

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Исследование характеристик модуля детектора реакторных  
антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора с системой  
WLS-SiPM**

Студент	_____ В. А. Вакуленко
Научный руководитель, мл. науч. сотр.	_____ Д. А. Чмыхало
Научный консультант, инж.	_____ Н. С. Бойко

Москва 2023

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Реакторные антинейтрино и способы их регистрации</b>	<b>4</b>
2.1	Источники реакторных антинейтрино . . . . .	4
2.2	Обратный бета-распад . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Устройство кремниевых ФЭУ(SIPM)</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Описание модуля нейтринного детектора на основе SIPM</b>	<b>7</b>
4.1	Сцинтиллятор . . . . .	7
4.2	Спектрсмещающие волокна . . . . .	7
4.3	Кремниевые фотоумножители (SIPM) . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Исследование неоднородности пластикового сцинтиллятора</b>	<b>10</b>
5.1	Методология проведения измерений . . . . .	10
5.2	Полученные результаты . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Заключение</b>	<b>13</b>

## 1 Введение

На сегодняшний день переход от традиционных вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) к полупроводниковым аналогам - Si-ФЭУ (SiPM, MPPC, MAPD и др.) приобретает все большую популярность, как в области мегасайенс установок физики частиц и астрофизики, так и у производителей детекторов мониторинга, сканирования [1] и медицинского оборудования. Кремниевые фотоумножители, также известные как многопиксельные счетчики фотонов (MPPC) - это тип твердотельных кремниевых детекторов, они предназначены для детектирования фотонов оптического диапазона. Кремниевые фотоумножители компактны и не чувствительны к магнитным полям, они существенно превосходят вакуумные ФЭУ в эффективности регистрации фотонов, а дисперсия шумовых сигналов по амплитуде низкая, что позволяет устанавливать невысокий порог для малых амплитуд сигнала. Стоит отметить, что обновления серий датчиков с улучшенными характеристиками происходят раз в несколько лет производителями нескольких стран (Япония, США, Италия и т.д.), привлекательна их доступность в большом разнообразии конфигураций, таких как одиночные Si-ФЭУ, линейные массивы и матрицы разных размеров. В источниках, ссылаясь на проведенные [2] измерения, авторы показывают, что полная замена ФЭУ на Si-ФЭУ в установке черенковского телескопа, сканере однофотонно-эмиссионной компьютерной томографии и других детекторах уже возможна благодаря развитию кремниевых технологий и снижению затрат, что делает Si-ФЭУ предпочтительным выбором в качестве фотонного детектора во многих областях.

Разработкой и строительством плавучих атомных электростанций (ПАЭС) на данный момент занимается несколько стран, таких как Китай, Южная Корея, США и Россия. Большой опыт создания и эксплуатации корабельных и судовых атомных электроустановок (АЭУ) [3] стал основой при разработке ПАЭС. В настоящее время имеются два полностью законченных проекта атомных реакторов для ПАЭС: реактор блочной конструкции КЛТ-40С тепловой мощностью 150 МВт и реактор интегрального типа АБВ-6М тепловой мощностью около 40 МВт. Их использование позволяет создавать ПАЭС мощностью от 12 до 75 МВт. Поскольку Россия планирует продавать энергию ПАЭС с другими странами, то обеспечение безопасности радиоактивного топлива является одной из приоритетных задач, для решения которой в ИФВЭ (Институт Физики Высоких Энергий) НИЦ "Курчатовский институт" были собраны опытные образцы нейтринных детекторов на основе сочетания пластиковых сцинтилляторов и Si-ФЭУ. Детекторы такого типа должны выполнять функцию непрерывного мониторинга заряженных частиц от реактора ПАЭС в реальном времени. Исследование и улучшение характеристик детекторов на основе Si-ФЭУ является актуальной задачей, поскольку предполагается, что детектор должен

не только корректно и эффективно считывать сигналы от заряженных частиц, но и быть экономически выгодным при производстве и устойчивым к внешним воздействиям окружающей среды.

**Цель исследования** заключается в разработке и создании сцинтилляционных детекторов ядерных излучений на основе кремниевых ФЭУ для прикладных задач .

## 2 Реакторные антинейтрино и способы их регистрации

### 2.1 Источники реакторных антинейтрино

Нестабильные ядра, при бета-распаде [4] которых образуются электронные антинейтрино в работающей АЭС можно разделить на следующие группы:

1. Продукты деления тяжелых изотопов и продукты их бета-распада.
2. Ядра, образованные в результате захвата быстрых ( $^{238}\text{U}$ ) и тепловых (Pu) нейтронов тяжелыми изотопами.
3. Ядра, образованные после захвата нейтронов продуктами деления тяжелых изотопов и продуктами последующих бета-распадов.
4. Долгоживущие ядра, находящиеся в бассейне с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), а также в неактивном реакторе.
5. Ядра, образованные в результате захвата нейтронов конструкционными материалами реактора.

Позитрон производит мгновенный поток энергии в виде непрерывной цепи ионизации и нескольких мягких близких к комптоновским электронам из аннигиляционного гамма-кванта. [5] Энергия позитрона меньше энергии антинейтрино примерно на 1,8 МэВ, почти независимо от кинематики конкретного рассеяния. Нейтрон испытывает замедление до тепловых энергий в течение нескольких микросекунд, а затем блуждает в веществе детектора до захвата ядром гадолиния, испуская каскад гамма-квантов с общей энергией около 8 МэВ.

### 2.2 Обратный бета-распад

С момента открытия в экспериментах на ядерном реакторе [1], детектирование антинейтрино осуществляется в основном, по реакции обратного бета-распада (ОБР):



с пороговой энергией антинейтрино:

$$E_{\text{пор}} = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} \sim 1.806 \text{ [МэВ]} \quad (2)$$

Сечение реакции ОБР крайне мало (порядка  $10^{-43}\text{см}^2$ ) при энергиях реакторных антинейтрино, поэтому для эффективной регистрации [6] необходимы большие объемы рабочего вещества детектора, в качестве которого обычно используют сцинтиллятор с высоким содержанием протонов. Рожденный в результате ОБР позитрон забирает большую часть энергии реакции, которую затем достаточно быстро (за несколько наносекунд) теряет в

рабочем веществе за счет ионизационных и радиационных потерь, после чего происходит аннигиляция позитрона с электроном вещества в два гамма-кванта с энергиями  $m_e = 0.511$  МэВ. Нейтрон ОБР тем временем замедляется и диффундирует в среде до момента захвата протоном с последующим испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 2.2 МэВ. Происходит это через фиксированное время после реакции ОБР. В результате описанного процесса на выходе детектора появляются два сигнала - быстрый, от потерь энергии позитроном и аннигиляции, и запаздывающий, от захвата нейтрона. При этом сигнал определенной энергии от нейтрона, наблюдаемый через фиксированное время после первого сигнала, выступает в качестве естественного триггера регистрации антинейтринного события.

### 3 Устройство кремниевых ФЭУ(SIPM)

На кремниевом кристалле n-типа создаются микрообласти p-типа. Размер микрообласти  $\sim 1$  мкм. Каждая микрообласть называется ячейкой или микропиксель. Каждая ячейка содержит идеальный высокоомперный резистор. К каждой ячейке приложено одинаковое напряжение  $U_{см}$ . [7] Попавший в ячейку фотон за счет фотоэффекта создает свободные носители: электрон и дырку.  $U_{см}$  подбирается таким, чтобы в области p-n перехода даже одиночный носитель заряда (электрон или дырка) мог инициировать лавину, переходящую в Гейгеровский разряд. Гашение Гейгеровского разряда происходит благодаря перераспределению части  $U_{см}$  с p-n перехода на резистор, в результате чего напряжение на p-n переходе уменьшается и разряд прекращается.

В кремниевом ФЭУ каждая ячейка является в отдельности независимым микродетектором фотонов. Сигнал, снимаемый с кремниевого ФЭУ представляет собой сумму сигналов от всех сработавших ячеек. Сигналы от каждой ячейки одинаковые.

Число фотонов от регистрируемой световой вспышки должно быть в несколько раз меньше числа ячеек, чтобы в каждую попадал только один фотон. Тогда кремниевый ФЭУ будет пропорциональным фотоприемником, то есть сигнал на выходе SIPM будет пропорционален числу сработавших ячеек, то есть пропорционален числу зарегистрированных фотонов. При увеличении интенсивности световой вспышки амплитуда сигнала с SIPM выходит на область насыщения. [8] Чувствительная область по отношению к полной поверхности SIPM: от 30% до 80%.

Достоинства:

1. Работают в сильных магнитных полях
2. Низкое напряжение смещения  $U_{см} \approx 50 \div 60V$

Недостатки:

1. Высокий собственный шум(темновой счет)
2. При комнатной температуре в отсутствии световых фотонов на выходе SIPM будут самопроизвольные сигналы

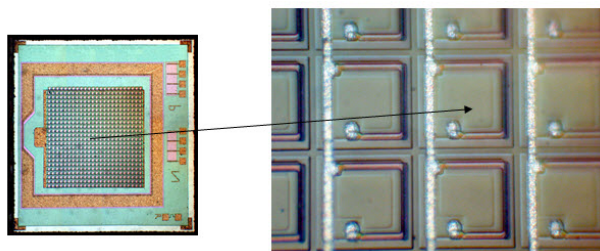


Рис. 1: SiФЭУ и микрофотография ячеек

## 4 Описание модуля нейтринного детектора на основе SIPM

Модуль детектора представляет собой брусок из пластикового сцинтиллятора с присоединенными по бокам SIPM. Светосбор осуществляется с помощью оптоволокна, соединенного с каждым SIPM посредством оптической смазки.

### 4.1 Сцинтиллятор

Сцинтиллятор представляет собой брусок из полистирола с добавками 2% РТР и 0.05% РОРОР размерами 50\*50\*640 мм<sup>3</sup>

Поскольку центры люминесценции не прозрачны к собственному излучению, то для вывода света используются добавки РОРОР и РТР, вторичные центры люминесценции, которые высвечивают с большей длиной волны. Так как концентрация вещества спектросмесителей мала и не превышает нескольких процентов от общего состава, то вещество сцинтиллятора оказывается прозрачно к переизлученному спектру волн.

### 4.2 Спектросмещающие волокна

Для сбора света сцинтилляций используются спектросмещающие волокна типа Y11 фирмы Kuraray, вклеенные по боковым поверхностям сцинтиллятора. Волокна имеют диаметр 1 мм и длину 3 мм, вклеены в канавки 1.5\*1.5 мм. На торец одного из пяти волокон напылено отражающее алюминиевое покрытие. Волокна собраны в пучок из 9 шт и соединены с чувствительной поверхностью SIPM. Волокна состоят из центральной жилы и оболочки, отличающихся между собой коэффициентом отражения, что обеспечивает процесс полного внутреннего отражения и передачи света с минимальными потерями.

Для вклейки WLS волокон использовался эпоксидный клей ПЭО-321К. Брусок обернут двумя слоями тайвика (TYVEC) - диффузного отражателя, на торцах- зеркальным отражателем-алюминизированным майларом.

Таблица 1.1 - Характеристики спектросмещающего волокна [3]

Характеристика	Значение
Хим. состав	Сердцевина - полистирол, выступающий в роли матрицы, с переизлучающими добавками. Оболочка для однооболочечного волокна - полиметилметакрилат (PMMA)
Пик излучения, нм	476 (зеленый)
Пик поглощения, нм	430

Рис. 2: Характеристики спектросмещающего волокна



### 4.3 Кремниевые фотоумножители (SiPM)

В качестве фотонных детекторов были выбраны кремниевые фотоумножители (SiPM, Silicon Photomultiplier) производства фирмы Onsemi серии FC-30035, отличающиеся наименьшим значением рабочего напряжения (30В) среди аналогов, в сочетании с высоким PDE и малым разбросом напряжения пробоя.

Характеристика	Значение
Диапазон спектральной чувствительности, нм	300 - 905
Пик чувствительности, нм	420
PDE, %	31
Усиление	$3 \cdot 10^6$
Время нарастания сигнала, пс	300
Продолжительность импульса, пс	600

Рис. 3: Характеристики SiPM Onsemi fc-30035 SMT

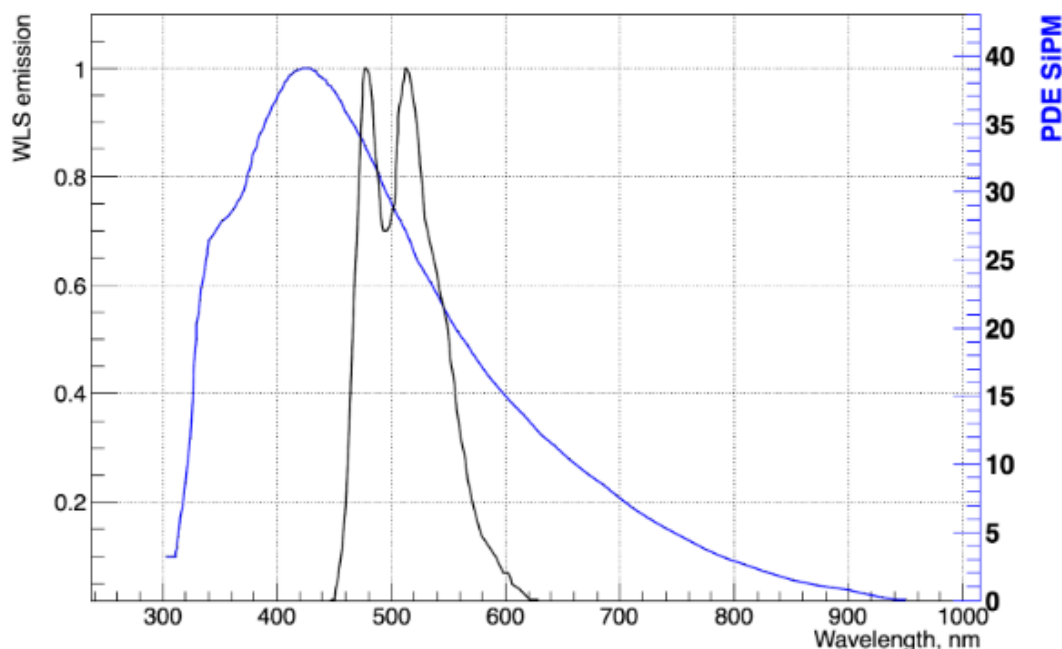


Рис. 4: Спектры: черный - излучение спектросмещающего волокна, синий - эффективность регистрации фотонов (PDE) SiPM.

На рисунке 1.2 изображены спектры высвечивания спектросмещающего волокна и эффективность регистрации фотонов SiPM в зависимости от длины волны, где максимумы близки и потери не превышают 10%, то

есть, вместо эффективности регистрации в 40 %, SiPM будет работать с эффективностью в 30 % относительно всего числа попадающих на его поверхность фотонов.

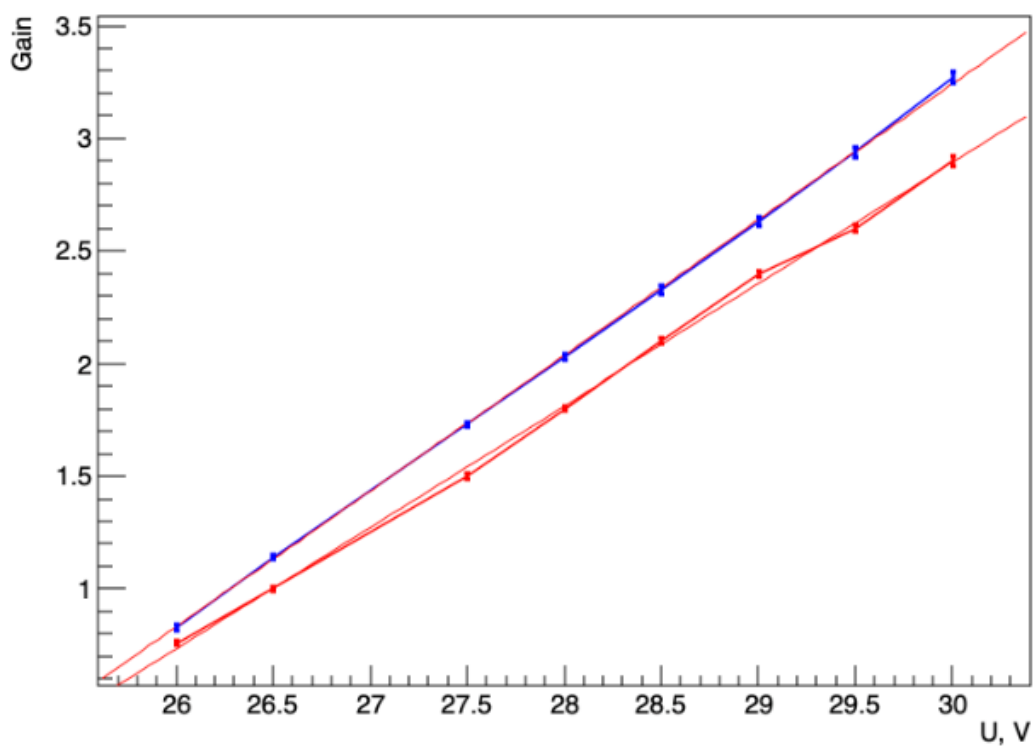


Рис. 5: Зависимость усиления от напряжения на SiPM: синий график - SiPM 1, красный график - SiPM 2

## 5 Исследование неоднородности пластикового сцинтиллятора

### 5.1 Методология проведения измерений

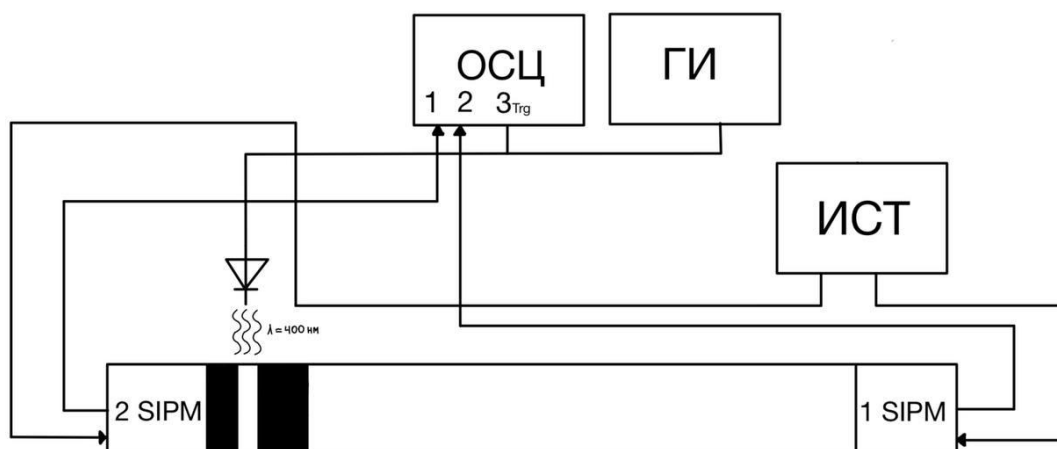


Рис. 6: Схема установки

На рисунке представлена схема установки: На каждый SiPM подается напряжения от источника питания (ИСТ), кроме того каждый Si-ФЭУ соединен с соответствующим каналом осциллографа (ОСЦ), позволяющего как анализировать форму и амплитуду сигнала, так и оцифровывать данные в виде амплитудных и зарядовых спектров. Освещаются волокна посредством ультрафиолетового диода. На диод и вход осциллографа подается прямоугольный сигнал, который выступает в качестве триггера для сбора данных. Сам модуль вместе с диодом находится в светозащитном корпусе.

Для изучения зависимости амплитуды напряжения от расстояния от второго SiPM поочередно диодом освещались изолированные друг от друга участки сцинтиллятора. Для этого модуль был покрыт черной бумагой как показано на рисунке (черные области) с шагом 6.5 см. Ширина каждой щели составляет примерно 1 см.

Во избежании попадания излучения на несколько щелей одновременно, в процессе освещения диодом, модуль был дополнительно покрыт черной тканью. Измерения производились при напряжении смещения 30 В. С помощью амперметра производился контроль тока.

## 5.2 Полученные результаты

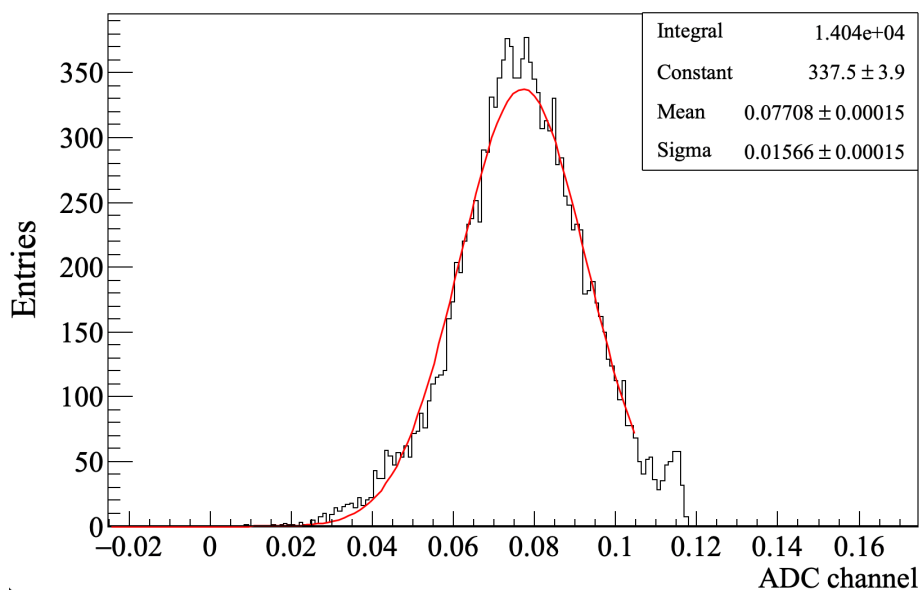


Рис. 7: Гистограмма для расстояния 55.6 см от 2 SIPM

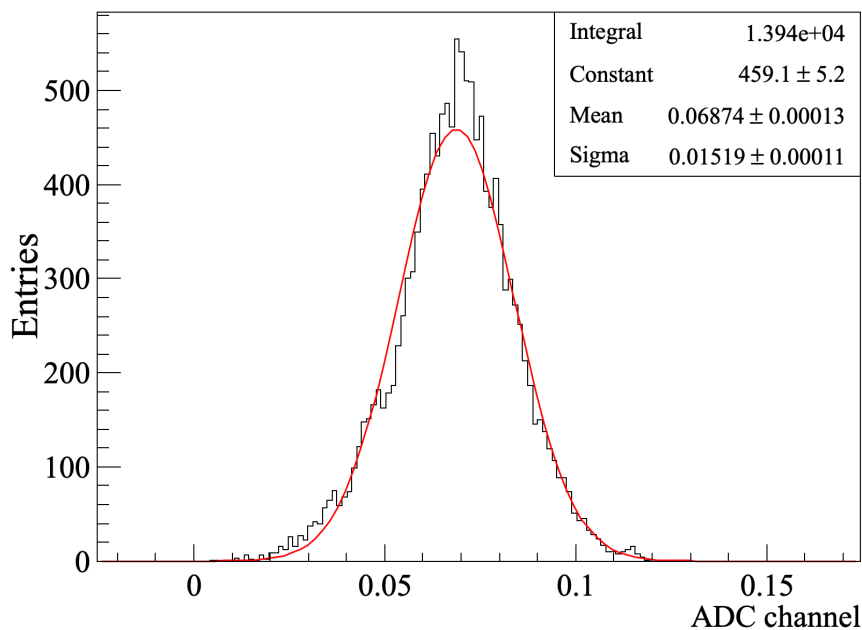


Рис. 8: Гистограмма для расстояния 8.7 см от 2 SIPM

Выше представлены, как пример, гистограммы для расстояний 55.6 см и 8.7 см от 2 SIPM, аналогичные гистограммы были получены и для остальных расстояний. Далее по одноэлектронному спектру (рис 8) был определен номер канала ADC для первого пика и вся шкала каналов ADC для графиков выше была пересчитана на количество фотоэлектронов. Далее было найдено отношение разницы между количеством фотэлектронов в центре бруска и на данном расстоянии к количеству фотоэлектронов в

центре. По полученным данным был построен график (рис 9).

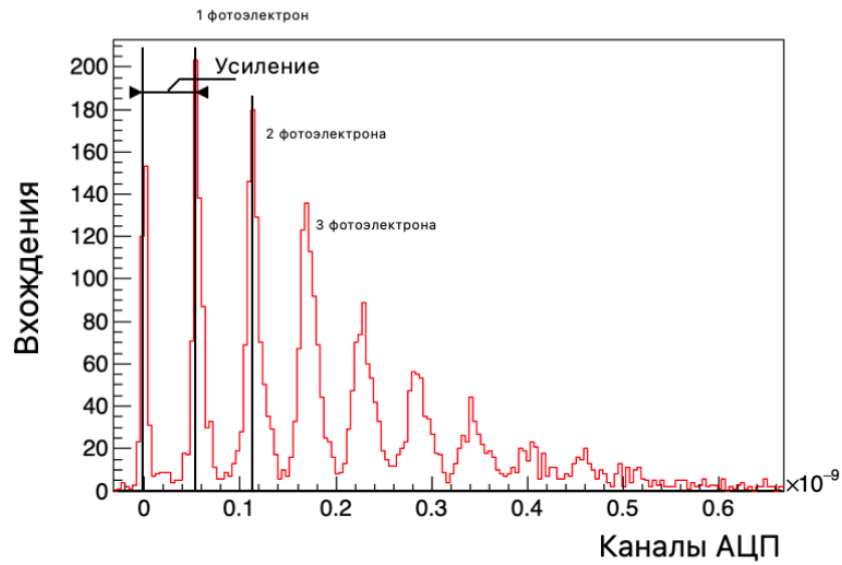


Рис. 9: Одноэлектронный спектр, полученный при напряжении на SiPM 30 В

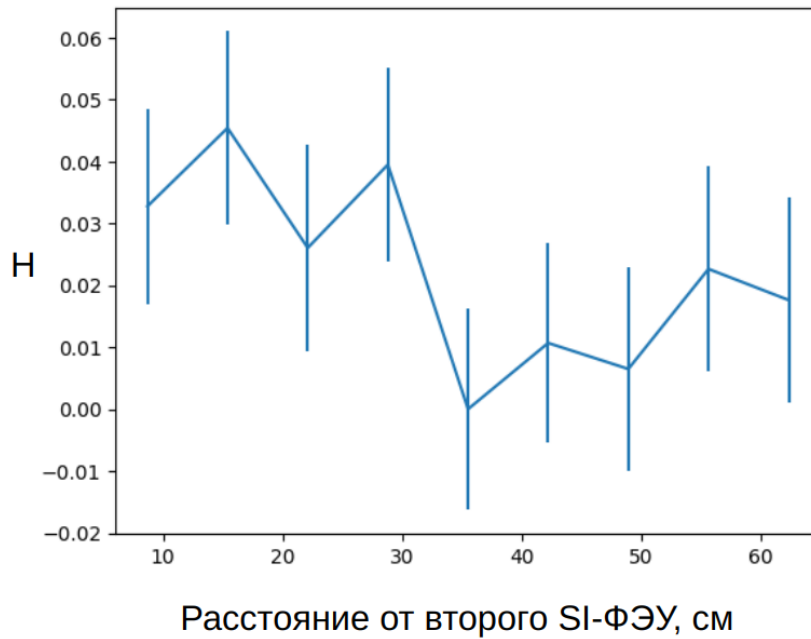


Рис. 10: График зависимости отношения разницы между количеством фотоэлектронов в центре бруска и на данном расстоянии к количеству фотоэлектронов в центре

$$H = \frac{n_x - n_{x_{\text{сер}}}}{n_{x_{\text{сер}}}}$$

,где  $n_x$ -количество фотоэлектронов на расстоянии  $x$  от 2 SiPM,  $n_{x_{\text{сер}}}$ - количество фотоэлектронов в центре бруска (за центр взято значение на расстоянии 35.5 см).

Как видно из рисунка 9, максимальное отклонение составляет 4.5 %.

## 6 Заключение

В результате, в ходе работы были изучены конструкция и применение модуля нейтринного детектора на основе SIPM. Также был рассмотрен механизм регистрации реакторных антинейтрино и их источники. Исследование зависимости отношения разности количества фотоэлектронов в центре бруска и на определенном расстоянии от 2 SIPM к количеству фотоэлектронов в центре показало, что оптоволокно сцинтиллятора однородно, так как, с учетом погрешностей, все точки легли на прямую.

В дальнейшем планируется изучение характеристик данного модуля в идеализированном случае с помощью программы Geant4 и метода Монте-Карло, что позволит получить данные без учета погрешностей реальной модели. Это в свою очередь позволит понять, что вносит основной вклад в погрешность измерений.

## Список литературы

- [1] F. P. An и др. «Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay». В: *Phys. Rev. Lett.* 118 (25 июнь 2017), с. 251801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.251801. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.251801>.
- [2] D. Adey и др. «Extraction of the  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  Antineutrino Spectra at Daya Bay». В: *Phys. Rev. Lett.* 123 (11 сент. 2019), с. 111801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.111801. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.111801>.
- [3] N. Haag и др. «Experimental Determination of the Antineutrino Spectrum of the Fission Products of  $^{238}\text{U}$ ». В: *Phys. Rev. Lett.* 112 (12 март 2014), с. 122501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.122501. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.122501>.
- [4] L. Hayen и др. «First-forbidden transitions in the reactor anomaly». В: *Phys. Rev. C* 100 (5 нояб. 2019), с. 054323. DOI: 10.1103/PhysRevC.100.054323. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.100.054323>.
- [5] G. Mention и др. «Reactor antineutrino anomaly». В: *Phys. Rev. D* 83 (7 апр. 2011), с. 073006. DOI: 10.1103/PhysRevD.83.073006. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.83.073006>.
- [6] Anna C. Hayes и Petr Vogel. «Reactor Neutrino Spectra». В: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 66.1 (2016), с. 219–244. DOI: 10.1146/annurev-nucl-102115-044826. eprint: <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102115-044826>. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102115-044826>.
- [7] Patrick Huber и Thomas Schwetz. «Precision spectroscopy with reactor antineutrinos». В: *Phys. Rev. D* 70 (5 сент. 2004), с. 053011. DOI: 10.1103/PhysRevD.70.053011. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.70.053011>.
- [8] Particle Data Group и др. «Review of Particle Physics». В: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2020.8 (авг. 2020), с. 083C01. ISSN: 2050-3911. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104. eprint: <https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2020/8/083C01/34673722/ptaa104.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>.