

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ОТЧЕТ
О НАУЧНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ
ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО НА
ОСНОВЕ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА»**

Студент _____ Д. С. Прокопов

Научный руководитель,

м.н.с.

_____ Д. А. Чмыхало

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Теоретические сведения	3
1.1 Принцип работы детектора реакторных антинейтрино	3
1.2 Роль сцинтилляторов в детектировании антинейтрино	4
2 Моделирование измерительного модуля детектора на основе пластикового сцинтиллятора	5
2.1 Моделирование пластикового сцинтиллятора	5
2.2 Построение спектров радиоактивных элементов	6
3 Исследование неоднородности пластикового сцинтиллятора	9
3.1 Неоднородность светособирания в сцинтилляторах	9
3.2 Представление результатов моделирования	10
3.3 Оптимизация размеров пластикового сцинтиллятора	11
Заключение	13
Литература	14

ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент в России активно развивается малая атомная энергетика (МАЭ) с целью обеспечения энергоресурсами удалённых районов и производств, в частности перспективным считается производство плавучих атомных энергоблоков (ПАЭБ) [4]. В связи с этим развитие атомной промышленности потребовало введения средств мониторинга количества и качества ядерного материала, находящегося в корпусе реактора, в силу обеспечения безопасности развития атомной энергетике. Сложность данного вопроса заключается в отсутствии возможности установки независимой аппаратуры, измеряющей выработку энергии на ПАЭБ. Поэтому возможным решением этой проблемы представляется измерение энерговыработки реактора установкой детектирования реакторных антинейтрино, находящейся вне ПАЭБ.

Использование нейтринного метода контроля ядерных реакторов было предложено и изучено в Курчатовском институте в 1980–1990-х гг. Реакторные антинейтрино служат индикаторами протекания цепной реакции деления в активной зоне реактора. Эти антинейтрино могут быть зарегистрированы с помощью реакции обратного бета-распада. В качестве нейтринного детектора можно использовать спектрометр на основе пластикового сцинтиллятора, регистрирующий продукты этой реакции. Важную роль в производстве детектора антинейтрино играет моделирование, поскольку этот способ может быть использован в определении оптимальных характеристик сцинтиллятора.

Целью данной работы является моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

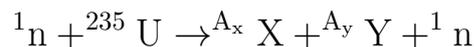
Для достижения данной цели нужно решить несколько задач:

- Определение прозрачности пластикового сцинтиллятора
- Моделирование спектров радиоактивных элементов
- Оптимизация размеров пластикового сцинтиллятора

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

Согласно [2], ядерные реакторы вырабатывают энергию путем деления изотопов урана и плутония (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) и радиоактивного распада соответствующих фрагментов деления. При бомбардировке ядра урана нейтронами оно распадается, как правило, на два нейтроноизбыточных изотопа.



Продукты распада ${}^{A_x}_{Z_x}\text{X}$ и ${}^{A_y}_{Z_y}\text{Y}$ далее подвергаются каждой серии из нескольких бета-распадов, в результате которых образуется в среднем 6 антинейтрино. Таким образом, деление ядер урана в реакторах является мощным источником электронных антинейтрино. Регистрация антинейтрино может осуществляться через обратный β^+ -распад [1], [3]:



Эту реакцию можно наблюдать в водородосодержащей среде, например, в органических сцинтилляторах. В β^+ -распаде значительно большей массой обладает нейтрон, поэтому большую энергию приобретает позитрон. Нейтрон замедляется в водородосодержащей среде и впоследствии захватывается на поглотителе (водород в сцинтилляторе, спец. добавке), излучая гамма-квант, который далее регистрируется.

Время жизни позитрона составляет порядка 10^{-9}с , за это время позитрон ионизирует среду и аннигилирует с образованием 2 гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ.

1.2. РОЛЬ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ДЕТЕКТИРОВАНИИ АНТИНЕЙТРИНО

Сцинтиллятор — вещество, излучающее свет при прохождении через него ионизирующего излучения. К основным характеристикам сцинтилляторов относятся световой выход, время высвечивания и прозрачность вещества [5]. Чувствительный объём сцинтиллятора представляет собой основное вещество (антрацен, полистирол) с люминисцентными добавками (п-терфенил, РОРОР). В результате прохождения реакции обратного β^+ -распада в сцинтилляторе её продукты ионизируют вещество, которое излучает световой поток изотропно. Свет в сцинтилляторе отражается по законам геометрической оптики и регистрируется фотоэлектронным умножителем. Для улучшения светособирания сцинтиллятор можно ограничить зеркальным отражателем, а также подобрать параметры и размеры сцинтиллятора методом Монте-Карло.

В данной работе исследовался пластиковый сцинтиллятор из полистирола. Однако, этот материал обладает слабым световым выходом, поскольку его сцинтилляции поглощаются им самим и переходят в тепловые движения молекул. Поэтому в этом сцинтилляторе в качестве люминисцентных добавок были использованы п-терфенил и РОРОР. Время высвечивания сцинтиллятора равно 2,5 нс, показатель преломления $n=1,59$, световой выход и прозрачность требуется измерить в ходе исследований.

В данной работе определялась прозрачность пластикового сцинтиллятора методом построения неоднородностей светособирания. Прозрачность — расстояние, с которым интенсивность светового потока уменьшается в e раз. Таким образом, интенсивность собираемого света зависит экспоненциально от прозрачности материала и выражается по формуле:

$$I(x, \lambda) = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1.1)$$

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

В данной работе использовался программный пакет GEANT4. Моделирование происходило по экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 2.1.

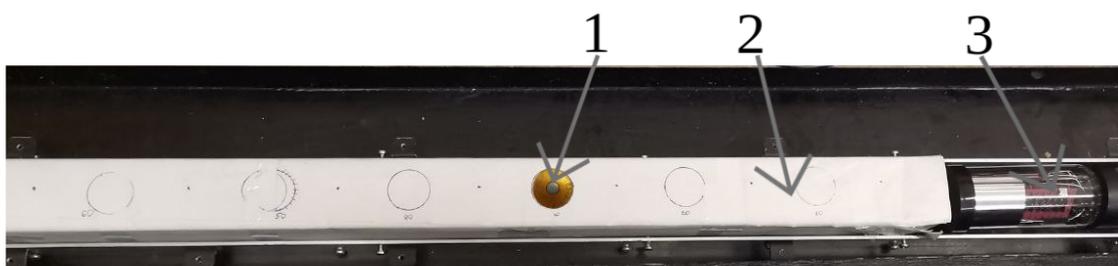


Рисунок 2.1 — Схема экспериментальной установки

Источник радиоактивного излучения 1 излучает гамма-кванты с определенной энергией, который попадают в пластиковый сцинтиллятор 2 и ионизируют его вещество. Полученный свет, проходя по сцинтиллятору попадает на фотокаатод фотоэлектронного умножителя 3, который подключён через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) к персональному компьютеру. ФЭУ имеет боросиликатное стекло и бищелочной фотокаатод диаметром 5 см.

В ходе работы были смоделированы пластиковый сцинтиллятор и фотокаатод ФЭУ. Параметры приборов соответствуют параметрам лабораторной установки. Был подобран зазор между между фотокаатодом и сцинтиллятором, равный 1 мм, для учета неплотного прилегания фотокаатода к

сцинтиллятору в экспериментальной установке. Построенная модель представлена на рисунке 2.2.

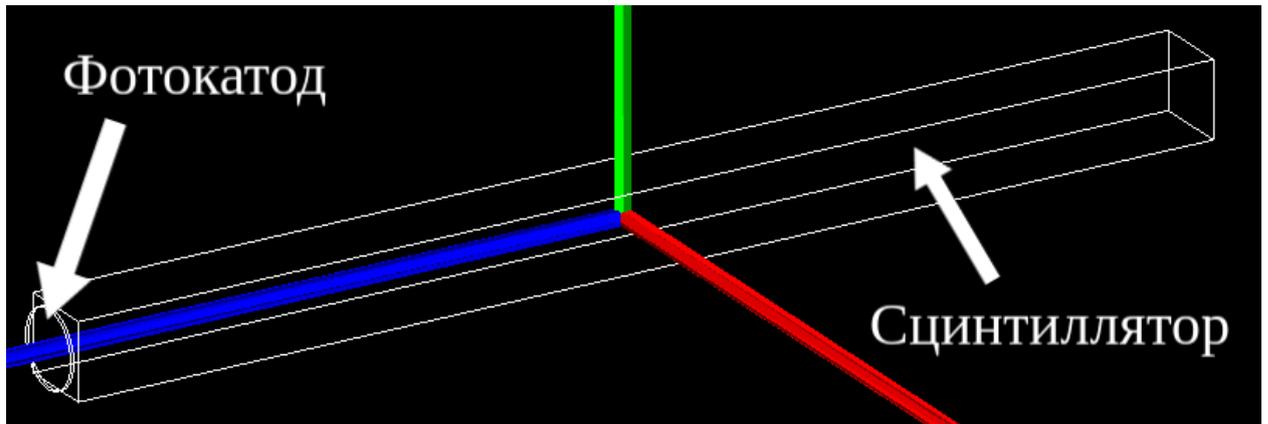


Рисунок 2.2 — Модель сцинтиллятора

2.2. ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРОВ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В качестве источников радиоактивного излучения использовались ^{137}Cs , ^{22}Na и ^{60}Co . В результате получены спектры этих элементов, представленные на рисунках 2.3, 2.4 и 2.5 соответственно.

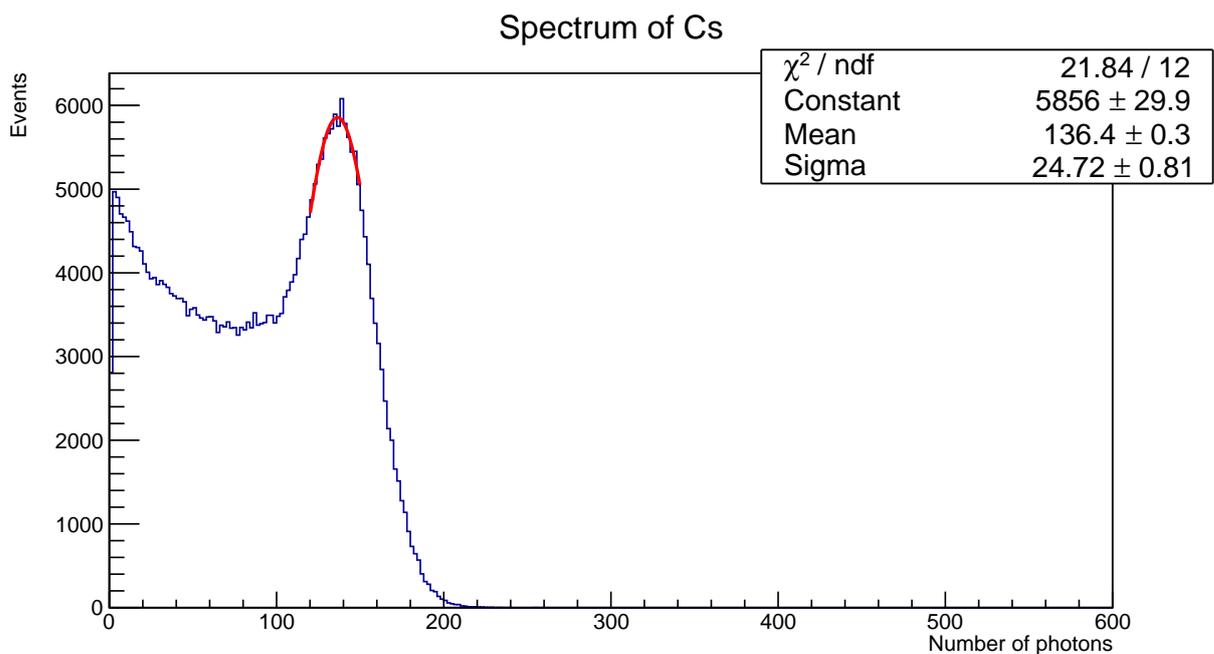


Рисунок 2.3 — Спектр ^{137}Cs

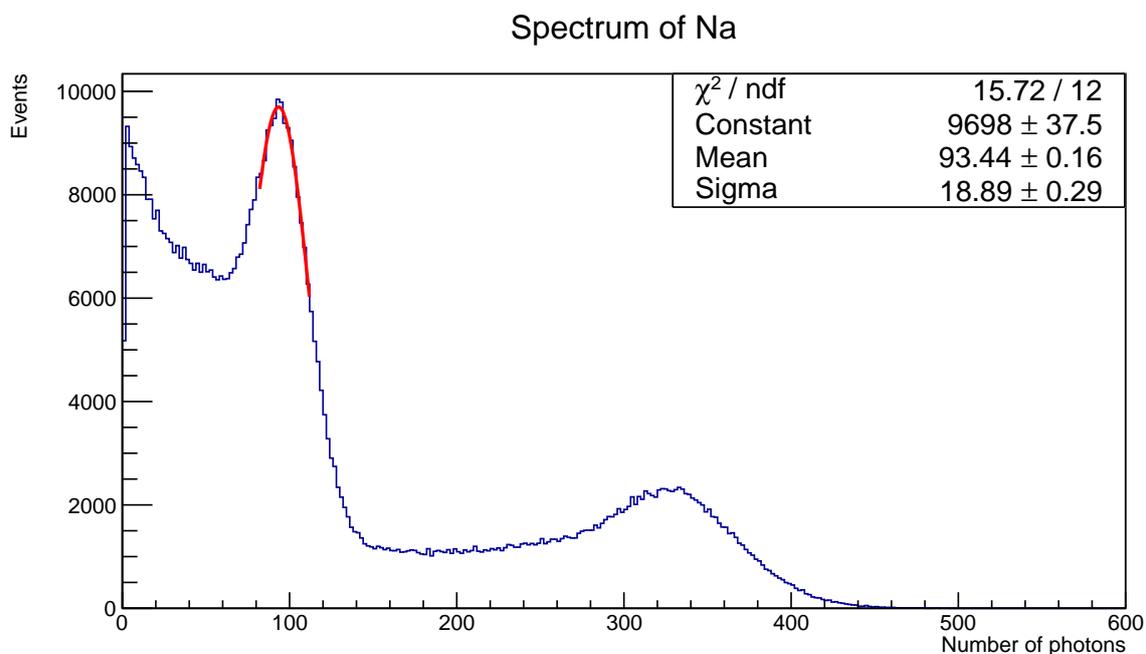


Рисунок 2.4 — Спектр ^{22}Na

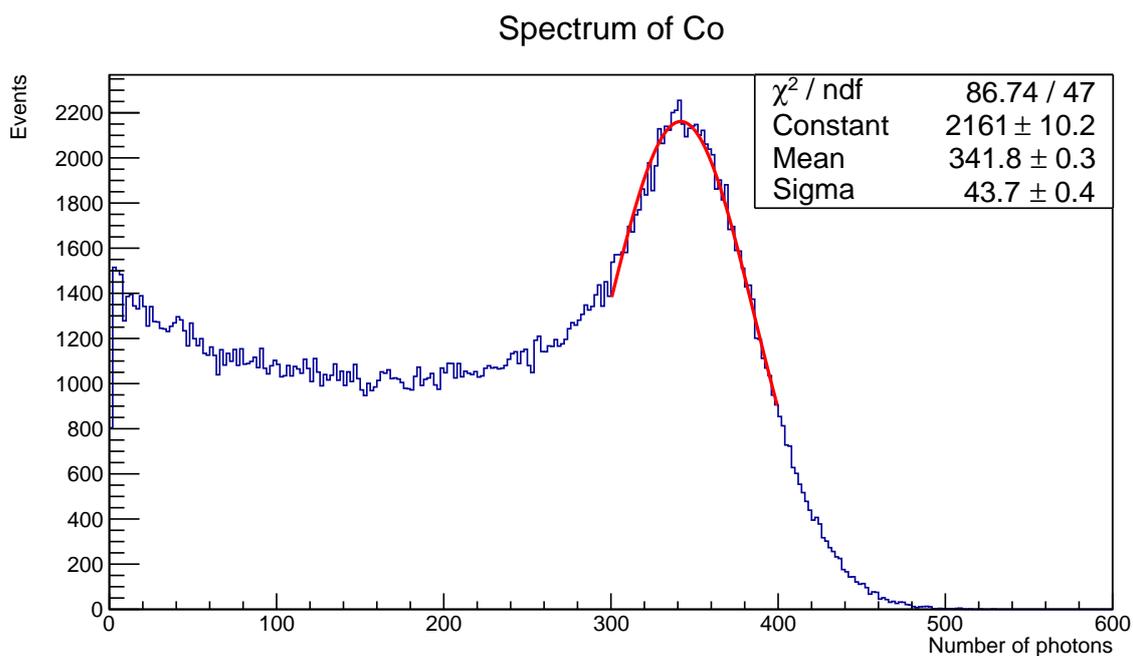
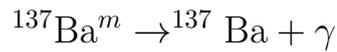


Рисунок 2.5 — Спектр ^{60}Co

Для убеждения в достоверности полученных спектров радиоактивных элементов был проведен анализ данных.

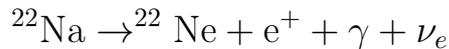
^{137}Cs претерпевает β^- -распад, в результате которого образуется изомер бария $^{137}\text{Ba}^m$, электрон и электронное антинейтрино:





Электрон не проходит через алюминиевую защиту радиоактивного источника. Изомер бария превращается в стабильный изотоп ^{137}Ba , испуская гамма-квант с энергией 0,66 МэВ. Таким образом, на спектре ^{137}Cs мы увидим только один пик, соответствующий этому гамма-кванту, что хорошо согласуется с полученным экспериментально спектром.

В случае β^+ -распада ^{22}Na образуется стабильный изотоп неона ^{22}Ne и испускается позитрон, гамма-квант с энергией 1,275 МэВ и электронное нейтрино:



Позитрон аннигилирует в алюминиевой защите с образованием двух гамма-квантов энергии 0,511 МэВ, разлетающихся в противоположных направлениях. Один из них, попадающий в материал сцинтиллятора, будет зарегистрирован. В результате, на спектре ^{22}Na будут проявляться 2 пика, что и наблюдается в ходе моделирования.

^{60}Co претерпевает β^- -распад, в результате которого образуется возбужденный изотоп никеля ^{60}Ni , электрон и электронное антинейтрино:



Как и в случае цезия, электрон не проходит через алюминиевую защиту. Перевозбужденный изотоп никеля переходит в основное состояние, излучая гамма-кванты с энергией 1,333 и 1,173 МэВ. Таким образом, на спектре будет выделяться только один пик в результате свертки излученных гамма-квантов, что хорошо соотносится с полученными данными.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

3.1. НЕОДНОРОДНОСТЬ СВЕТОСОБИРАНИЯ В СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

Неоднородность светособирания — параметр, показывающий зависимость количества собираемого света от положения радиоактивного источника:

$$\delta(x) = \frac{\bar{\mu}(x)}{\bar{\mu}\left(\frac{l}{2}\right)} - 1 \quad (3.1)$$

В данной формуле $\bar{\mu}(x)$ - среднее значение положения пика комптоновского края, если источник радиоактивного излучения находится в точке x , l - длина пластикового сцинтиллятора. В данной работе, как указывалось выше, сцинтиллятор имеют длину 70 см. $\bar{\mu}(x)$ определяется методом фитирования пика комптоновского края под распределение Гаусса.

С помощью неоднородности светособирания можно определить параметры сцинтиллятора, например, прозрачность, методом соотношения неоднородностей, построенных по экспериментально полученному и теоретически смоделированному спектру, в пределах погрешности. Погрешность складывается из приборной погрешности в экспериментальном, и погрешности метода Монте-Карло в теоретическом случае. Также важную роль в обоих методах играет погрешность фитирования.

3.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе были построены неоднородности светособираения для 2 пластических сцинтилляторов, представленные на рисунках 3.1 и 3.2.

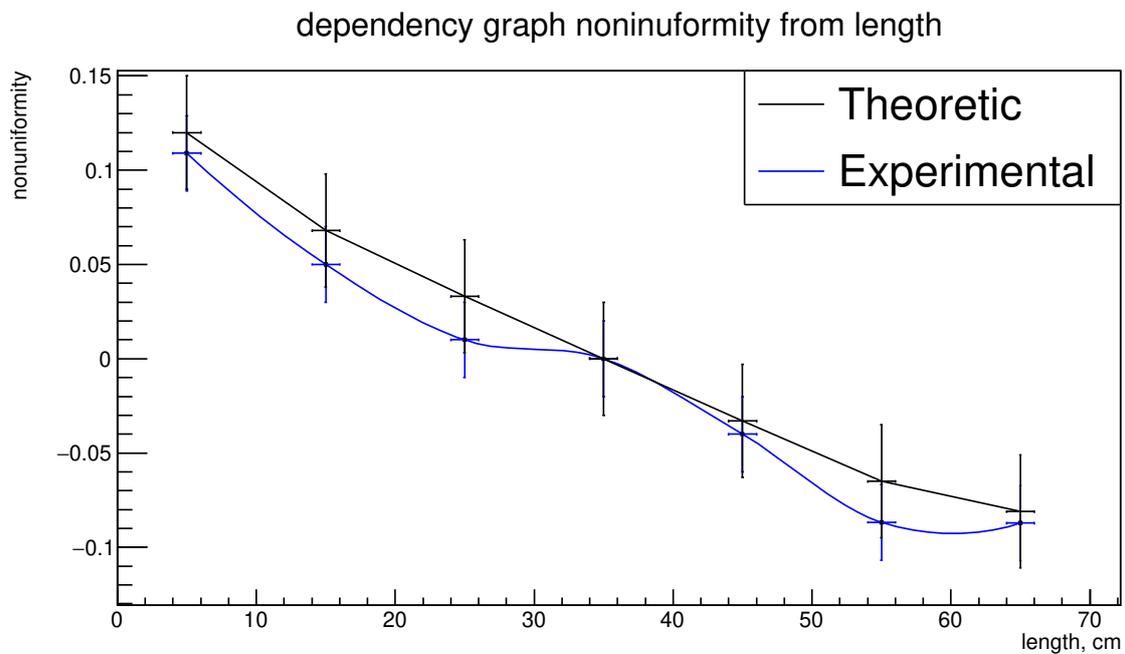


Рисунок 3.1 — График неоднородностей светособираения для сцинтиллятора №1

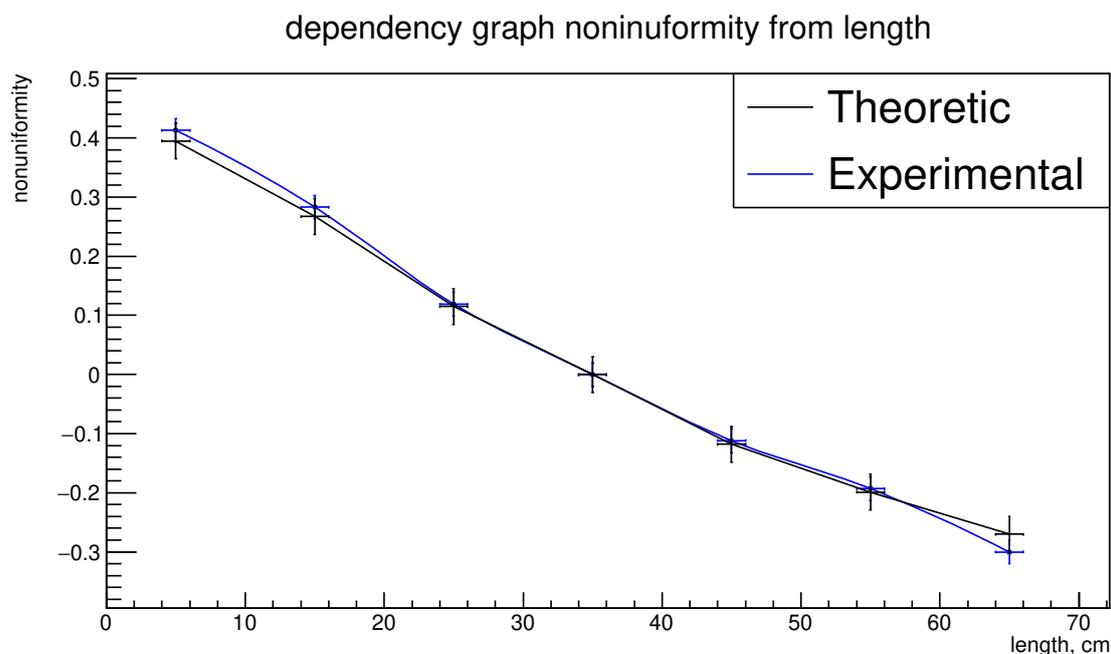


Рисунок 3.2 — График неоднородностей светособирания для сцинтиллятора №2

В результате соотнесения экспериментально и теоретически полученных неоднородностей были определены прозрачности пластиковых сцинтилляторов: $\lambda_1 = 3$ м для первого(рис. 3.1) и $\lambda_2 = 1$ м для второго(рис. 3.2). Таким образом, были определены неизвестные параметры сцинтилляторов.

3.3. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Светособирание зависит от размеров пластикового сцинтиллятора. Следовательно, для увеличения интенсивности регистрируемого потока фотонов разумно подобрать сцинтиллятор, определив его оптимальные габариты.

В этой работе оптимизация проводилась с помощью изотопа цезия ^{137}Cs . Были измерены средние значения положения пика комптоновского края для различной длины и площади поперечного сечения пластикового сцинтиллятора. Полученные значения были занесены в 3D-гистограмму, изображенную на рисунке 3.3.

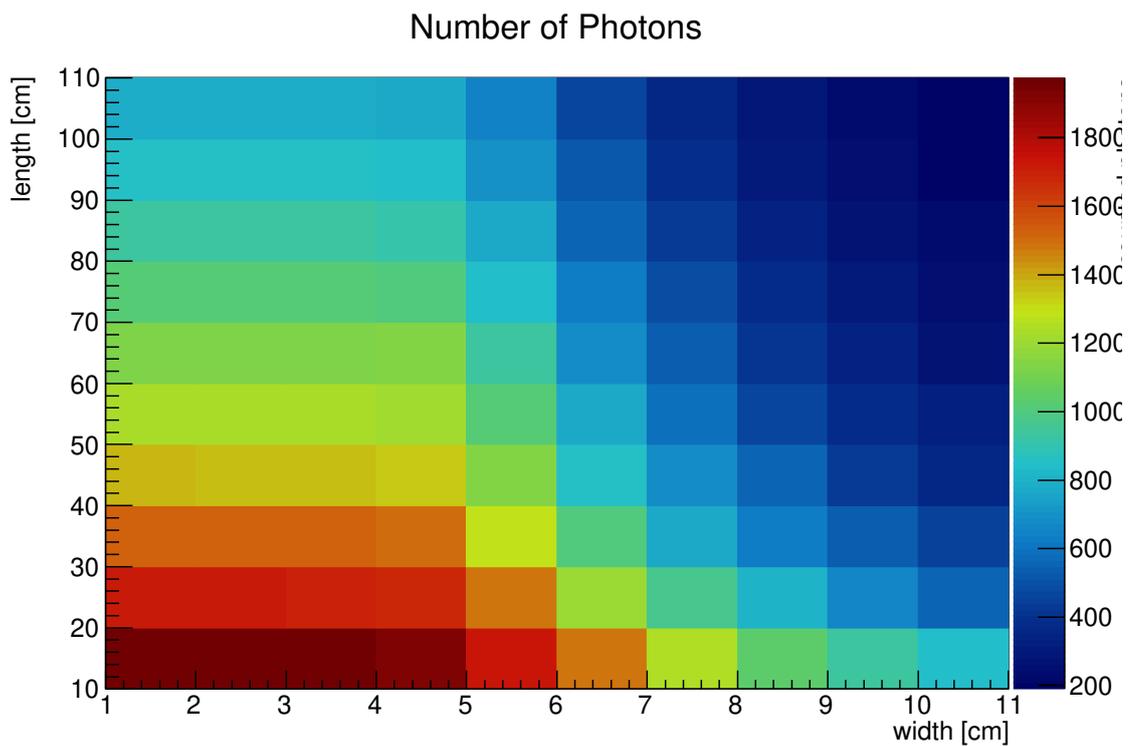


Рисунок 3.3 — Гистограмма зависимости $\bar{\sigma}(35)$ от размеров сцинтиллятора

Таким образом видно, что при уменьшении размеров сцинтиллятора световой выход увеличивается, поскольку потери интенсивности светового потока при столь маленьких параметрах становятся менее значительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено моделирование измерительного модуля детектора реакторных антинейтрино на основе пластикового сцинтиллятора.

В результате решения поставленных задач была построена модель установки и определены прозрачности имеющихся пластиковых сцинтилляторов. Также получены спектры радиоактивных источников и проведено исследование зависимости световыхода от размеров сцинтиллятора. Прозрачности сцинтилляторов составили 3 м и 1 м, а в результате оптимизации параметров сцинтилляционного спектрометра получены наилучшие размеры.

Дальнейшее развитие работы будет включать в себя определение других параметров сцинтиллятора. Затем будет смоделирована установка с оптимальными характеристиками и наложенными светоотражающими поверхностями с целью увеличения интенсивности регистрируемого светового потока и использования ее в измерительном модуля детектора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petr Vogel Anna C.Hayes. Reactor neutrino spectra. *arXiv*, 2016.
- [2] Muriel Fallot Chao Zhang, Xin Qian. Reactor antineutrino flux and anomaly. *HAL Science Ouverte*, 2019.
- [3] M.Fallot Th.A.Mueller, D.Lhuillier. Improved predictions of reactor antineutrino spectra. *arXiv*, 2011.
- [4] В.П. Кучинов М.Д. Скорохватов Е.П. Велихов, В.П. Кузнецов. Нейтринный контроль реакторов для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам. *ВАНТ*, 2022.
- [5] Ю.К.Акимов. *Детекторы ядерных излучений на основе пластиковых сцинтилляторов*. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1994.