывает весь детектор насквозь

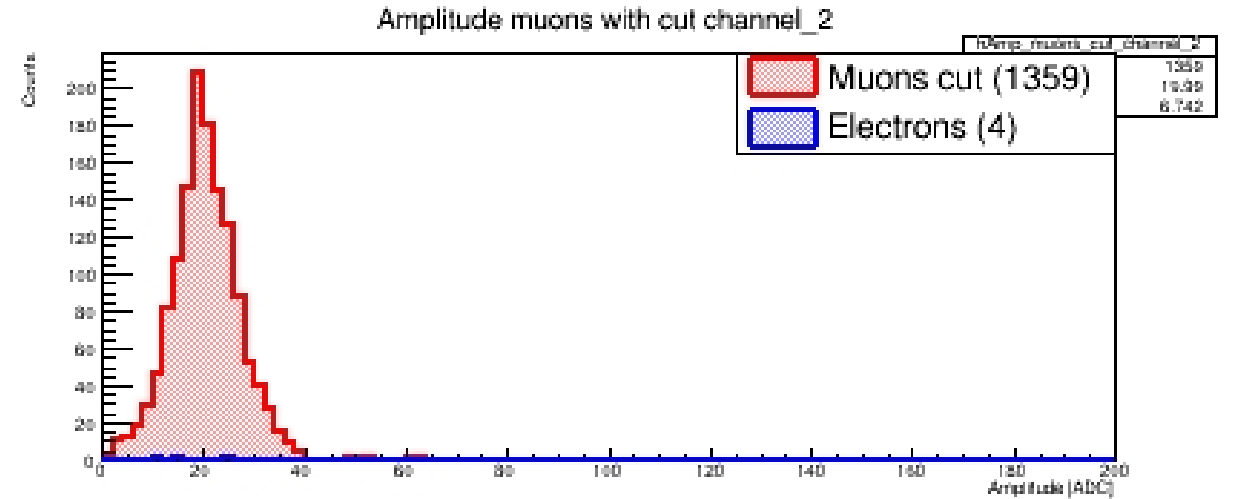
- Условия для электронов (источник Sr под нижним диском):

Первым сработавшим каналом должен быть канал 39 (ближайший к источнику)

Дополнительно: регистрация в каналах 39 и 46 (два нижних диска)



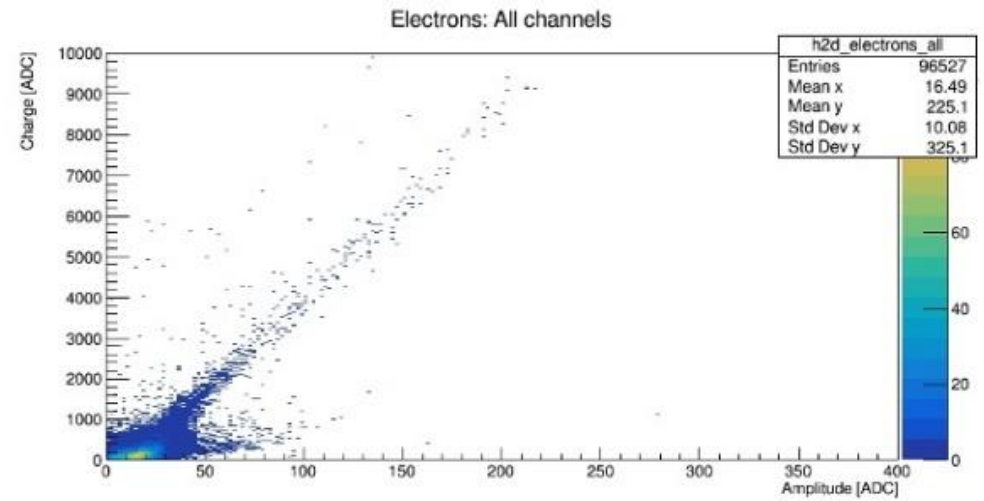
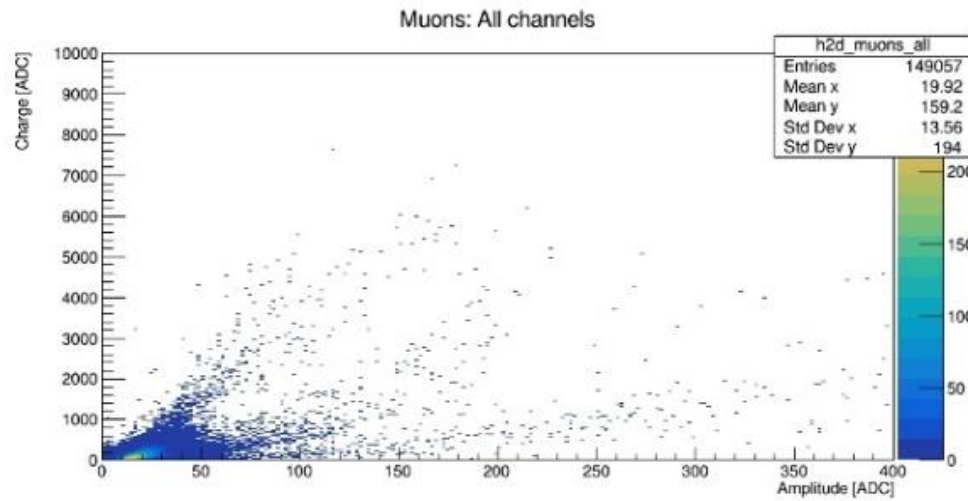
Сравнение электронного и мюонного пиков во втором снизу сцинтиляционном диске



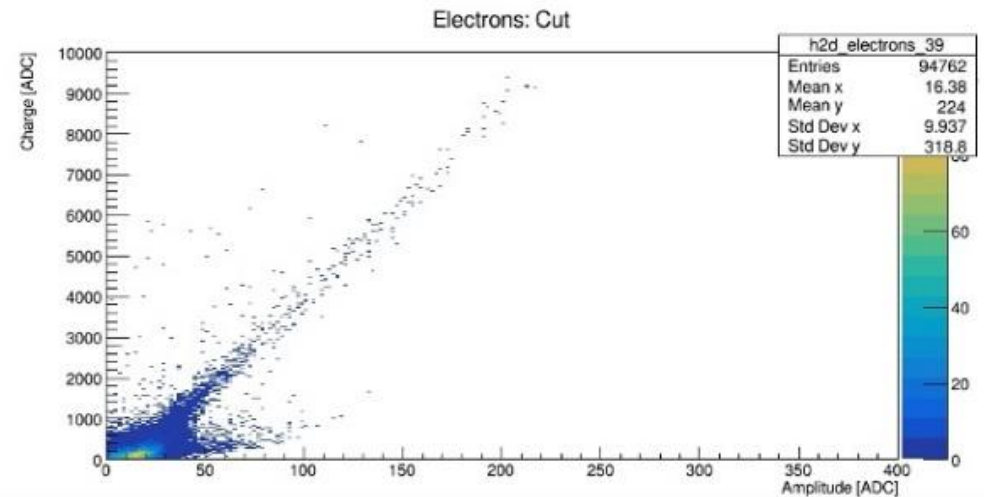
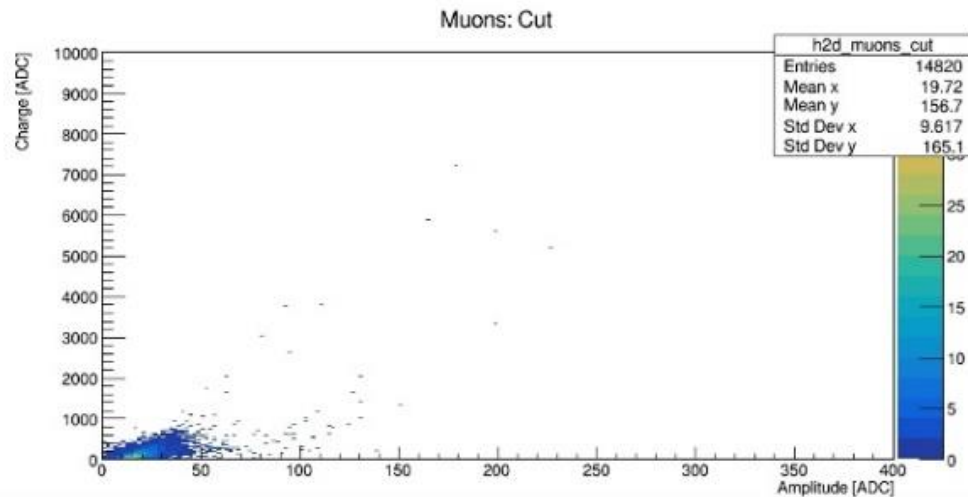
Мюонный пик после применения селектирующих условий

Внешние виды двумерных гистограмм заряда от амплитуды

а)



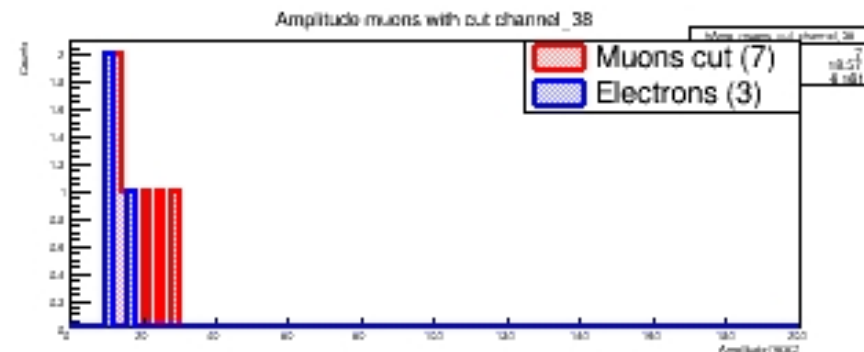
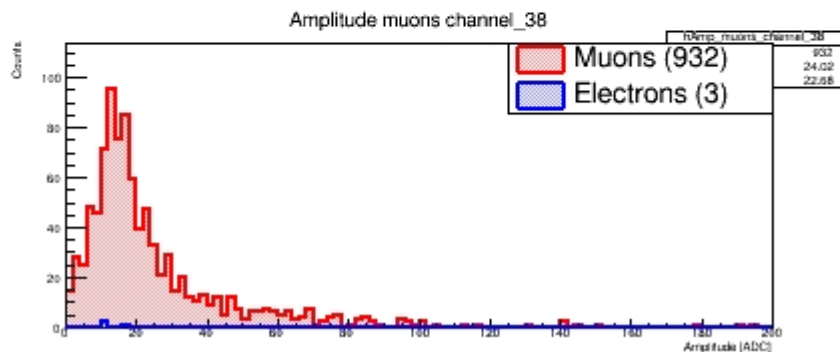
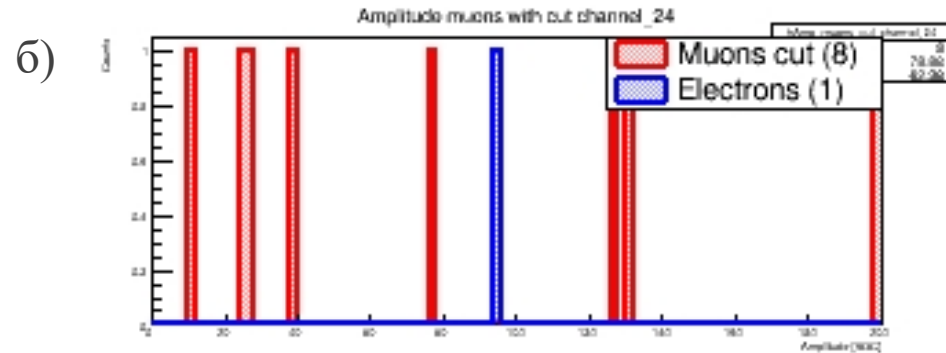
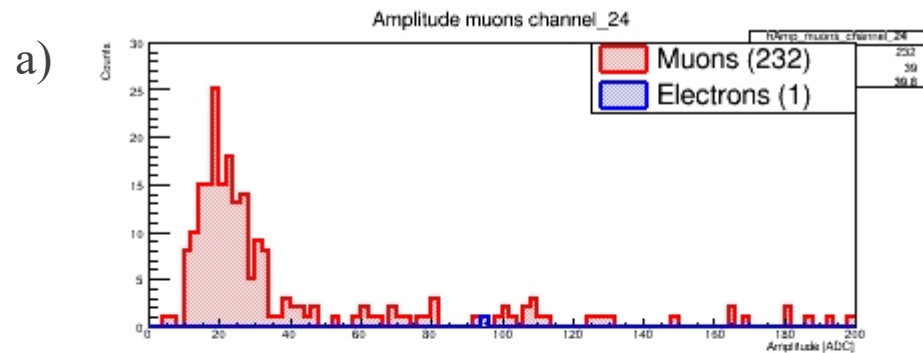
б)



Двумерные распределения зависимости заряда от амплитуды: а) без применения селектирующих условий; б) после применения селектирующих условий

Результат применения селектирующих условий для неработающих каналов

Селектирующие условия эффективно подавляют шумовые события и подтверждают неработоспособность каналов 23 и 37



Гистограммы распределения амплитуды для неработающих каналов: а) до применения селектирующих условий; б) после применения селектирующих условий

Энергетическая калибровка каналов детектора

- Аппроксимация амплитудных спектров: функция распределения Ландау (флуктуации энерговыделения МР в тонком сцинтилляторе)
- Формула калибровочного коэффициента:

$$k_i = \frac{E_0}{MPV_i},$$

где $E_0 = 0.82$ МэВ – наиболее вероятные потери энергии (MPV) для мюона в пластике 1 см
 MPV_i – наиболее вероятная амплитуда в каналах АЦП (результат фита Ландау)

- Погрешность коэффициента

$$\Delta k_i = k_i \cdot \frac{\Delta MPV_i}{MPV_i},$$

где ΔMPV_i — ошибка определения наиболее вероятной амплитуды, полученная из процедуры аппроксимации.

- Коэффициенты для каналов 23 и 37 отсутствуют из-за механических повреждений
- Коэффициент для канала 31 отсутствует из-за недостатка событий

Канал	Событий	MPV	Калибровочный коэффициент, MeV/ADC
0	1916	19.20 ± 0.26	0.0427 ± 0.0006
1	1359	17.62 ± 0.25	0.0465 ± 0.0007
8	1828	18.20 ± 0.20	0.0451 ± 0.0005
9	1181	14.88 ± 0.24	0.0551 ± 0.0009
21	102	19.17 ± 1.72	0.0427 ± 0.0038
22	292	12.89 ± 0.27	0.0636 ± 0.0013
29	291	13.30 ± 0.31	0.0616 ± 0.0014
30	233	16.69 ± 0.48	0.0491 ± 0.0014
38	905	16.78 ± 0.30	0.0489 ± 0.0009
39	345	13.96 ± 0.26	0.0587 ± 0.0011
45	141	20.25 ± 0.49	0.0405 ± 0.0010
46	565	19.42 ± 0.33	0.0422 ± 0.0007
47	1715	13.22 ± 0.20	0.0620 ± 0.0009
48	1468	18.85 ± 0.28	0.0435 ± 0.0006
49	975	14.44 ± 0.22	0.0568 ± 0.0009
56	268	15.85 ± 0.71	0.0517 ± 0.0023
57	1132	12.79 ± 0.29	0.0641 ± 0.0015

Итоговый энергетический спектр отобранных мюонных событий после калибровки

1. Положение пика (наиболее вероятные потери энергии, MPV) $E_{peak} = 0.922 \pm 0.003$ МэВ

- Хорошо согласуется с теорией для MIP в пластиковом сцинтилляторе толщиной 1 см (ожидаемый диапазон 0.82–1.00 МэВ)

2. Форма спектра характерна для распределения Гаусса

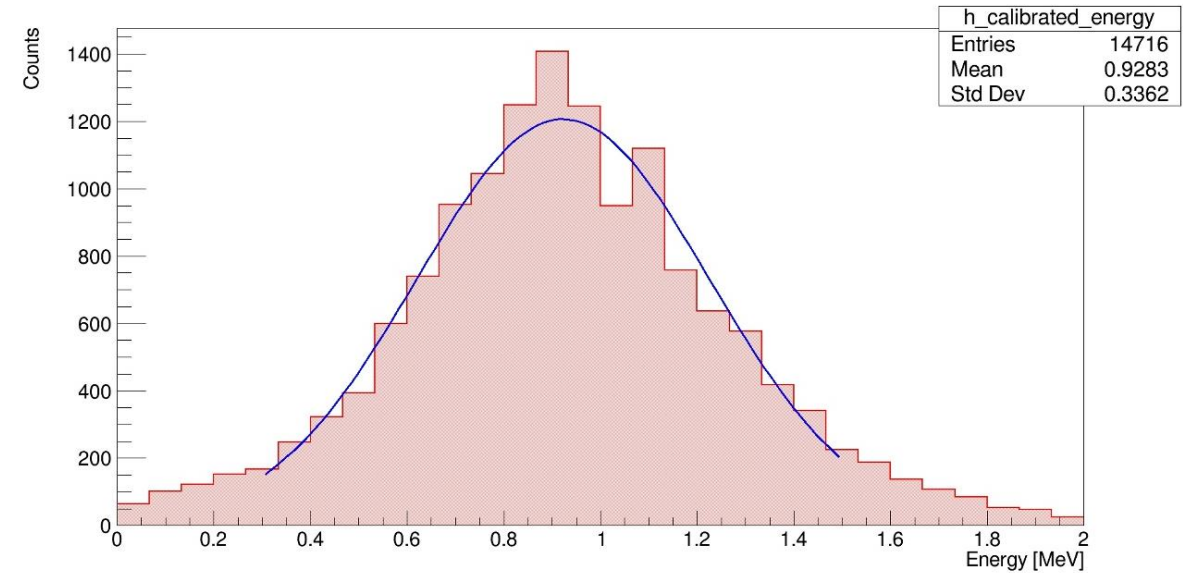
- Подтверждает корректность выделения мюонного сигнала

3. Ширина распределения $\sigma = 0.303 \pm 0.003$ МэВ

- Обусловлена физическими флуктуациями ионизационных потерь в тонком сцинтилляторе

4. Энергетическое разрешение $\Delta E/E = FWHM/E_{peak} \approx 77\%$

- Отражает естественную ширину распределения Гаусса для MIP в тонком сцинтилляторе



Итоговый энергетический спектр отобранных мюонных событий после калибровки

Заключение

В ходе работы были последовательно решены следующие задачи:

- Собрана и настроена детекторная установка на основе сцинтилляционного телескопа, состоящего из 20 сегментированных сцинтилляционных дисков
- Составлена карта каналов детектора, установлено соответствие между номерами каналов в ПО и физическим расположением сцинтилляционных дисков
- Выявлены неработающие каналы (23, 37) и каналы с пониженной эффективностью (21, 31)
- Проведены измерения с мюонами и электронами, подобраны оптимальные пороги триггера
- Построены амплитудные и зарядовые спектры для всех каналов
- Разработаны селективирующие условия: для мюонов — по мультиплетности, для электронов — по первому сработавшему каналу (39)
- Калибровка каналов по мюонному сигналу, перевод сигнала АЦП в энергию (МэВ), построение итоговых энергетических спектров