

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ РЕГЕСТРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЧАСТИЦ

Студент

Л. С. Аюков

Научный руководитель

И. Г. Григорьева

Научный консультант

А. П. Ивашкин

Цели и задачи исследования

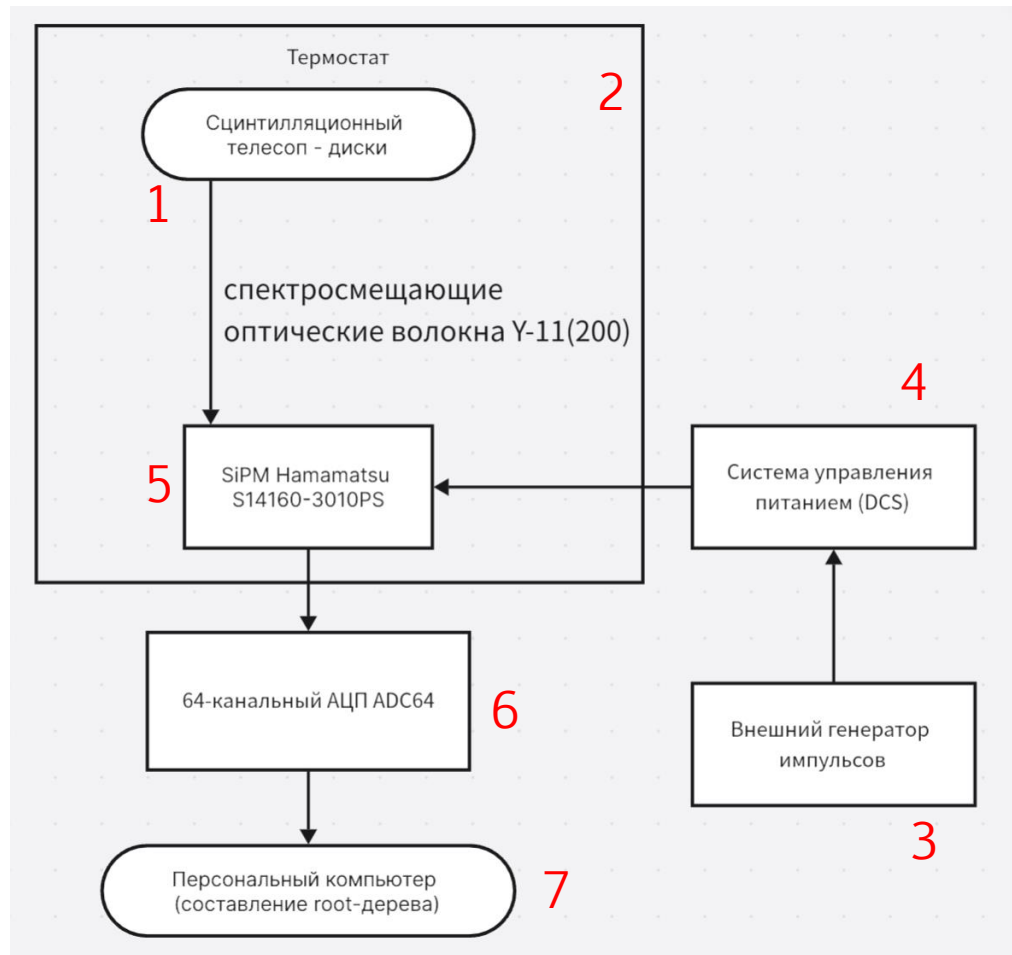
- сборка и настройка детекторной установки на основе сцинтилляционного телескопа, состоящего из 20 сегментированных сцинтилляционных дисков, с использованием кремниевых фотоумножителей в качестве фотоприёмников;
- составление карты каналов для идентификации соответствия между номером канала в регистрирующей 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 энергосодержанием;
- регистрация электронов с использованием источника ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ и построение их энергетических спектров;

Описание детектора

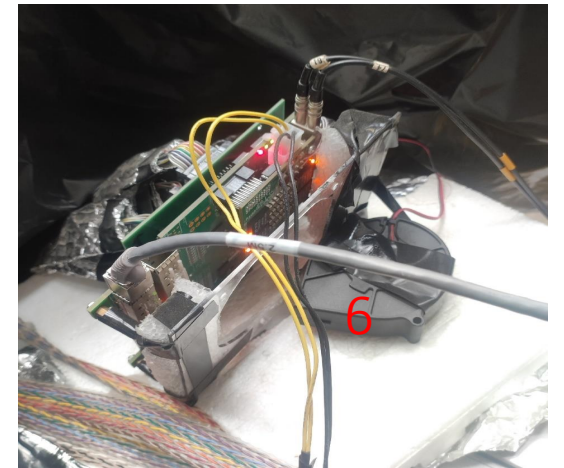
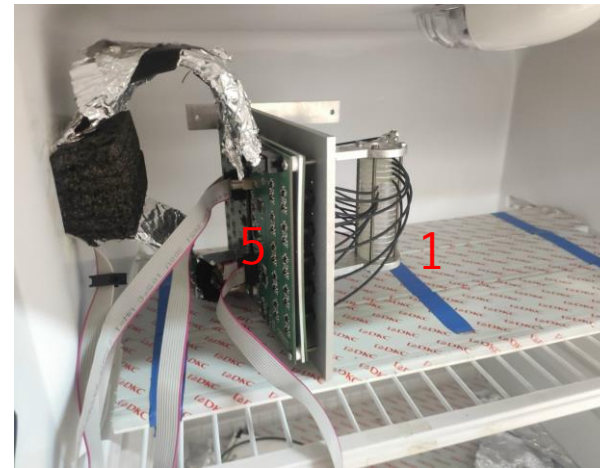
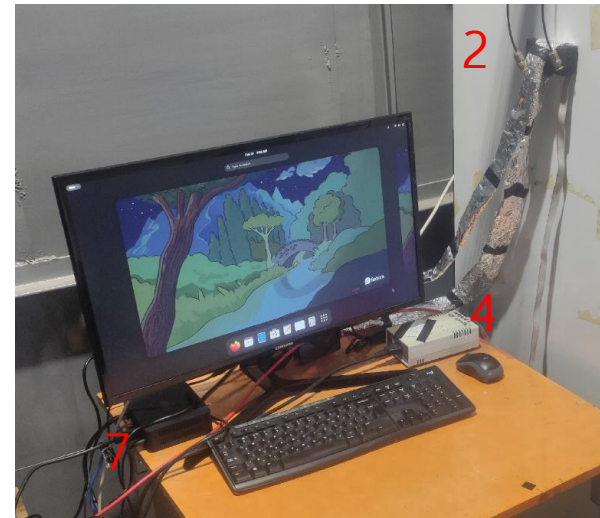
- Активный объём: 20 независимых сцинтилляционных дисков (полистирол, толщина 4 мм, диаметр 3 см)
- Оптическая изоляция: каждый диск обернут в высокоотражающую плёнку Tyvek (повышает светосбор, предотвращает перекрёстные помехи)
- Светосбор: спектросмещающие волокна Kuraray Y-11(200) (максимум эмиссии ~ 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



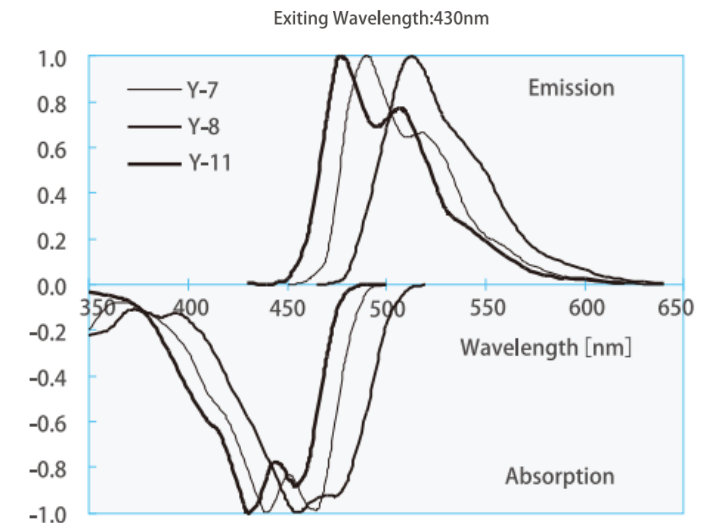
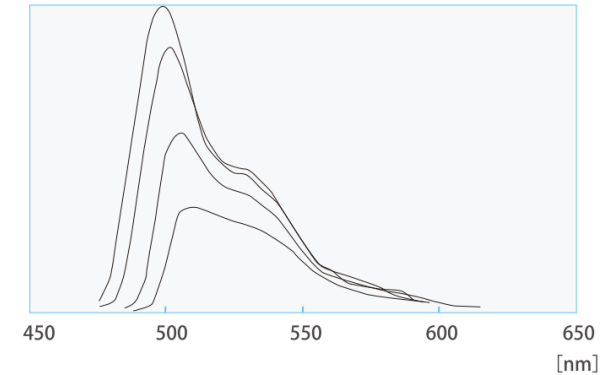
Блок-схема установки



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: $\sim 10 \text{ нс}$

На плате передней электроники сигнал с SiPM поступает на операционный усилитель AD8051ART с коэффициентом усиления 7. Часть сигнала направляется на сумматор для формирования внешнего триггера, а другая часть — на полностью дифференциальный операционный усилитель THS4531. Дифференциальный усилитель преобразует униполярный сигнал в дифференциальный, что позволяет увеличить динамический диапазон и уменьшить влияние внешних электрических помех.

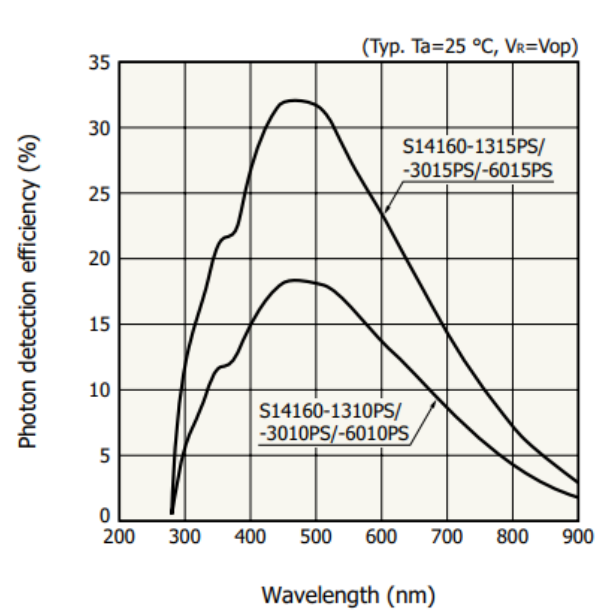


График зависимости эффективности регистрации фотона от длины волны излучения

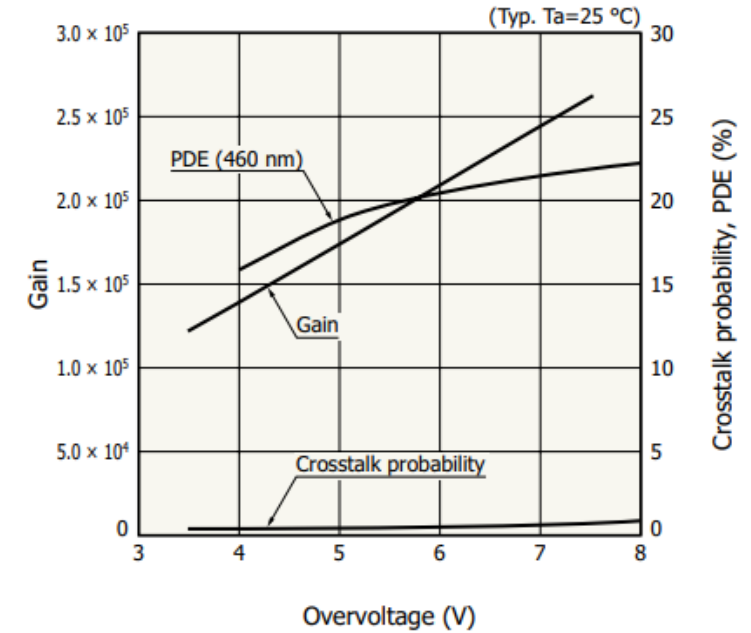
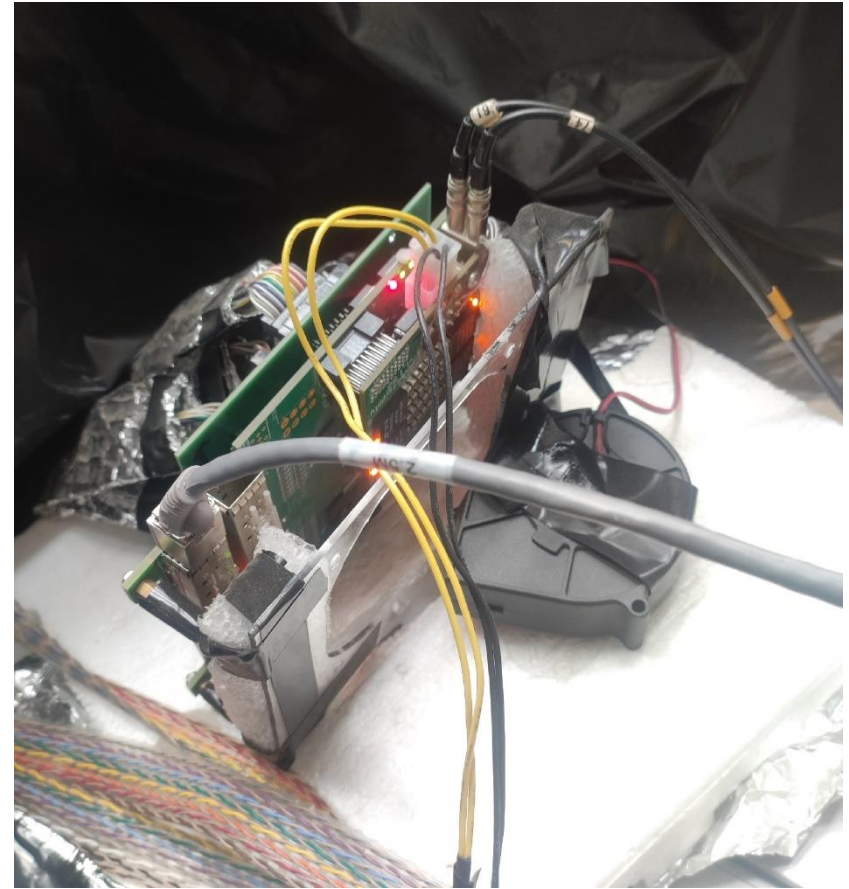


График зависимости коэффициента усиления от перенапряжения

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: root-дерево (пакет ROOT/CERN)
- Оптимизация: Zero Suppression (подавление каналов с сигналом ниже порога)



Внешний вид 64-канального АЦП ADC64

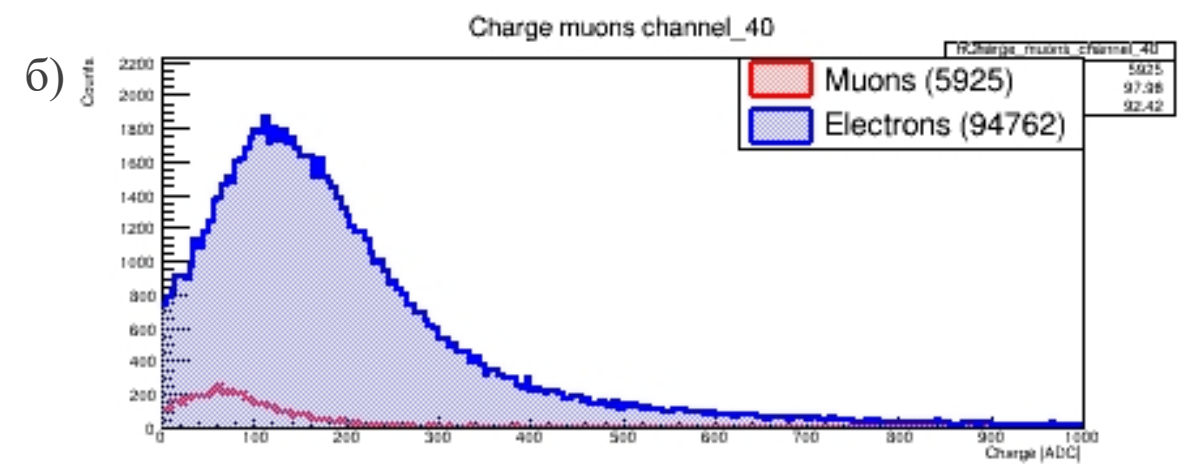
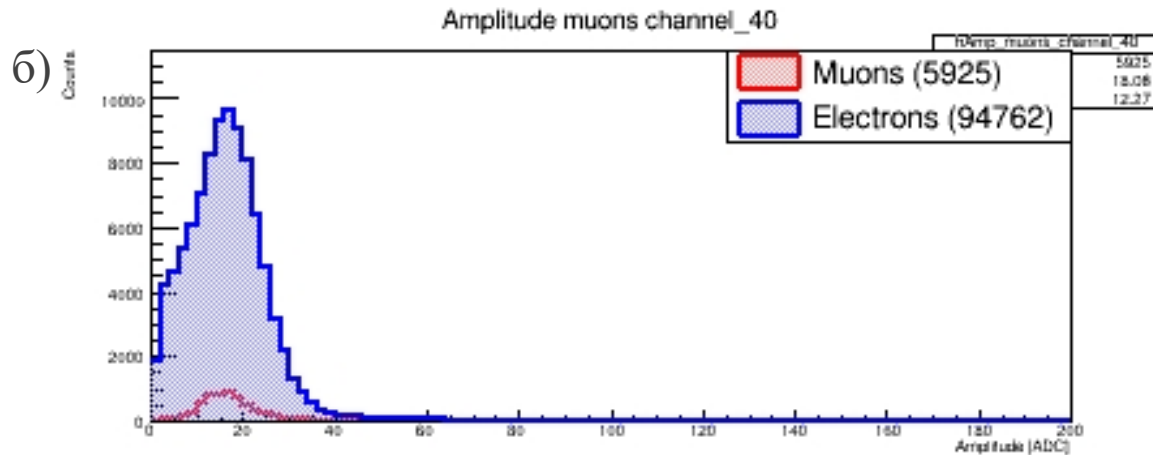
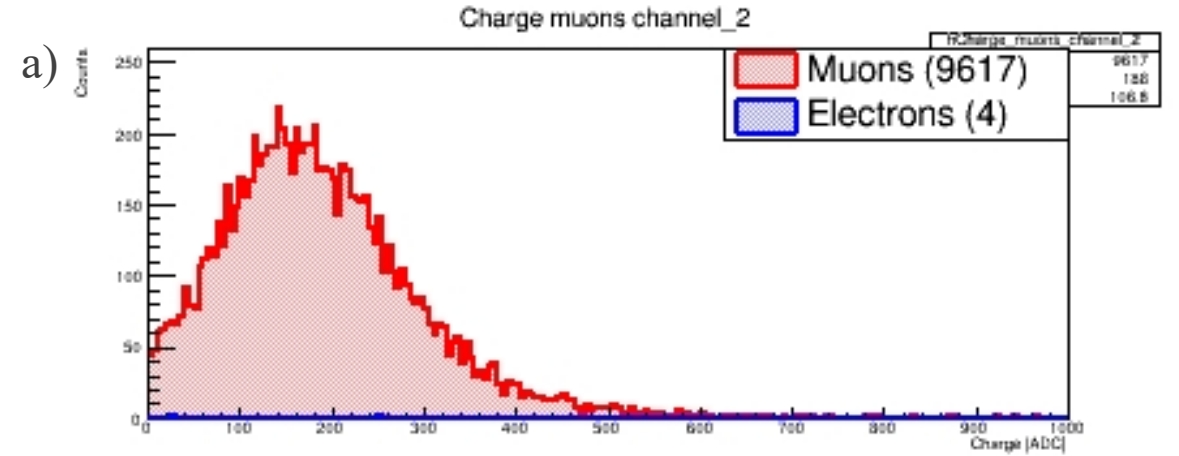
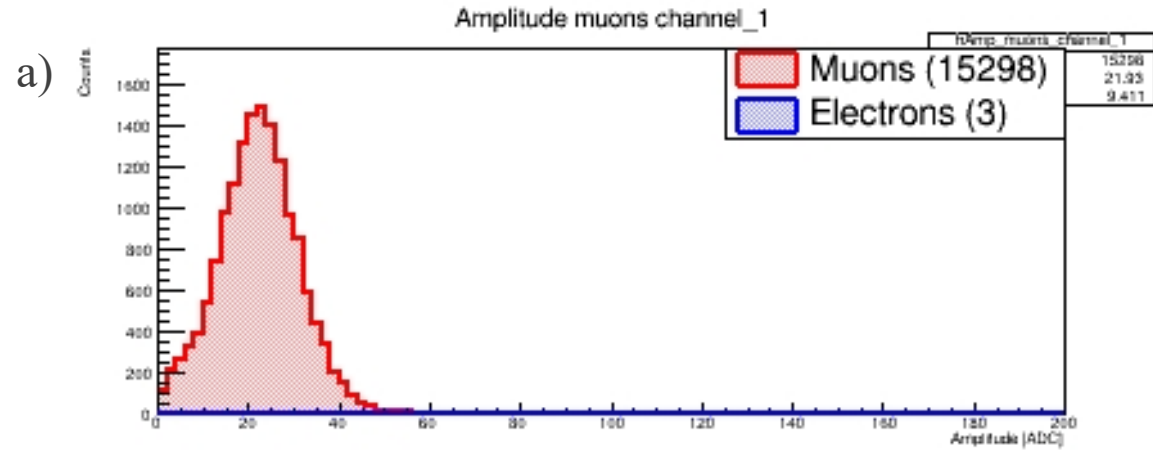
Карта каналов детектора

- 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:

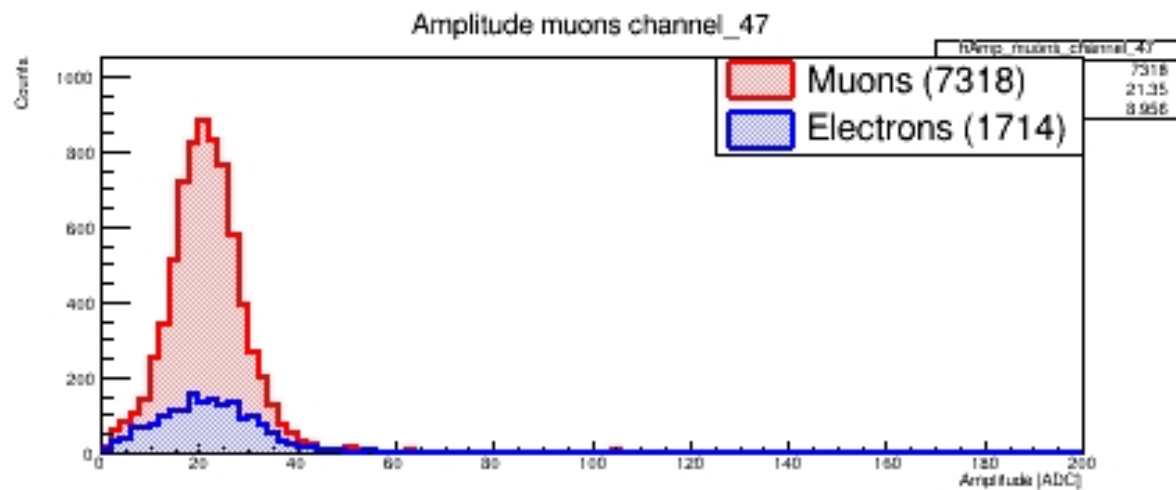
Множественность (количество сработавших дисков)

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

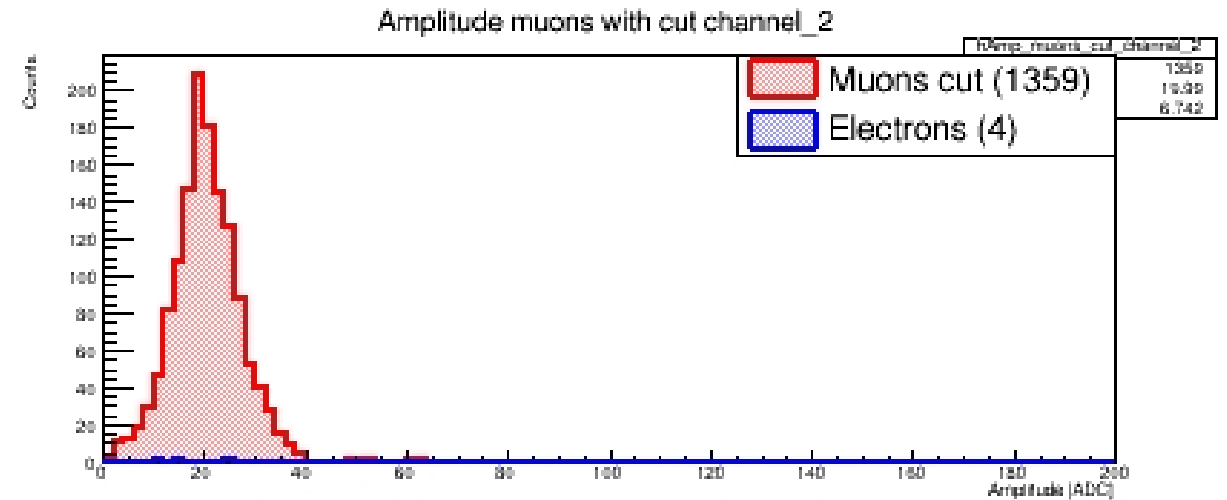
Условия для электронов (источник Sr под нижним диском):

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

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



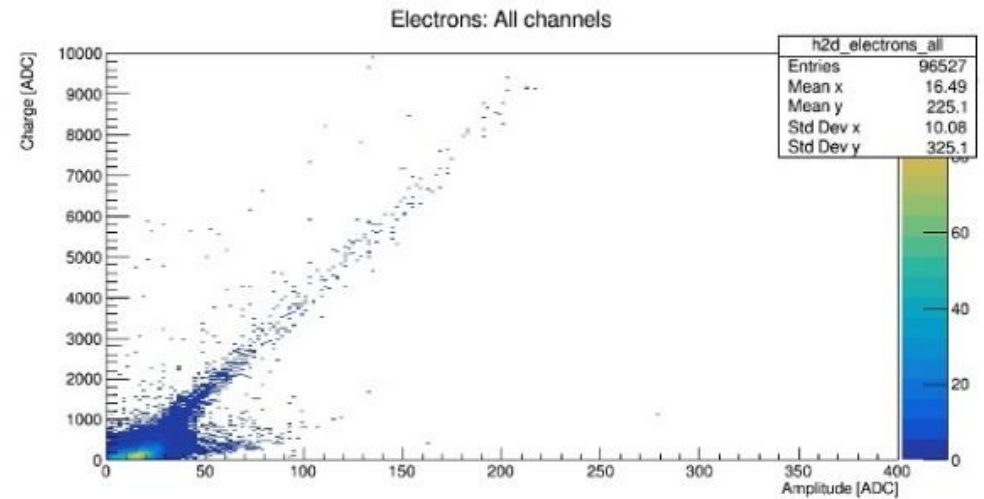
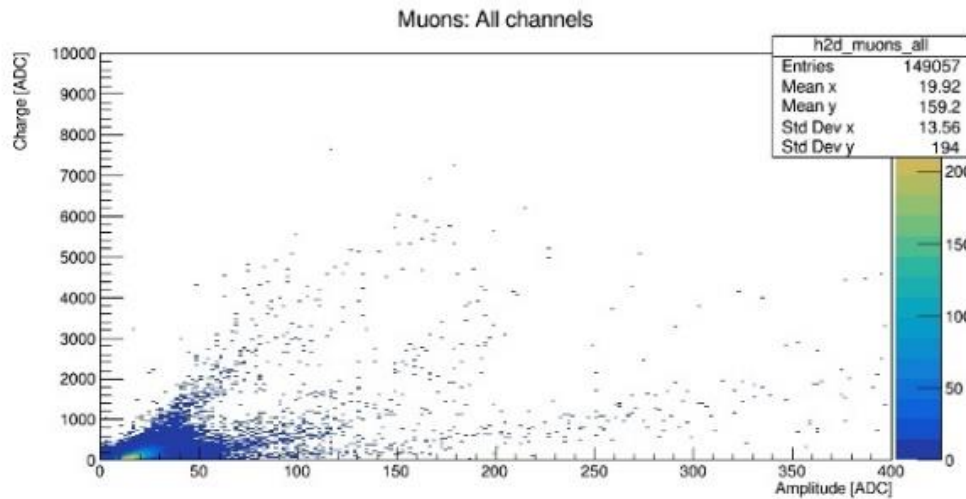
Сравнение электронного и мюонного пиков во втором снизу сцинтиляционном диске



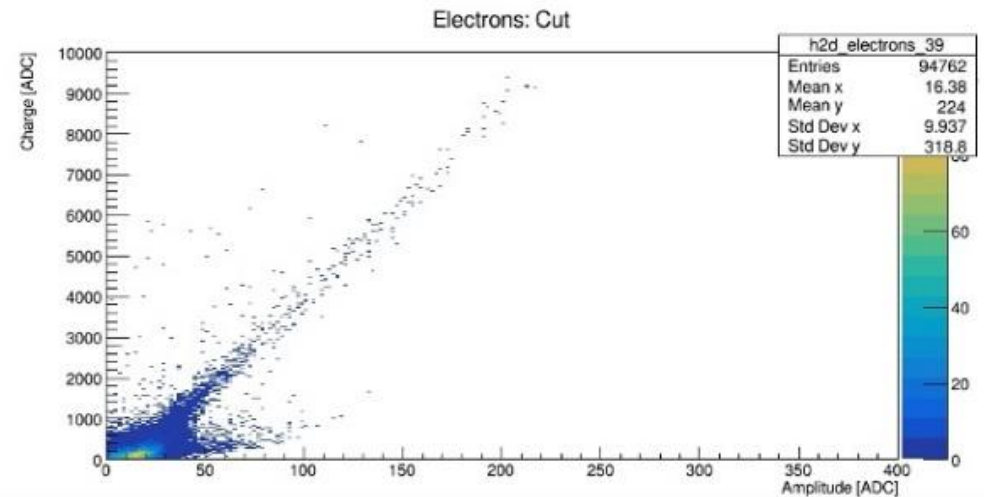
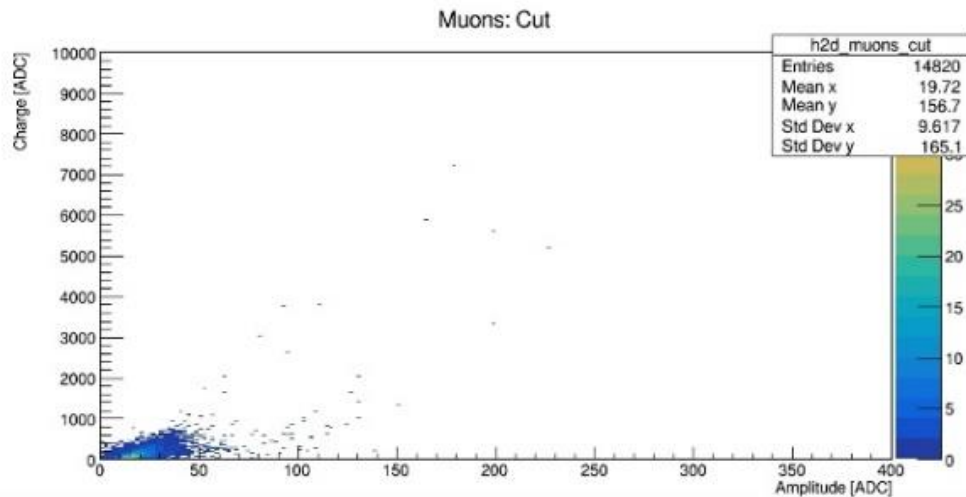
Мюонный пик после применения селектирующих условий

Внешние виды двумерных гистограмм заряда от амплитуды

а)



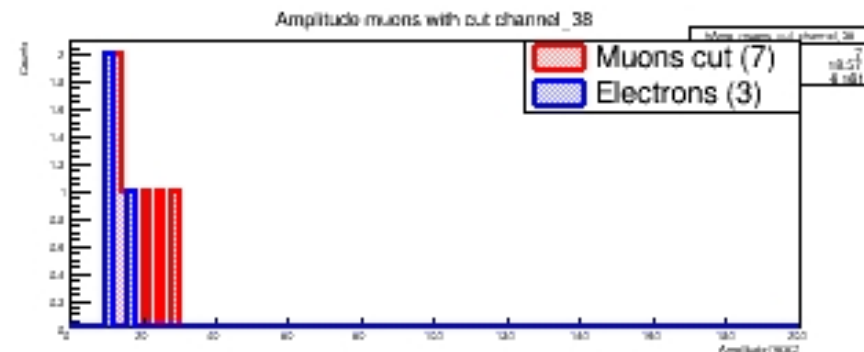
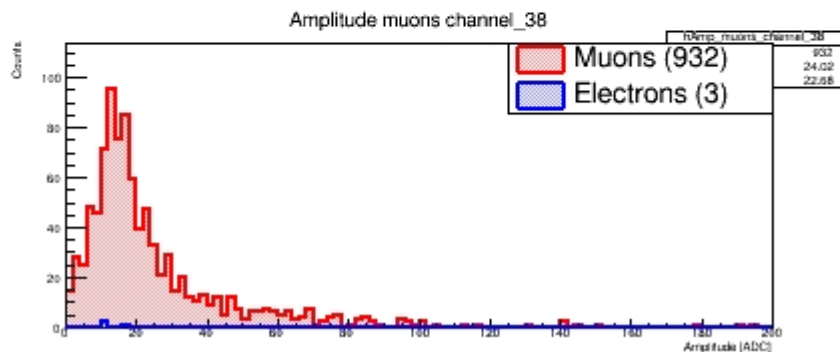
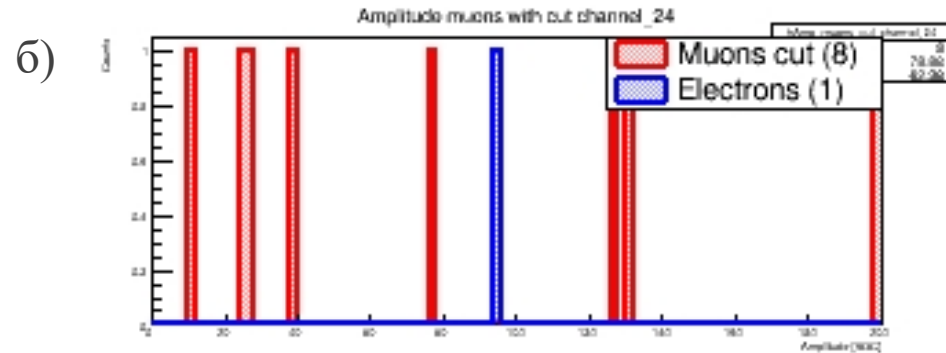
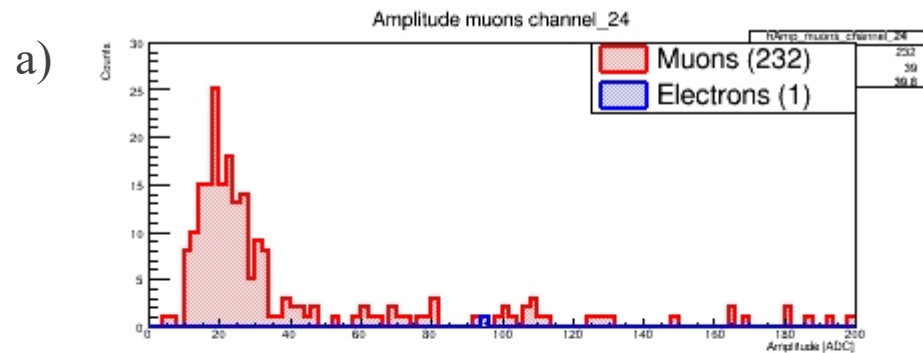
б)



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 MIP 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

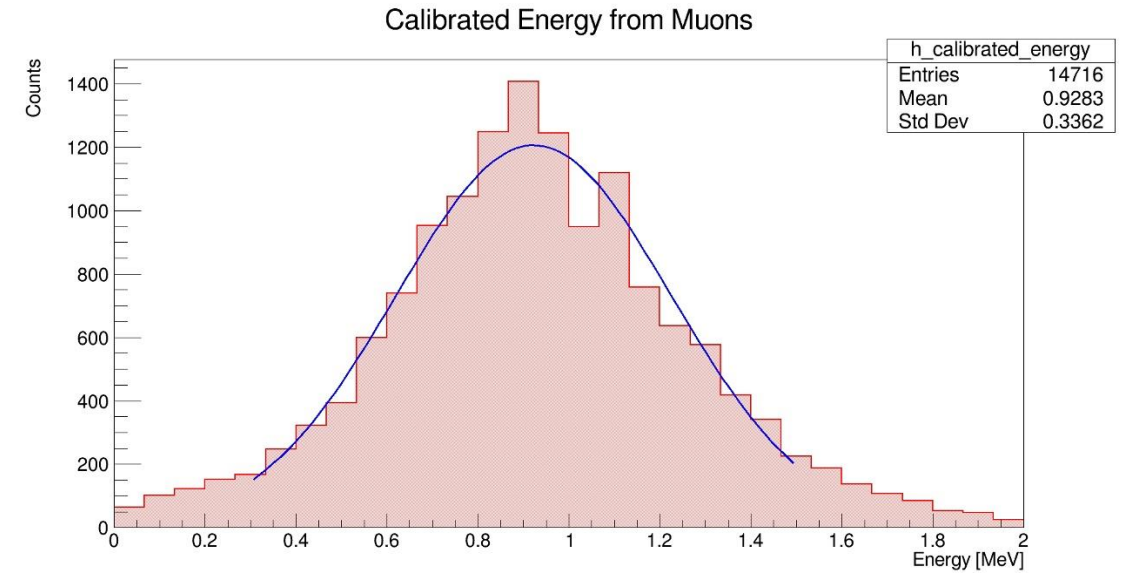
```
Channel 0: entries = 1916, MPV = 19.2052 ± 0.264563, calib = 0.0426968 ± 0.000588176 MeV/ADC
Channel 1: entries = 1359, MPV = 17.6211 ± 0.250698, calib = 0.046535 ± 0.000662061 MeV/ADC
Channel 8: entries = 1828, MPV = 18.1963 ± 0.201852, calib = 0.0450642 ± 0.000499899 MeV/ADC
Channel 9: entries = 1181, MPV = 14.8789 ± 0.239917, calib = 0.0551117 ± 0.000888657 MeV/ADC
Channel 21: entries = 102, MPV = 19.1663 ± 1.71924, calib = 0.0427835 ± 0.00383772 MeV/ADC
Channel 22: entries = 292, MPV = 12.8889 ± 0.2671, calib = 0.0636205 ± 0.00131842 MeV/ADC
Channel 29: entries = 291, MPV = 13.304 ± 0.306759, calib = 0.0616357 ± 0.00142118 MeV/ADC
Channel 30: entries = 233, MPV = 16.6921 ± 0.477918, calib = 0.0491252 ± 0.00140653 MeV/ADC
Channel 38: entries = 905, MPV = 16.779 ± 0.296133, calib = 0.0488707 ± 0.00086252 MeV/ADC
Channel 39: entries = 345, MPV = 13.9603 ± 0.262545, calib = 0.0587382 ± 0.00110467 MeV/ADC
Channel 45: entries = 141, MPV = 20.2479 ± 0.490311, calib = 0.0404981 ± 0.000980677 MeV/ADC
Channel 46: entries = 565, MPV = 19.4159 ± 0.333046, calib = 0.0422335 ± 0.000724443 MeV/ADC
Channel 47: entries = 1715, MPV = 13.2211 ± 0.195218, calib = 0.0620219 ± 0.000915791 MeV/ADC
Channel 48: entries = 1468, MPV = 18.8478 ± 0.278177, calib = 0.0435065 ± 0.00064212 MeV/ADC
Channel 49: entries = 975, MPV = 14.4348 ± 0.224602, calib = 0.0568073 ± 0.000883911 MeV/ADC
Channel 56: entries = 268, MPV = 15.8467 ± 0.712208, calib = 0.0517457 ± 0.00232563 MeV/ADC
Channel 57: entries = 1132, MPV = 12.7868 ± 0.294754, calib = 0.0641287 ± 0.00147826 MeV/ADC
```

Итоговый энергетический спектр отобранных мюонных событий после калибровки

Положение наиболее вероятных потерь энергии (MPV) составило $E_{\text{peak}} = 0.922 \pm 0.003$ МэВ, что хорошо согласуется с теоретическим значением для минимально ионизирующих частиц в пластиковом сцинтилляторе толщиной 1 см (ожидаемое значение $E_0 \approx 0.82\text{--}1.00$ МэВ).

Полученная форма спектра характерна для распределения Гаусса, что подтверждает корректность выделения мюонного сигнала. Ширина распределения, характеризующаяся величиной $\sigma = 0.303 \pm 0.003$ МэВ и $\text{FWHM} = 0.713 \pm 0.007$ МэВ, обусловлена преимущественно физическими флуктуациями ионизационных потерь в тонком сцинтилляторе.

Относительное энергетическое разрешение, определённое как $\Delta E/E = \text{FWHM}/E_{\text{peak}} \approx 77\%$, отражает естественную ширину распределения Гаусса для минимально ионизирующих частиц в тонком сцинтилляторе, определяемую разбросом длин волн мюонов и собственным энергетическим разрешением детектора



ENERGY RESOLUTION RESULTS:

```
=====
Peak energy:      0.922435 ± 0.00302628 MeV
Sigma:           0.302911 ± 0.00313797 MeV
FWHM:            0.713356 ± 0.00738991 MeV
Resolution:      77.334 ± 0.801131 %
```

Заключение

В ходе работы были последовательно решены следующие задачи:

- 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