

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»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛИСТИРОЛА**

Студент _____ М. А. Шадрин

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доц. _____ А. В. Гробов

Научный консультант,
аспирант _____ Г. Д. Долганов

Москва 2021

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИСТИРОЛА

| | |
|--|-------------------------|
| Студент | _____ М. А. Шадрин |
| Научный руководитель, к.ф.-м.н., доц. | _____ А. В. Гробов |
| Научный консультант, аспирант | _____ Г. Д. Долганов |
| Рецензент, к.ф.-м.н., н.с. | _____ Д. Г. Рудик |
| Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н. | _____ А. А. Кириллов |
| Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф. | _____ М. Д. Скорохватов |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 1 Общая информация | 6 |
| 1.1 Общие сведения | 6 |
| 1.2 Устройство SiPM | 9 |
| 2 Обоснование и описание эксперимента | 12 |
| 2.1 Обоснование эксперимента | 12 |
| 2.2 Описание эксперимента | 12 |
| 2.3 Экспериментальная установка | 13 |
| 2.3.1 Описание экспериментальной установки | 13 |
| 2.3.2 Плюсы и минусы геометрии детектора | 13 |
| 2.3.3 Характеристики радиоактивного источника | 15 |
| 3 Подготовка измерительной аппаратуры к работе | 18 |
| 3.1 Подготовка платы Petiros2A | 18 |
| 3.2 Подготовка платы xTDC4 | 19 |
| 4 Временные характеристики полистирола | 22 |
| 4.1 Измерение временных характеристик платой Petiros2A | 23 |
| 4.2 Измерение временных характеристик платой xTDC4 | 24 |
| 4.3 Сравнение результатов временных измерений для плат XTDC4 и Petiros2A | 25 |
| 5 Моделирование установки в пакете Geant4 | 29 |
| 5.1 Создание геометрии установки | 29 |
| 5.2 Проблемы моделирования | 29 |
| 5.3 Результаты моделирования | 30 |
| 5.4 Определение временного разрешения полистирола на основе данных моделирования | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6 | Определение положения радиоактивного источника | 34 |
| 6.1 | Определение положения радиоактивного источника при помощи платы xTDC4 | 34 |
| 6.2 | Определение положения радиоактивного источника при помощи платы Petiroc2A | 35 |
| 6.2.1 | Определение положения радиоактивного источника по амплитудным измерениям для каждого SiPM | 35 |
| 6.2.2 | Определение положения радиоактивного источника по временным измерениям | 37 |
| 6.3 | Определение положения радиоактивного источника с использованием 2 двух источников информации | 38 |
| 6.4 | Сравнение точности определения положения радиоактивного источника в различных подходах | 39 |
| 7 | Заключение | 40 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время физика элементарных частиц активно развивается, технологическое развитие позволяет проводить все более сложные эксперименты, а так же тщательнее анализировать получаемые данные для проверки существующих теоретических гипотез, что в конечном итоге должно приводить к расширению человеческих знаний о фундаментальном устройстве мира. Данное направление является крайне важным и перспективным, но для полноценной проверки любых теоретических предсказаний требуются правильно поставленные эксперименты, детекторы обладающие определенными параметрами, а так же люди которые смогут данные эксперименты проводить и интерпретировать результаты. Все это приводит к необходимости дальнейшего развития экспериментальной физики, улучшению существующих и созданию новых технологий. Но зачастую, технологии созданные для исследований выходят за пределы научных изысканий и проникают в другие сферы человеческой жизни, такие как медицину, анализ данных, приборостроение и др. Все это делает экспериментальную ядерную физику крайне перспективным направлением, без которого невозможно дальнейшее развитие фундаментальной науки, а получение навыков в построении детекторов и проведении эксперимента неотъемлемой частью обучения физиков-экспериментаторов.

Помимо развития фундаментальной науки, экспериментальная физика должна применяться в практических областях человеческой жизни. Одной из таких областей является ядерная медицина, в частности позитронная томография(ПЭТ). Изучение временных характеристик веществ является неотъемлемой частью процесса по развитию томографии. В настоящее время существуют концепции и практические реализации время-пролетных томографов.

В настоящее время в позитронной эмиссионной томографии, в тело пациента или в другой исследуемый объект вводят излучающий позитроны изотоп. Позитрон взаимодействует с электроном, что определяет событие, известное как позитронная аннигиляция, с образованием пары совпадаю-

щих $^{511}\text{кЭв}$ γ -квантов, которые вылетают под углами, близкими к 180 градусам. Пара γ -квантов, регистрируемая в течение временного интервала совпадения, обычно записывается ПЭТ-сканером. Во время типичного сканирования, регистрируется много миллионов γ -квантов, и полученные данные используют для формирования изображений и другой информации, отражающей распределение изотопа. Развитие технологий направлено на обеспечение максимального качества (пространственного разрешения) изображения, минимизируя при этом вводимую пациенту дозу радиофарм-препарата и время набора статистики.

В процессе времяпролетной ПЭТ измеряют разность между фактическими временами регистрации двух совпадающих γ -квантов и результат измерения используют для оценки положения события на линии срабатывания. Информацию о положении, в свою очередь, можно использовать в процессе реконструкции для повышения качества реконструированного изображения. [1].

Таким образом, изучение временных характеристик веществ и выработка методики определения координат радиоактивного источника являются актуальными задачами, поскольку позволят подобрать сцинтилляторы оптимально подходящие по характеристикам для применения в ПЭТ.

1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследования сцинтилляторов начались после 1940 года и вскоре были созданы сцинтилляторы на основе йодида натрия и йодида цезия (NaI , CsI). Данные сцинтилляторы обладают небольшой стоимостью и относительно просты в изготовлении, поэтому даже по прошествии более шестидесяти лет эти сцинтилляторы являются наиболее широко используемыми. Но, несмотря на это, поиск новых сцинтилляционных веществ идет достаточно активно. Так, широкое распространение получили кристаллы $LYSO$, BGO , $LaBr_3$ и многие другие в том числе и газообразные вещества, а также жидкие сцинтилляторы, например ксенон и аргон. Сцинтилляторы обладают рядом характеристик, таких как световыход, энергетическое разрешение, гигроскопичность, время высвечивания, плотность, эффективный атомный номер и радиоактивность[2].

Световыход — количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определённого количества энергии (обычно 1 МэВ)[3].

Предел светового выхода для кристаллических сцинтилляторов определяется количеством электрон-дырочных пар n_e , рожденных при взаимодействии гамма-кванта с энергией E_γ с веществом сцинтиллятора, которое зависит от ширины запрещенной зоны E :

$$n_e = \frac{E_\gamma}{\beta * E}, \quad (1.1)$$

где β — эмпирическая константа. Чем выше данная характеристика сцинтиллятора, тем более отчетливые сигналы мы будем видеть.

Даже при поглощении частиц с одинаковой энергией, амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано

- 1) Со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления.

- 2) С различной вероятностью доставки фотона к фотоприёмнику из разных точек сцинтиллятора
- 3) С разбросом высвечиваемого числа фотонов.

В результате в набранном спектре линия (которая для идеального детектора представляла бы дельта-функцию) оказывается размытой. Энергетическое разрешение — это характеристика размытия амплитуды при измерении моноэнергетического спектра. Наименьшее энергетическое разрешение R для сцинтилляторов, просматриваемых фотоэлектронным умножителем, определяется выражением[2]:

$$R = \frac{\Delta E}{E_\gamma}, \quad (1.2)$$

где ΔE — полная ширина на половине высоты пика полного поглощения на амплитудном спектре гамма-излучения.

При низком энергетическом разрешении пики распределений, стоящие рядом, начинают сливаться в один, что приводит к невозможности определения реальной энергии частицы.

Важной характеристикой сцинтилляторов является длительность высвечивания, или среднее время жизни возбужденного состояния. Это время характерно для каждого сцинтиллятора и имеет значения от 10^{-10} до 10^{-5} секунды. Процесс высвечивания сцинтилляции занимает конечное время. Так как время нарастания сцинтилляции значительно меньше времени спада (затухания сцинтилляции), то во всех практических случаях длительность сцинтилляции в целом можно характеризовать одной только постоянной времени t затухания процесса:

$$J = J_0 \exp \frac{-t}{\tau}, \quad (1.3)$$

Величина τ — время, в течение которого интенсивность высвечивания J падает в e раз. В экспериментах, где требуется высокое временное разрешение, сцинтилляторы выбираются с достаточно малым временем высвечивания. Стоит отметить, что существуют вещества, в которых есть несколько характерных времен, в таком случае время будет сумма нескольких экспонент.

В зависимости от расположения атомов сцинтиллятора изменяется

вероятность взаимодействия γ -кванта с веществом, как следствие при выборе сцинтиллятора, так же следует учитывать плотности различных веществ для определения оптимального для детектирования γ -квантов. Следующей характеристикой является эффективный атомный номер. Под эффективным атомным номером сложного вещества понимается атомный номер такого условного простого вещества, для которого коэффициент передачи энергии излучения, рассчитанный на один электрон среды, является таким же, что и для данного сложного вещества. Эффективный атомный номер используется для расчета многих явлений происходящих внутри сцинтиллятора при взаимодействии с γ -квантом. Чем выше данная характеристика, тем больше сечение данных процессов.

Стоит отметить, что некоторые сцинтилляторы обладают собственной радиоактивностью, что необходимо учитывать при работе с ними. Собственная радиоактивность создает фон который может значительно изменять энергетический спектр радиоактивных источников с низкой активностью.

1.2. УСТРОЙСТВО SiPM

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) (рис.1.1) представляет собой детектор, чувствительный к единичным фотонам, который сочетает в себе эксплуатационные характеристики, превосходящие традиционные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Детектирование фотонов SiPM осуществляется за счёт упорядоченного набора (матрицы) плотно упакованных лавинных фотодиодов, выполненных на общей кремниевой подложке, и работающих в гейгеровском режиме (SPAD сенсоры), со встроенными шунтирующими резисторами, преобразующими двоичный сигнал этих микроячеек в единый аналоговый сигнал. Характерный размер одной ячейки составляет 10-100 мкм. Площадь чувствительной поверхности находится в пределах от 1×1 до 6×6 мм² [4].

Для предотвращения зарядовой связи между отдельными ячейками, пиксели располагаются с определенным интервалом. Посредством алюминиевых шин все ячейки объединены и к ним приложено одинаковое напряжение смещения, которое на несколько вольт превышает напряжение пробоя р-п-перехода, что обеспечивает работу в гейгеровском режиме. Каждый пиксель соединен с общей шиной посредством индивидуального пленочного токоограничивающего резистора. При попадании кванта света в активную область ячейки в ней развивается самогасящийся гейгеровский разряд. Гашение, то есть прекращение разряда, происходит из-за падения напряжения на р-п-переходе ниже пробойного благодаря наличию резистора, который не допускает заметной зарядки пикселя от источника напряжения за время протекания лавинного процесса. В результате гейгеровский разряд в каждой ячейке ограничен. Площадь ячейки и сопротивление индивидуального резистора выбираются так, чтобы за характерное время электрической релаксации емкости пикселя вероятность темновой генерации носителей заряда в его чувствительной области была значительно меньше единицы.

Весь SiPM представляет собой аналоговый детектор, так как выходной сигнал есть сумма сигналов с каждой ячейки фотодиода, которые суммируются на общей нагрузке (проводящей шине). Сигнал каждого пикселя является логическим и не зависит от числа первоначальных носителей,

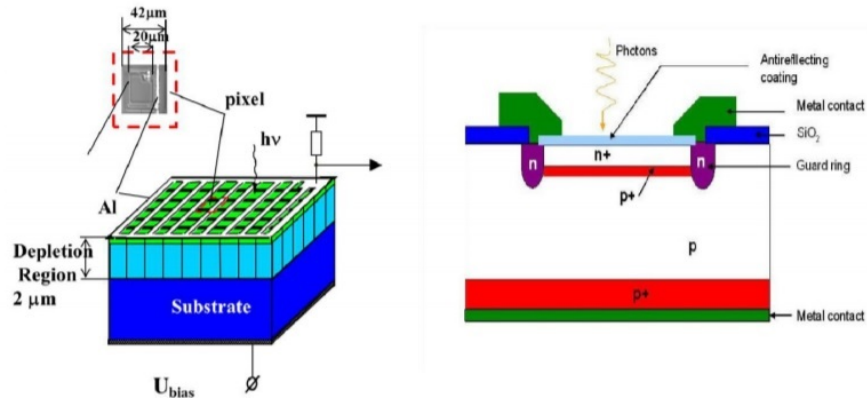


Рисунок 1.1 — устройство SiPM

вызвавших срабатывание ячейки. Отклик детектора на слабые световые вспышки пропорционален их интенсивности. Фотоотклик прибора остается линейным до тех пор, пока вероятность одновременного попадания двух и более фотонов на один пиксель не становится значительной.

Основной характеристикой прибора является эффективность регистрации фотона [4] ϵ , которая является произведением квантовой эффективности р-п-перехода QE , геометрического фактора A и вероятности возникновения гейгеровского разряда G .

$$\epsilon = QE \times A \times G \quad (1.4)$$

Данную характеристику в литературе часто называют квантовая эффективность.

Квантовая эффективность р-п-перехода — это вероятность генерации фотоном свободного носителя, который достигает области умножения, т.е. той области высокого поля, достаточного для ударной ионизации. Геометрический фактор определяется соотношением активной и общей площади ячейки SiPM и зависит от размеров ячеек. Вероятность возникновения гейгеровского разряда при попадании свободного носителя в область высокого поля зависит от разности между приложенным к SiPM напряжением и напряжением пробоя.

Квантовая эффективность сильно зависит от длины волны, регистрируемой диодом. На сегодняшний день типичное значение ϵ в максимуме спектральной чувствительности фотодиода находится в диапазоне 20 – 50%. [2] Так же стоит отметить одну из основных особенностей фо-

тодиодов с гейгеровским усилением, которой является довольно ощутимая частота шумовых импульсов. Это связано с тем, что любой свободный носитель, попавший в зону гейгеровского усиления, может вызвать образование лавины. Частота шумовых импульсов зависит от напряжения питания и температуры

Частота шумовых импульсов гейгеровских фотодиодов при комнатной температуре довольно высока и составляет, что ограничивает их применение при регистрации сверхслабых (на уровне одиночных фотонов) потоков света. Однако при охлаждении и повышении порога срабатывания частота шумовых импульсов резко падает, и возможности применения SiPM расширяются.

Одной из важнейших характеристик является коэффициент усиления K кремниевого фотоумножителя, который определяется значением заряда, накопленного ёмкостью ячейки.

$$K = \frac{C_a(U - U_1)}{e} \quad (1.5)$$

где C_a — ёмкость ячейки; $(U - U_1)$ — перенапряжение, e — заряд электрона. Зависимость коэффициента усиления SiPM от перенапряжения носит линейный характер. При понижении температуры можно достичь большего перенапряжения и, соответственно, большего коэффициента усиления.

Ещё одной важной характеристикой является временное разрешение SiPM. Оно определяется временем развития гейгеровского разряда в ячейке и составляет величину от десятков до сотен пикосекунд в зависимости от размера ячейки и плотности упаковки матрицы.

2. ОБОСНОВАНИЕ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью проведения данного эксперимента является измерение временных характеристик полистирола, а так же определение точности восстановления координат радиоактивного источника, на основе временных и амплитудных характеристик сигналов с 2 SiPM, получаемых в измерениях на данной установке. Помимо этого, в данном эксперименте выделяются задачи по отработке методики измерения временных характеристик веществ и обработке полученных данных. Эти задачи являются актуальными, поскольку на данный момент неизвестно, какие вещества лучше всего подойдут для применения их в ядерной медицине, т.к. для многих перспективных веществ характеристики слабо изучены. В связи с использованием нового оборудования, изучение характеристик требовало разработки оптимальной методики проведения измерений.

Стоит отметить, что измерение характеристик полистирола и выработка методики проведения измерений не являются конечным итогом данного эксперимента. После планируется проведение исследований аргона и создание небольшого прототипа ПЭТ на кристаллах GAGG. Это является логическим продолжением проводимого в настоящее время эксперимента по определению временных характеристик полистирола. [5].

2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения временных характеристик полистирола была изготовлена установка, представленная на рис.2.1. Полистирол представляет из себя органический сцинтиллятор с низкой эффективностью регистрацией γ , и высокой эффективностью регистрации электронов. качестве источника был использован Bi^{207} , который располагается под сцинтиллятором на

расстоянии около 1 см. Для измерения временных характеристик к сцинтиллятору, через оптическую смазку, присоединены два кремниевых фотоумножителя Hamamatsu S13360-6075PE. При прохождении частиц через слой сцинтиллятора происходит образование фотонов, которые начинают двигаться по сцинтиллятору к SiPM, данный эффект достигается за счет наличия слоя с полным внутренним отражением. После происходит преобразование света в электрический импульс, который от фотоумножителя поступает на усилитель (с постоянным коэффициентом усиления), от которого подается на плату для измерения времен между сигналами. Запись данных с плат проводилась непосредственно в компьютер. По полученным данным вычислялось временное разрешение данной установки и самого полистирола. Так как в зависимости от положения источника изменяется время между сигналами с двух SiPM, то при проведении серии измерений с различными положениями источника можно получить зависимость временного разрешения от положения источника и научиться определять координату источника по времени между сигналами.

2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.3.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ходе эксперимента использовалась геометрия, схема которой представлена на рисунке [2.1](#)

Установка состоит из пластикового сцинтиллятора на основе полистирола, 2 SiPM Hamamatsu, 2 усилителей CAEN A1423B (не представлены на рисунке), платы Petros2A и платы xTDC4, а так же радиоактивного источника Bi^{207} .

2.3.2. ПЛЮСЫ И МИНУСЫ ГЕОМЕТРИИ ДЕТЕКТОРА

Плюсы:

- 1) Протяженность сцинтиллятора

За счет протяженности сцинтиллятора появляется возможность проведения измерений с использованием радиоактивного источника с

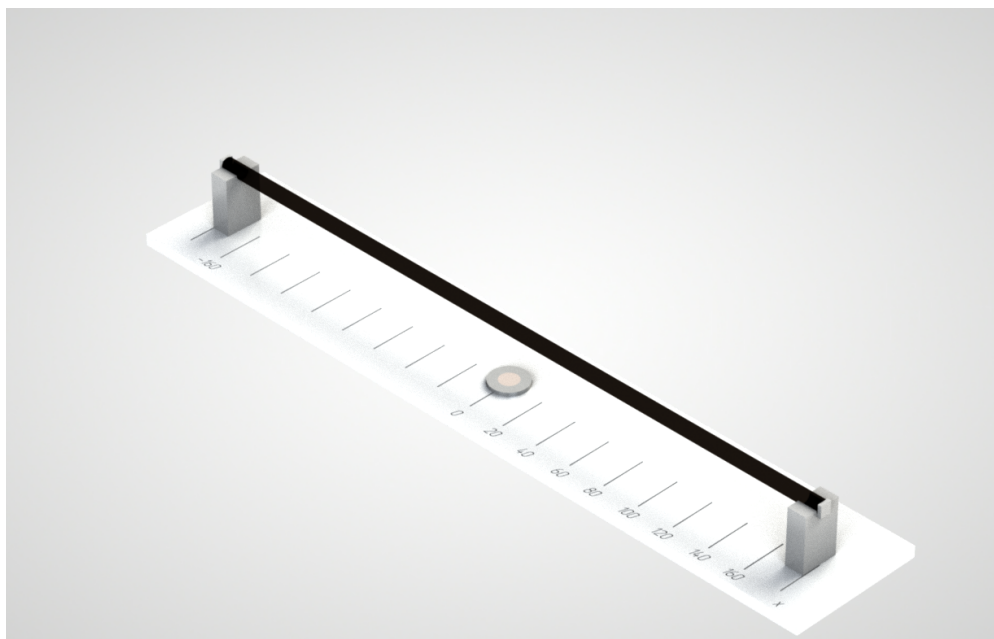


Рисунок 2.1 — Фото-реалистичный вид геометрии установки

низкой интенсивностью излучения, поскольку для всех измерений источник можно располагать вплотную к сцинтиллятору и не терять скорость счёта из-за уменьшения телесного угла регистрации. При этом нет необходимости в позитронном источнике, поскольку отсутствует необходимость в наличии двух γ -квантов.

Минусы:

- 1) Отсутствие коллиматора Данный недостаток может быть устранен созданием электронной коллимации по средствам добавления еще одного сцинтиллятора с SiPM напротив источника, если совпадение пройдет по 3 каналам, то можно говорить о том в каком диапазоне углов вылетел электрон. Данный метод будет работать только при измерениях для определения характеристик сцинтилляторов и не подходит для реальных измерений, в которых положение источника неизвестно. Так же данный способ не будет работать, в случае если электрон отдал всю свою энергию в объеме первого сцинтиллятора. Стоит отметить, что в данной работе не использовался свинцовый коллиматор, поскольку в измерениях с ним значительно падала скорость счета детектора, а так же пропадали электронные линии с амплитудного спектра.

2.3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА

В качестве радиоактивного источника использовался Bi^{207} . Данный источник обладает достаточно низкой активностью, что позволяет использовать его в учебных целях, без серьезного вреда здоровью.

Испускание конверсионного электрона (электрона внутренней конверсии) является одним из двух конкурирующих процессов перехода ядра из возбуждённого в основное состояние (другим процессом является испускание γ -кванта). Энергия возбуждения ядра E в процессе внутренней конверсии непосредственно передается одному из электронов внутренней атомной оболочки, который испускается из атома. На рис.2.2 представлена схема распада Bi^{207} в результате e -захвата. На рис.2.3 представлен

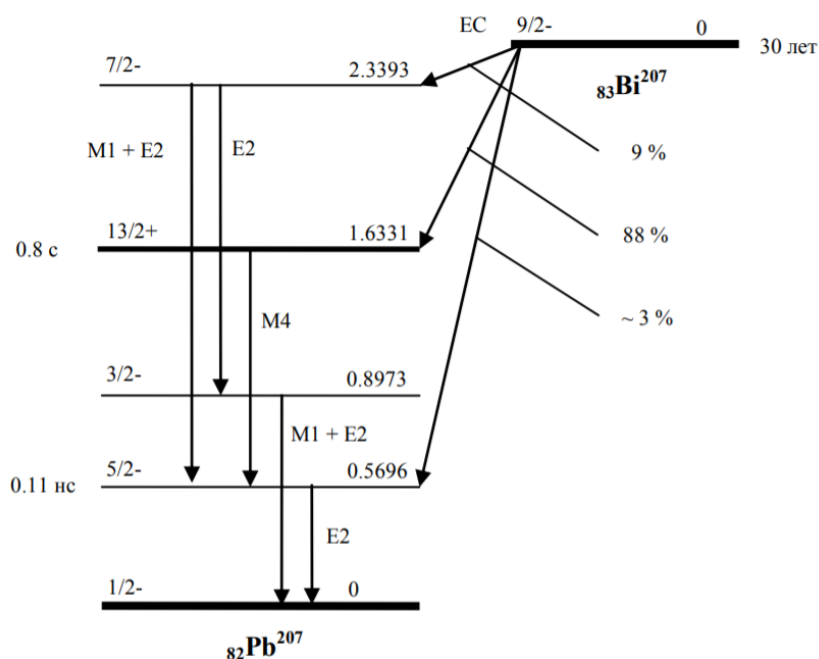


Рисунок 2.2 — Схема распада ядра Bi^{207} в результате e -захвата

спектр висмута в полистироле, пик соответствует линии электронов 976 КэВ. Спектр γ -квантов в полистироле приведен на рис.2.4, для его получения при наборе статистики между источником и сцинтиллятором была помещена металлическая пластина, выступающая как поглотитель электронов. Можно заметить, что на данном спектре отсутствуют пики полного поглощения, что характерно для органических сцинтилляторов. Полный спектр представлен на рис.2.5, набор данного спектра происходил с неорганическим кристаллом $LYSO(Ce)$.

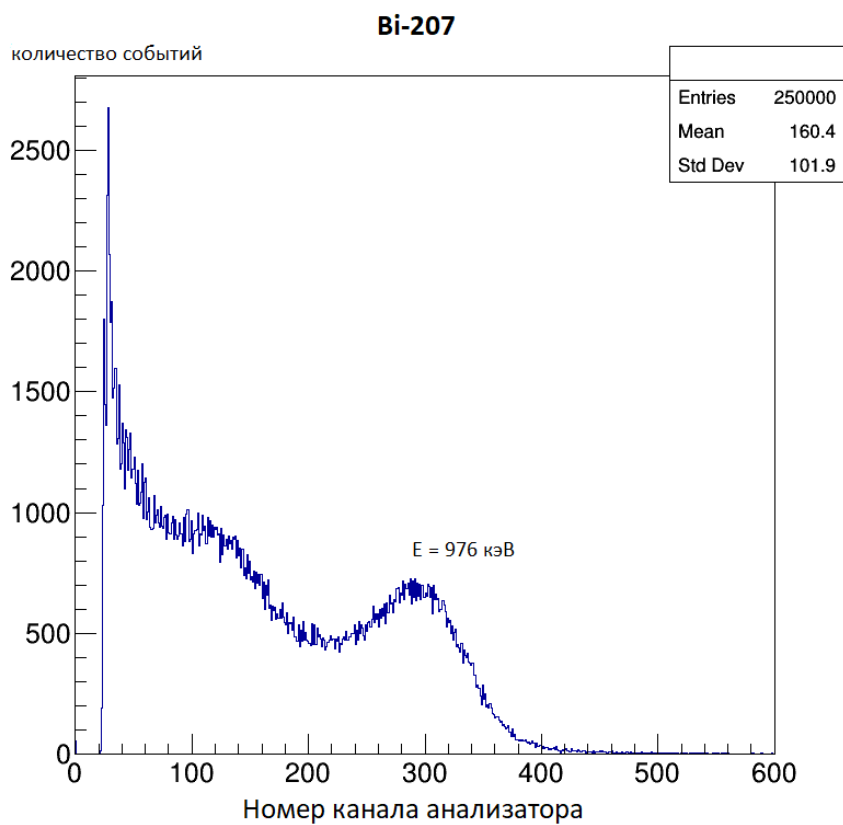


Рисунок 2.3 — спектр Bi^{207} в полистироле

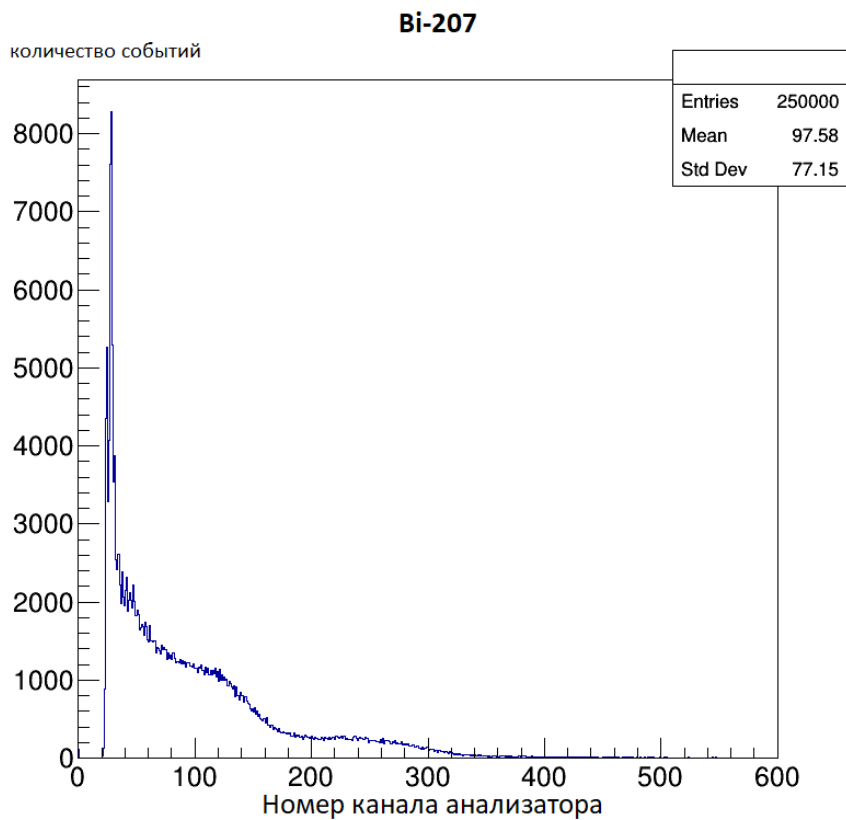


Рисунок 2.4 — спектр γ -квантов Bi^{207} в полистироле

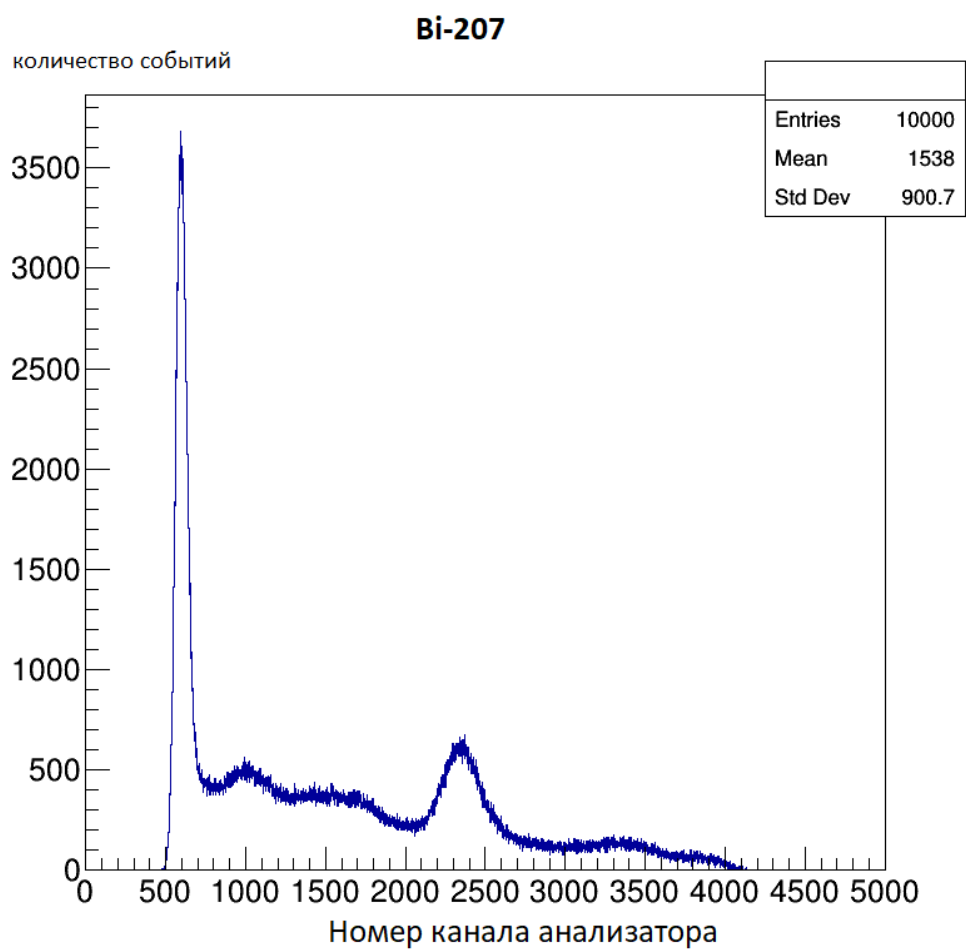


Рисунок 2.5 — спектр Bi^{207} в кристалле $LYSO$

3. ПОДГОТОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ К РАБОТЕ

3.1. ПОДГОТОВКА ПЛАТЫ PETIROC2A

Для подготовки к работе платы Petiroc2A и проведения эксперимента, была построена модель детектора, состоящая из сцинтиллятора (пластик: полистирол), двух SiPM HAMAMATSU S13360-6075PE соединенных с сцинтиллятором через оптическую смазку, усилителей CAEN A1423B с коэффициентом усиления 18 dB, и источника ионизирующего излучения Bi^{207} . Все элементы данной установки были помещены в металлический контейнер изолированный от внешнего света. К нему подведено питание SiPM. Для подготовки платы к работе, были припаяны разъемы. После серии измерений были обнаружены определенные сбои в работе, которые проявлялись в различных результатах для одинаковых измерений проводившихся с генератором сигнала. Данные сбои были устранены подбором проводов, а так же перепайкой некоторых контактов. Стоит отметить важность данных приготовлений, т.к. они позволяют избежать систематических ошибок и сбоев при проведении измерений, а так же значительно уменьшают вклад возможных ошибок, вызванных данными дефектами, в конечные результаты реального эксперимента.

В функционал данной платы входит возможность измерения разницы времен между событиями по различным каналам и возможность проведения зарядовых (амплитудных) измерений[6].

Перед началом работы были проведены калибровочные измерения с разными параметрами платы и напряжения на SiPM с целью определения оптимальных рабочих параметров. Для настройки платы использовалось программное обеспечение Weegoc от производителя платы.

По технической документации[6] платы Petiroc 2A были определены параметры измерений, которые записываются в файлы для выходных данных. Все данные были приведены в виде столбцов соответствующих

определенному параметру, для удобства работы с данными, они были записаны в деревья, используемые в пакете для обработки данных ROOT, после чего была создана программа для определения временных параметров по записанным данным. Необходимость в правильной идентификации всех записанных данных возникла в связи с необходимостью проведения будущих отборов интересующих нас событий.

В измерениях с платой Petiroc2A и генератором импульсов была определена приборная погрешность данной платы, которая равна $FWHM_{petiroc} = (428 \pm 30)$ пс (рис.3.1). Такое ограничение на временное разрешение может стать критической проблемой для будущих измерений быстрых сцинтилляторов (BaF2). Данное значение приблизительно 2-3 раза меньше, чем погрешность получаемая в измерениях с реальным источником и пластиком, что может повлиять на измеряемое значение временного разрешения детектора. Поэтому возникла необходимость в использовании электроники позволяющей проводить измерения с большей точностью. Для данных целей была выбрана 4 канальная плата xTDC4.

Правильная подготовка установки к проведению эксперимента, является критически важным этапом в работе, для физика-экспериментатора, т.к. данные навыки необходимы для правильного проведения эксперимента, в котором исключаются ошибки связанные с некорректной работой электроники. Иначе результаты эксперимента могут содержать ошибки, связанными с некорректной работой детектора. Неправильная настройка и калибровка так же может привести как к систематическим ошибкам, так и к значительному усложнению последующей обработки данных.

3.2. ПОДГОТОВКА ПЛАТЫ XTDC4

Для определения функционала данной платы была изучена техническая документация[7], из которой была получена информация о режимах работы платы и необходимых параметрах входного сигнала. Вместе с платой предоставлялся код примера работы с ней, но данный код не работал. Так же в документации не был описан принцип записи данных, а пример программы по опросу платы приведенный в документации отличался от поставляемого в комплекте с платой. В связи с этим потребовалось на-

писать программу по опросу платы, с дальнейшей записью получаемых данных. В данной программе была реализована логика позволяющая однозначно идентифицировать совпадения сигналов по нескольким каналам платы, поскольку это необходимо в измерениях с 2 SiPM.

После было проведено измерение с генератором, на рисунке 3.2 представлено распределение числа событий в зависимости от разницы времен между сигналами, после первичного анализа данных временное разрешение составило $FWHM_{xTDC} = (19 \pm 4)$ пс. Данное значение совпадает с заявленным производителем данной платы. Вся обработка проводилась в пакете для обработки данных ROOT.[8]

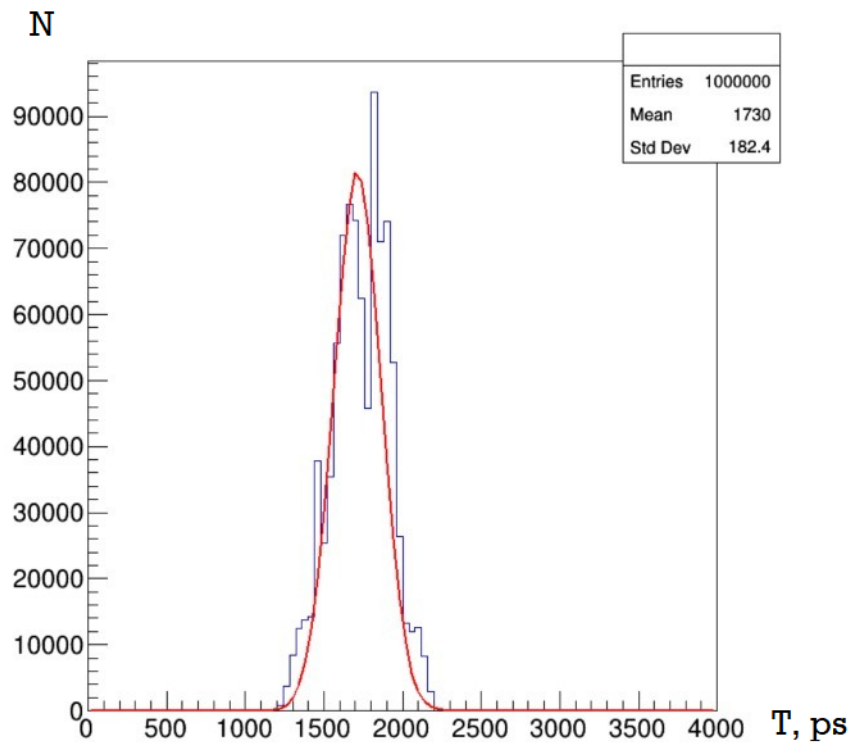


Рисунок 3.1 — Разница времен между событиями при измерении с генератором постоянных импульсов для платы Petiros 2A

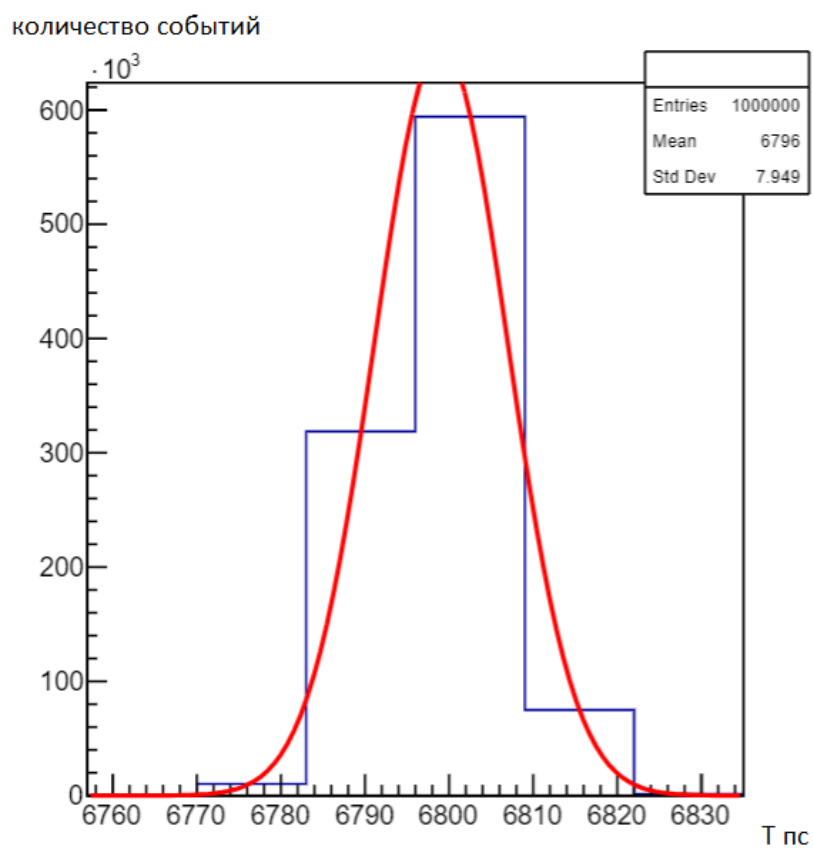


Рисунок 3.2 — Разница времен между событиями при измерении с генератором постоянных импульсов для платы xTDC4

4. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИСТИРОЛА

После получения всех необходимых навыков по работе с аппаратурой и подбора оптимальных параметров была проведена серия временных измерений в условиях совпадений двух каналов, каждое измерение представляет из себя набор событий при определенном положении радиоактивного источника и определенном напряжении подаваемом на усилители и SiPM.

Серия измерений проводилась для различных положений источника (от -160 до 160 по оси x см. рис.4.1 с шагом 20мм).

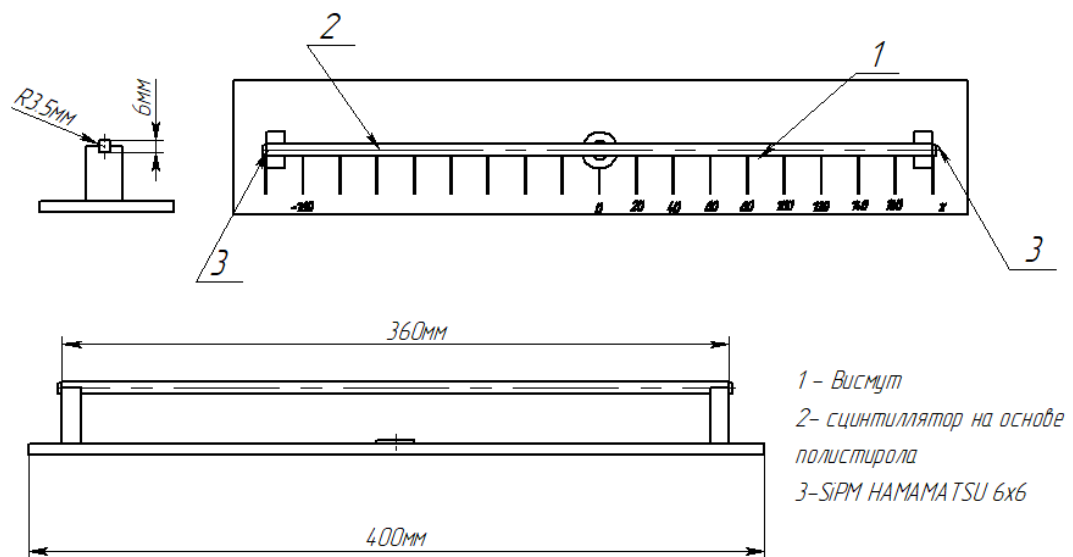


Рисунок 4.1 — Схематичное изображение установки в 3-х проекциях

4.1. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАТОЙ РЕТІРОС2А

Плата Retiroc2A представляет из себя многоканальное измерительное устройство, для проведения временных и амплитудных измерений. Для измерения временных характеристик полистирола была проведена серия из более чем 60 измерений с различными положениями источника и различными параметрами установки (напряжения, усиления и др.)

Для расчета временных характеристик была написана программа, с помощью которой проводился расчет времени между сигналами, которые поступили с двух фотоумножителей. После были построены распределения количества событий, при постоянном положении источника, по времени между событиями. На рис.4.2(а), представлен вид данного распределения. Как можно заметить, справа и слева от основного пика распределения, наблюдаются два побочных ухудшающих временное разрешение. Поэтому для улучшения временного разрешения были введены зарядовые отборы, заключающиеся в выборе сигналов от частиц с определенной энергией. Результат их применения представлен на рис.4.2(б).

В ходе проведения измерения разницы времен между сигналами с двух фотоумножителей была замечена особенность, связанная с неоднородностью временного разрешения на разных участках сцинтиллятора. Как можно увидеть на рис.4.3, временное разрешение изменяется в зависимости от положения. Проведение зарядовых отборов позволило уменьшить флуктуации временного разрешения, однако данный эффект всё ещё наблюдаем (рис.4.5). Данный эффект может быть связан со внутренними неоднородностями пластика, а так же наличием отражения света от SiPM, которое начинает играть роль при определенном расстоянии от источника до фотоумножителя. На рис.4.5 приведен график распределения временного разрешения в зависимости от положения источника. Как можно заметить значение приведенное на графике изменяется без явной зависимости от положения источника. Результаты измерений временного разрешения, полученные для данного пластика на плате Retiroc2A, находятся в промежутке от 0.8 нс до 1 нс. Данные значения нельзя считать окончательным, поскольку сама плата обладает временным разрешением рав-

ным $FWHM_{petiroc} = (182 \pm 13)$ пс в измерении с генератором. В связи с этим возникает необходимость проведения аналогичных измерений на оборудовании обладающем лучшими временными характеристиками. В случае данного эксперимента для этого была применена плата xTDC4, с собственным временным разрешением $FWHM_{xTDC} = 19 \pm 4$ в измерении с генератором.

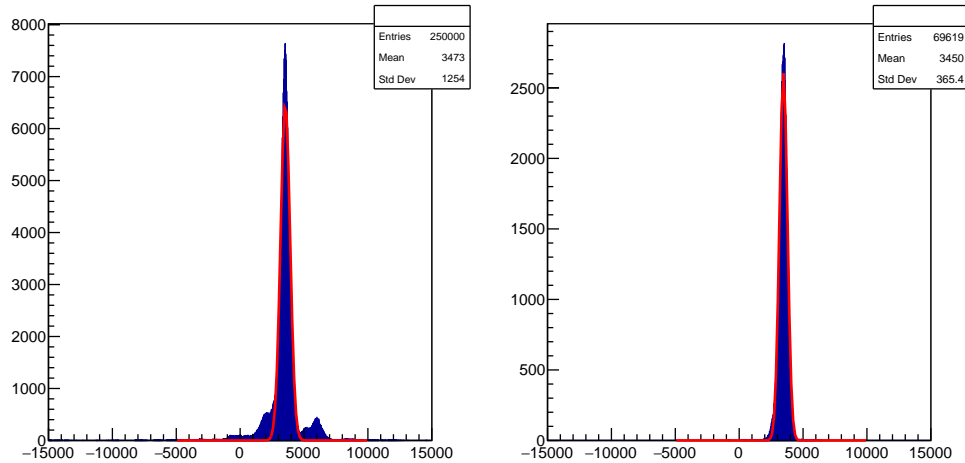


Рисунок 4.2 — Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x = 0$ относительно центра; слева до отбора по энергии(а), справа после отбора по энергии(б)

4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАТОЙ XTDC4

Для определения временного разрешения полистирола на плату xTDC4 подавалось 3 сигнала, 1 сигнал "старт" с генератора постоянных прямоугольных импульсов с частотой 1 МГц, и два сигнала "стоп" с фотоумножителей. После набора достаточной статистики (100000 событий) вычислялись параметры распределений разницы времен между сигналами(4.6), после этого радиоактивный источник перемещался и статистика набиралась заново. По полученным параметрам распределений была построена зависимость разницы времен между сигналами в зависимости от положения источника. Как и для измерений на плате Petiroc2A, на рис. 4.7 можно увидеть наличие зависимости временного разрешения от положения источ-

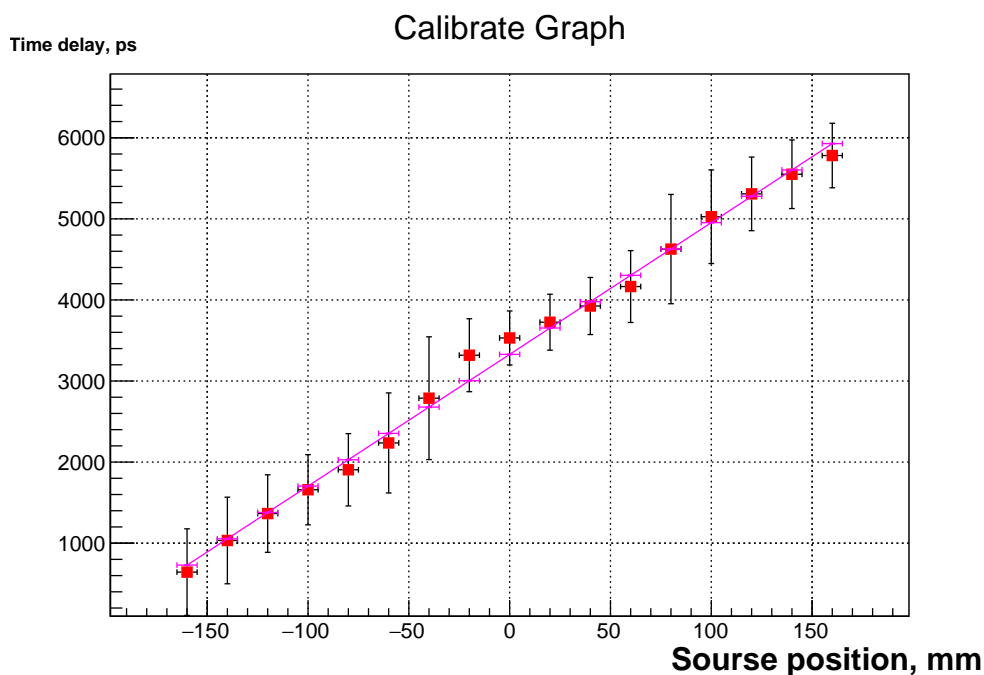


Рисунок 4.3 — График зависимости разницы времен между сигналами от положения источника до проведения зарядовых отборов

ника, это объясняется неоднородностью вещества сцинтиллятора, а так же наличием отражения света от поверхности фотоумножителей. Временное разрешение полученные для данного пластика на плате xTDC, находятся в промежутке от 0.8 нс до 1 нс.

4.3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПЛАТ XTDC4 И PETIROC2A

Несмотря на лучшее временное разрешение платы xTDC4 относительно платы Petiros 2A, не удалось добиться существенного улучшения значения временного разрешения получаемого на данной установке, что свидетельствует о том, что существующая погрешность вносится именно геометрией, материалом сцинтиллятора и отсутствием коллиматора.

Несмотря на это наблюдается уменьшение разброса значений временного разрешения для сцинтиллятора. Как видно на рис.4.8 график обозначенный синим цветом содержит в себе более узкий диапазон значений. Данный график соответствует временному разрешению получаемому на плате xTDC4.

Так же стоит отметить, что при работе с платой Petiros2A, прово-

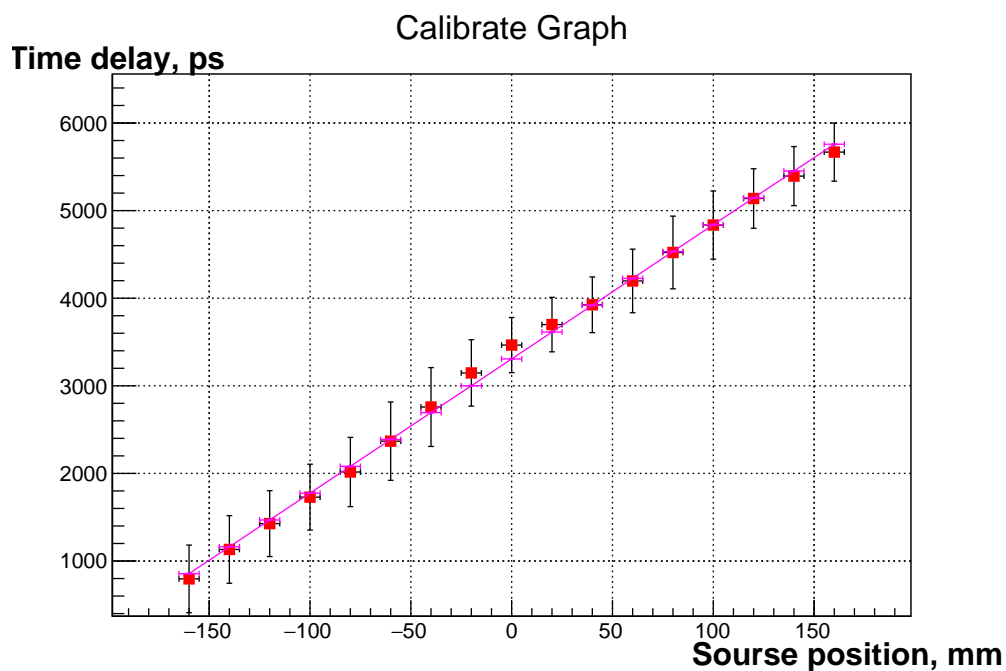


Рисунок 4.4 — График зависимости разницы времен между сигналами от положения источника после проведения зарядовых отборов для измерений

дидились зарядовые отборы которые улучшили разрешение для некоторых точек в 2 раза. Обращая на это внимание, можно предположить, что при добавление аналогичных отборов в работе с xTDC4, можно будет так же добиться улучшения разрешения, но в рамках данного эксперимента это не проводилось, из-за отсутствия необходимого оборудования. При будущем изучении временных характеристик веществ, планируется проверка данного предположения.

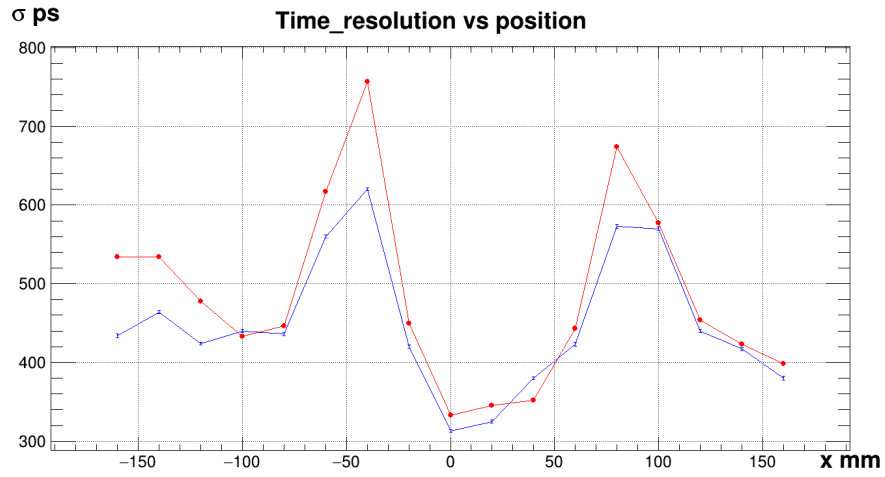


Рисунок 4.5 — График зависимости σ от положения источника; красным - до проведения зарядовых отборов; синим - после проведения зарядовых отборов;

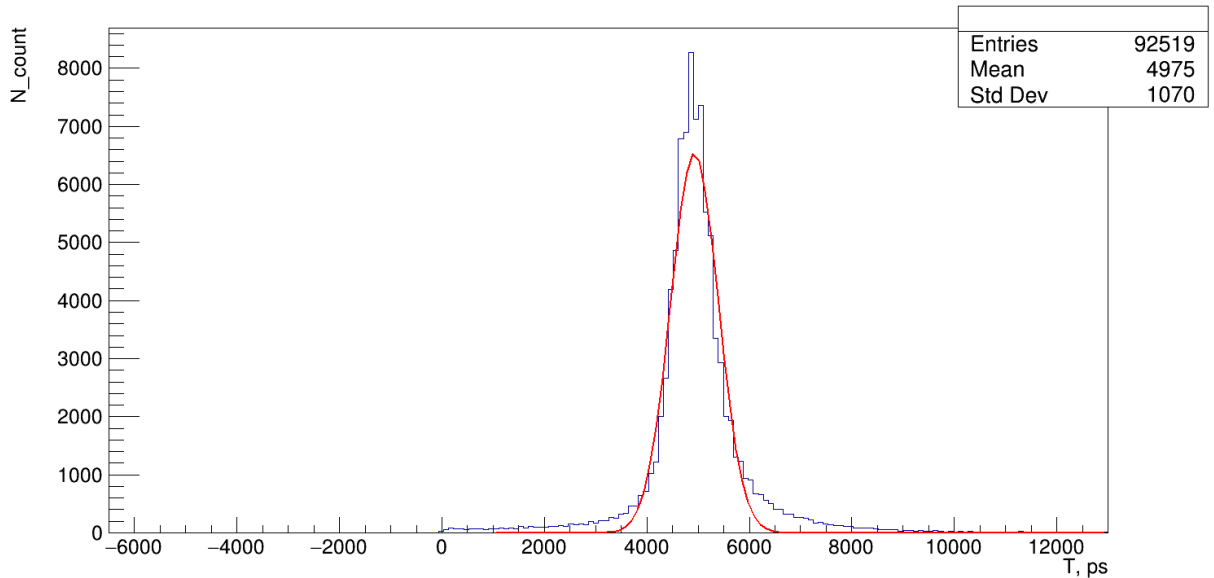


Рисунок 4.6 — Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x=0$

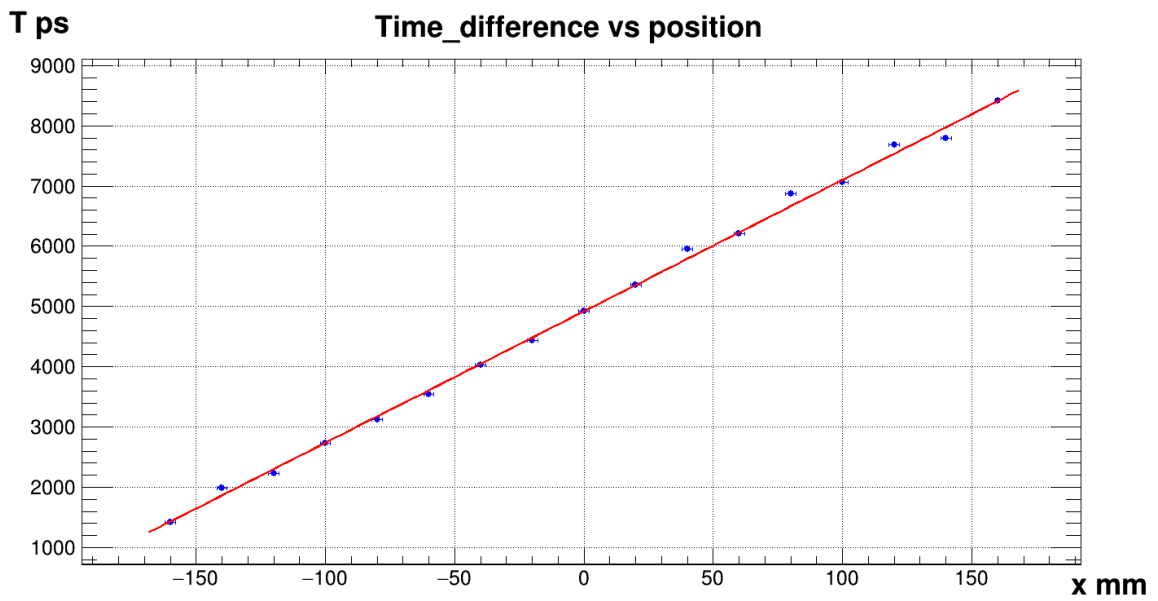


Рисунок 4.7 — График зависимости разницы времен между сигналами от положения источника, измеренной на плате xTDC

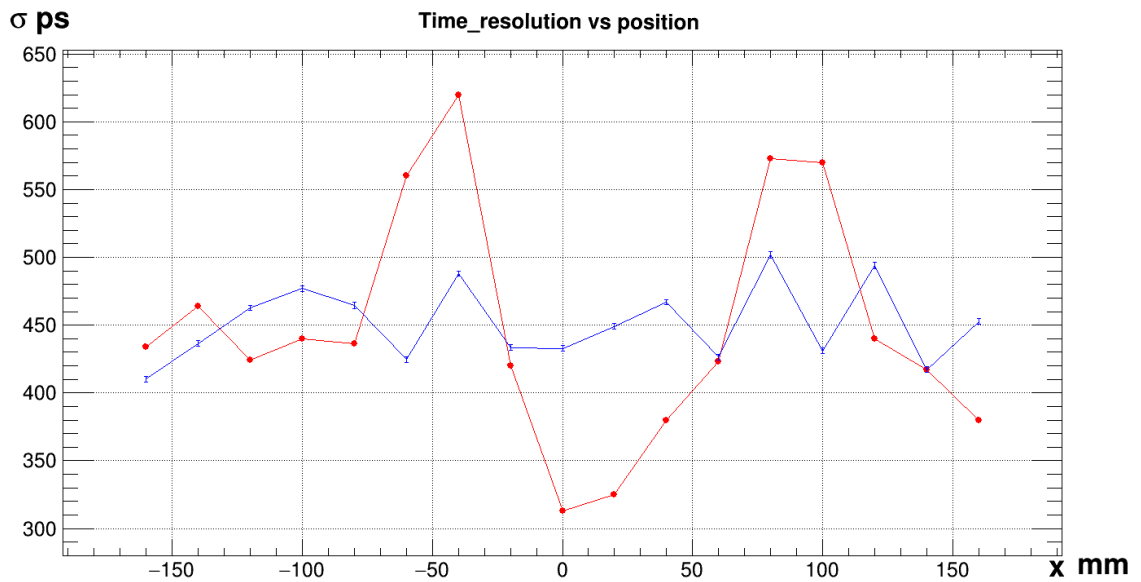


Рисунок 4.8 — График зависимости временного разрешения в зависимости от положения источника; красным цветом отмечены значения для платы Petiros2A; синим цветом отмечены значения для платы xTDC4;

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ В ПАКЕТЕ GEANT4

5.1. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ УСТАНОВКИ

Для оценки корректности полученных в эксперименты результатов необходимо моделирование физических процессов происходящих внутри сцинтиллятора. Для этого было проведено моделирование в пакете Geant4. Для этого была воссоздана геометрия детектора, включающая в себя сцинтиллятор, светоотражающий слой, два SiPM, и радиоактивный источник. Все размеры используемые в моделировании совпадают с реальными, это необходимо для получения более точных результатов. Так же был воссоздан розыгрыш вылета элементарной частицы в телесный угол, т.к. из-за наличия неопределенности в направлении вылета частицы и места взаимодействия со сцинтиллятором возникает дополнительное увеличение временного разрешения. Это необходимо учитывать поскольку в эксперименте не использовался коллиматор и частицы могли взаимодействовать со сцинтиллятором практически на всей длине.

Дополнительно стоит сказать о том, что Bi^{207} испускает как электроны, так и γ -кванты, что так было учтено при моделировании. При этом частота испускания данных видов частиц приблизительно одинакова.

5.2. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основной проблемой возникшей в процессе моделирования является неопределенность сцинтиллирующей добавки, используемой в данном образце полистирола. Для уменьшения вероятности ошибки был выбран один из образцов пластика, предоставляемых производителем в настоящее время. Время высвечивания $t_{fast} = 1.8$ нс, $t_{slow} = 14$ нс. Из-за данной проблемы теоретический расчет результатов эксперимента может отличаться от реальных значений, но должен совпадать по порядкам величин. Так

же, из-за наличия этой проблемы было принято решение не оценивать амплитудные характеристики получаемые в ходе характеристики, т.к. для них возникает еще один источник неопределенности связанный с наличием поверхностного слоя, обеспечивающего полное внутреннее отражение при движении фотонов в нём. Моделирование данного слоя в настоящий момент не дало корректного результата, и поэтому не включено в данную работу.

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки корректности моделирования были рассчитаны значения экспериментально полученных величин. На рис.5.1-5.2 представлены распределения числа фотонов зарегистрированных SiPM в зависимости от времени взаимодействия γ -квантов с веществом сцинтиллятора, что по сути представляет из себя высвечивание. Так же были подсчитаны эффективности регистрации γ -квантов и электронов полистиролом, которые составили 22% и практически 100% соответственно, что так же совпадает с экспериментальными данными.

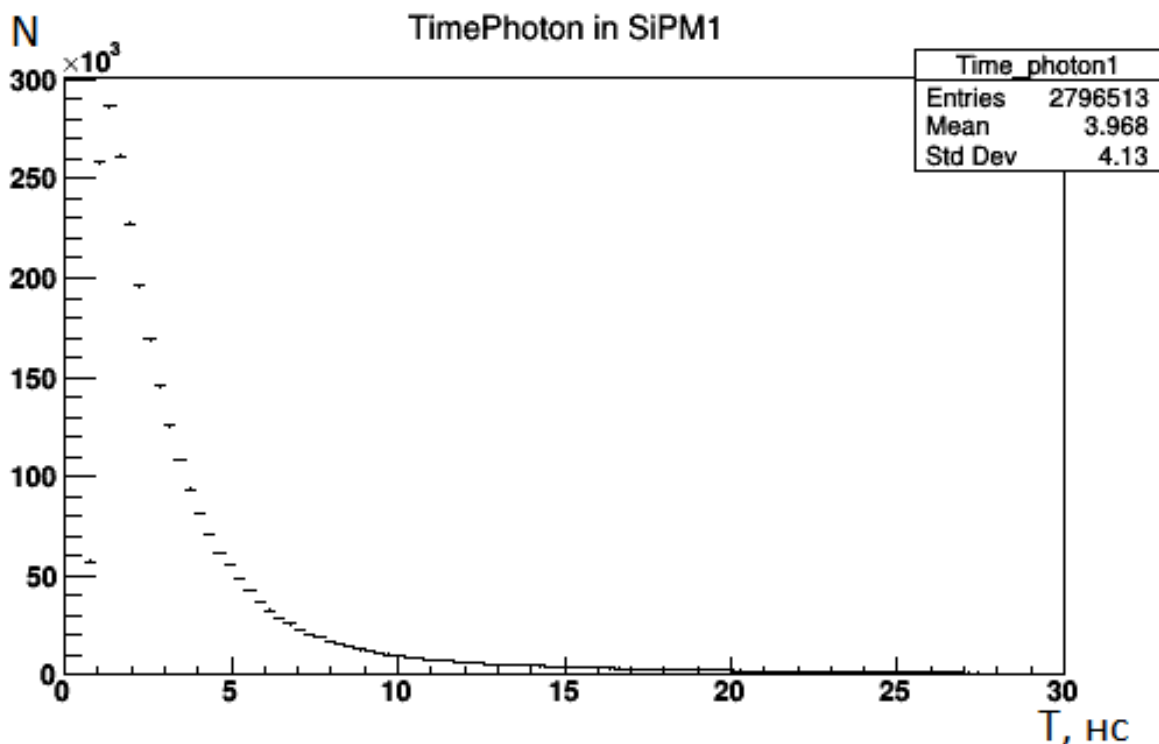


Рисунок 5.1 — Распределение фотонов по времени прилета для 1 SiPM

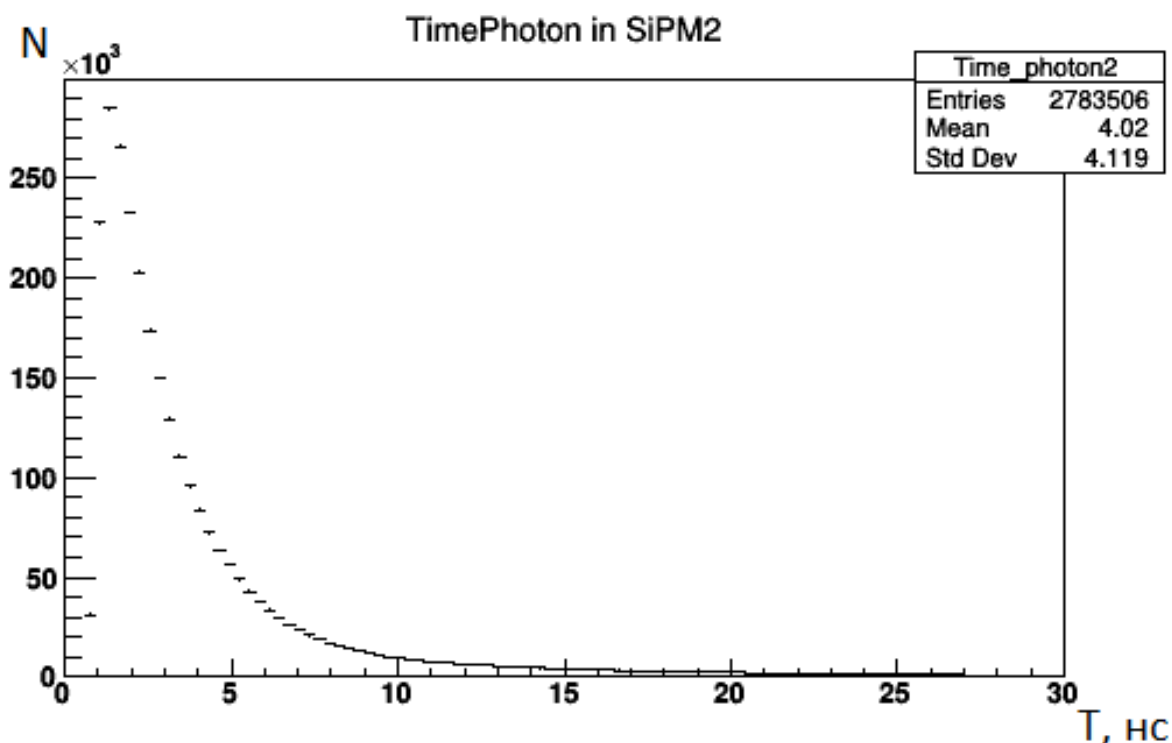


Рисунок 5.2 — Распределение фотонов по времени прилета для 2 SiPM

5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПОЛИСТИРОЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения временного разрешения полистирола использовалось время прилета 10 фотона в фотоумножитель. Для упрощения модели использовались гамма-кванты и электроны с фиксированными энергиями. Следует отметить, что использование только двух конкретных энергий может привести к уменьшению разброса времён относительно реальных значений, но позволяет оценить ожидаемые значения с полученными в эксперимент

В будущем необходимо провести более точное моделирование источника, т.к. с ним проводится достаточно большое количество измерений и от того насколько точно реализовано поведение источника зависит результат всего моделирования.

По данным моделирования было построено распределение разницы времен между сигналами от времени (рис.5.3) для положения источника $x = 0$.

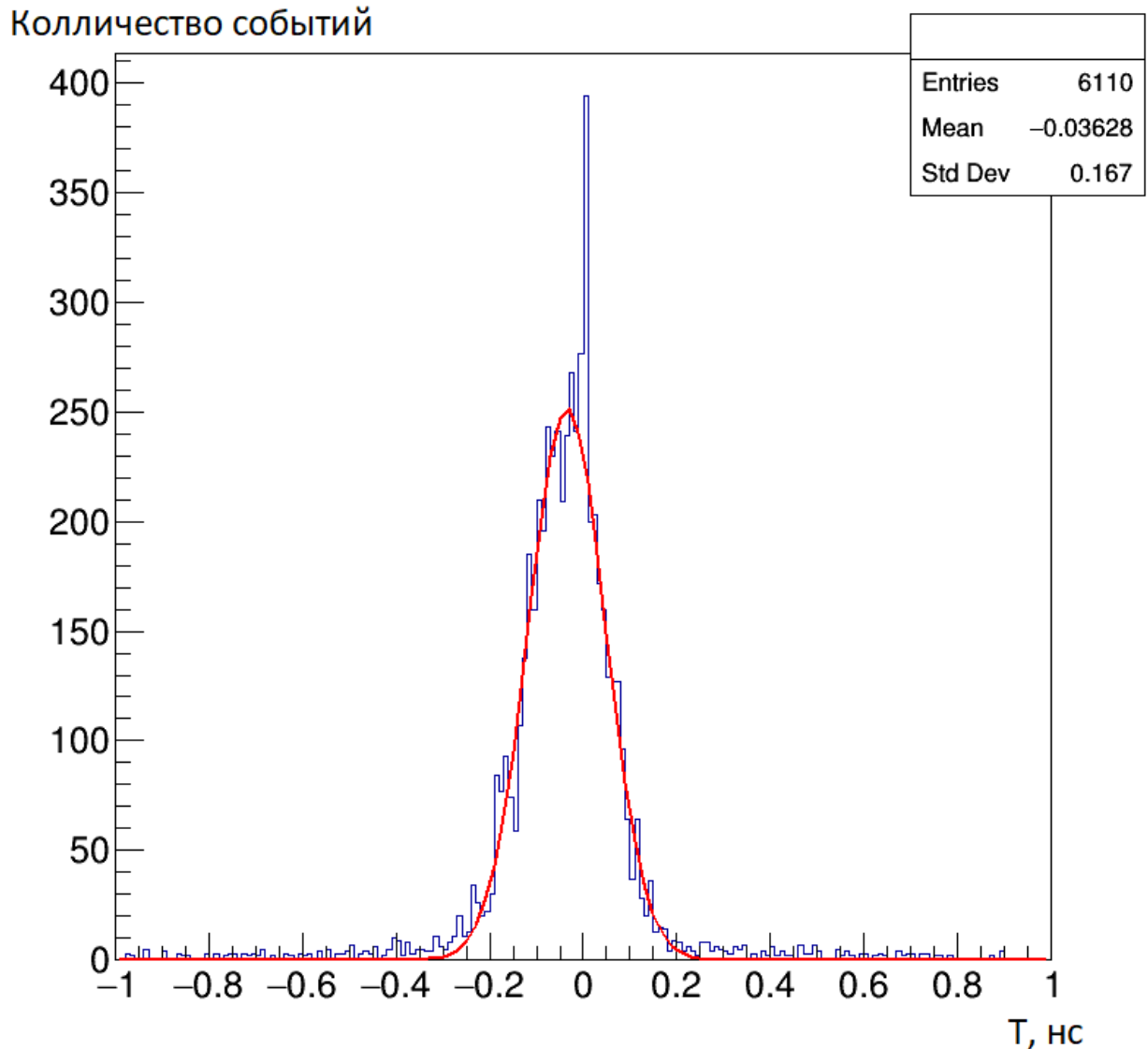


Рисунок 5.3 — Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для результатов моделирования

Значение временного разрешения, полученное в результате моделирования в пакете Geant4 составляет $FWHM = (195 \pm 2)$ пс. Данное значение ниже экспериментального, составляющего $FWHM = 800$ пс. Возможные причины расхождения результатов приведена выше, в описании проблем моделирования. Данное значение можно считать пороговым для данного вещества, т.к. допущения фигурирующие в расчете уменьшают его. Дополнительной причиной расхождения может быть тот факт, что в данном моделировании никак не учитывались внутренние дефекты исследуемого образца, которые могли появиться за время хранения пластика. Помимо этого, не были учтены особенности работы каждого фотоумножителя, по-

сколько их реальные характеристики могут отличаться от заявленных производителем.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ ПОМОЩИ ПЛАТЫ ХТДС4

В ходе измерений были получены данные о разнице времен между сигналами с двух фотоумножителей (τ), для различных положений источника (x). По этим данным был построен график зависимости τ от x (рис.6.1), на который были нанесены экспериментальные точки, после чего было проведено фитирование линейной функцией ($\tau = k * x + b$). Ниже приведены значения коэффициентов и их ошибки.

$$k = (21.81 \pm 0.06) \frac{\text{нс}}{\text{мм}} .$$

$$b = (4921 \pm 9) \text{ нс} .$$

$$\chi = 85.6$$

$$\text{NDf} = 15$$

Далее была написана программа позволяющая восстановить положение источника, по данным с платы, при работе с 2 SiPM. Программа учитывает ошибки фитирования и погрешность измерения и выдает ошибку не более 23 мм. Данное значение не является предельным для полистирола, для улучшения итогового разрешения необходимо внедрение амплитудных отборов, которые могут стать дополнительным источником информации и позволят улучшить точность определения положения источника.

Временное разрешение полученное для полистирола на порядок выше разрешения платы xTDC4, поэтому, на данный момент, можно говорить о возможности увеличения точности определения положения источника, за счет подбора веществ с лучшими временными параметрами.

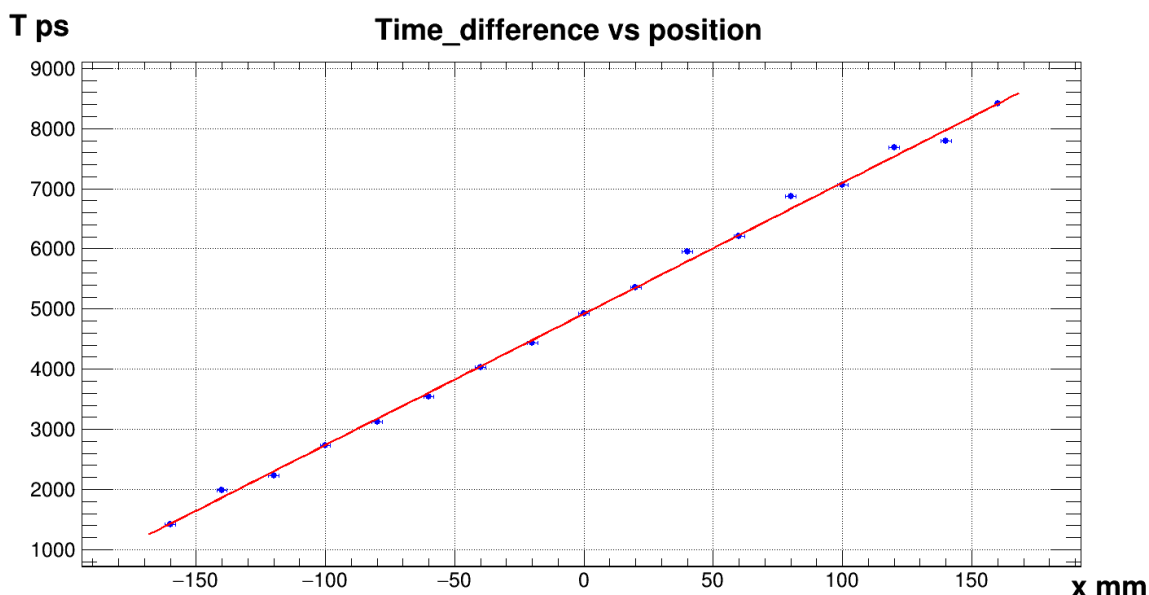


Рисунок 6.1 — График зависимости разницы времен между сигналами от положения источника

6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ ПОМОЩИ ПЛАТЫ РЕТІРОС2А

6.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ПО АМПЛИТУДНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ДЛЯ КАЖДОГО SIPM

Дополнительную информацию о положении источника могут дать амплитудные измерения. Плата Retiros 2A позволяет собирать необходимую информацию, на основе полученных данных была построена зависимость амплитуды сигнала, для энергии $E_e = 976$ кэВ, от положения радиоактивного источника. Для определения характера зависимости и параметров функций, было произведено фитирование различными функциями. В качестве итоговой функции была выбрана экспоненциальная зависимость:

$$y = y_0 + A * e^{k*x}$$

На рисунках (6.2 – 6.3) приведены графики зависимостей амплитуды сигнала от положения источника для двух фотоумножителей.

Ниже приведены значения параметров фитирования.

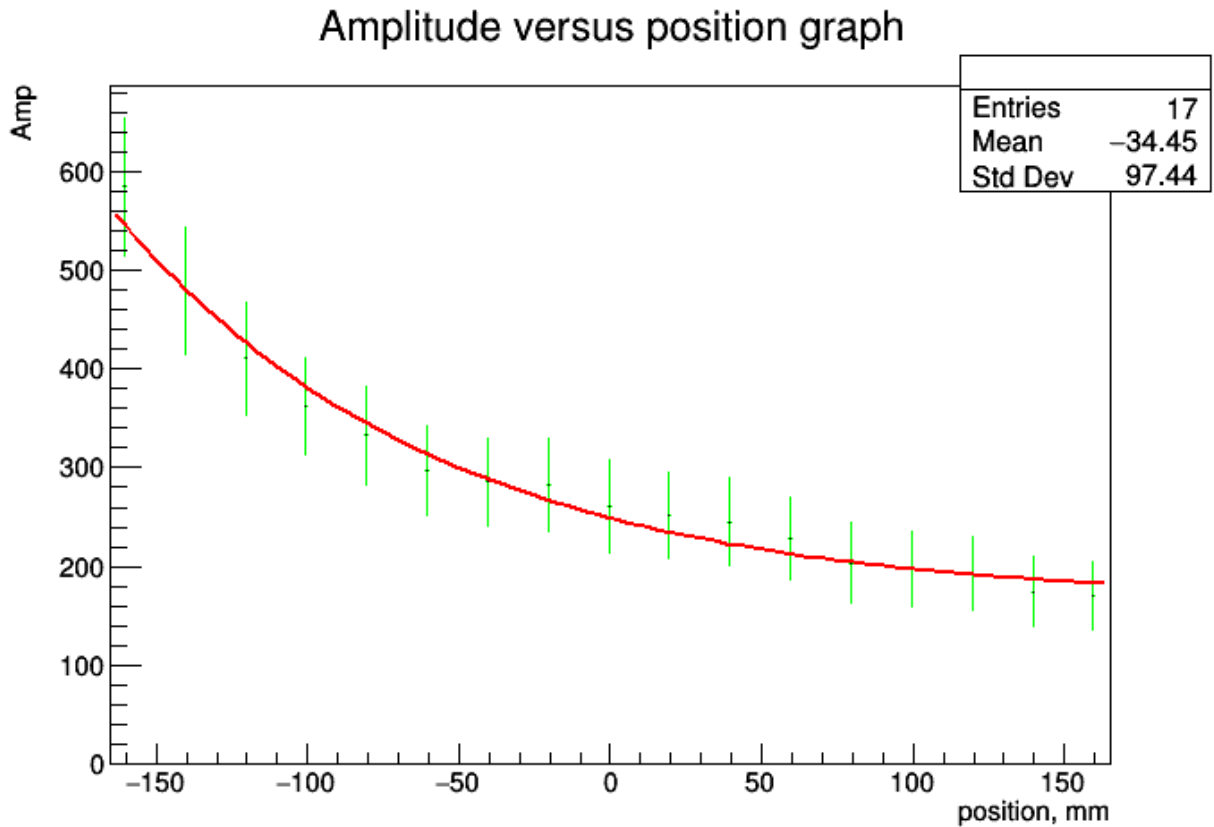


Рисунок 6.2 — Амплитуда сигнала в зависимости от положения источника для 1 SiPM

Для первого SiPM:

$$A_1 = A_{01} + B_1 * e^{k_1 x}$$

$$A_{01} = 164.2 \pm 12.2$$

$$B_1 = 85.5 \pm 14.9$$

$$k_1 = -0.0094 \pm 0.00109$$

Для второго SiPM:

$$A_2 = A_{02} + B_2 * e^{k_2 x}$$

$$A_{02} = 119.6 \pm 15.5$$

$$B_2 = 123.8 \pm 18.2$$

$$k_2 = 0.0068 \pm 0.0008$$

Амплитуда измерялась относительно положения пика соответствующего энергии $E_e = 976$ кэВ. Такой подход позволяет определять положение даже по 1 SiPM, но даёт значительную погрешность, величина которой сильно зависит от положения источника, что не подходит для проведения измерений в реальных условиях. В будущем, планируется проверить восстановление положения по отношению амплитуд для каждого события (без

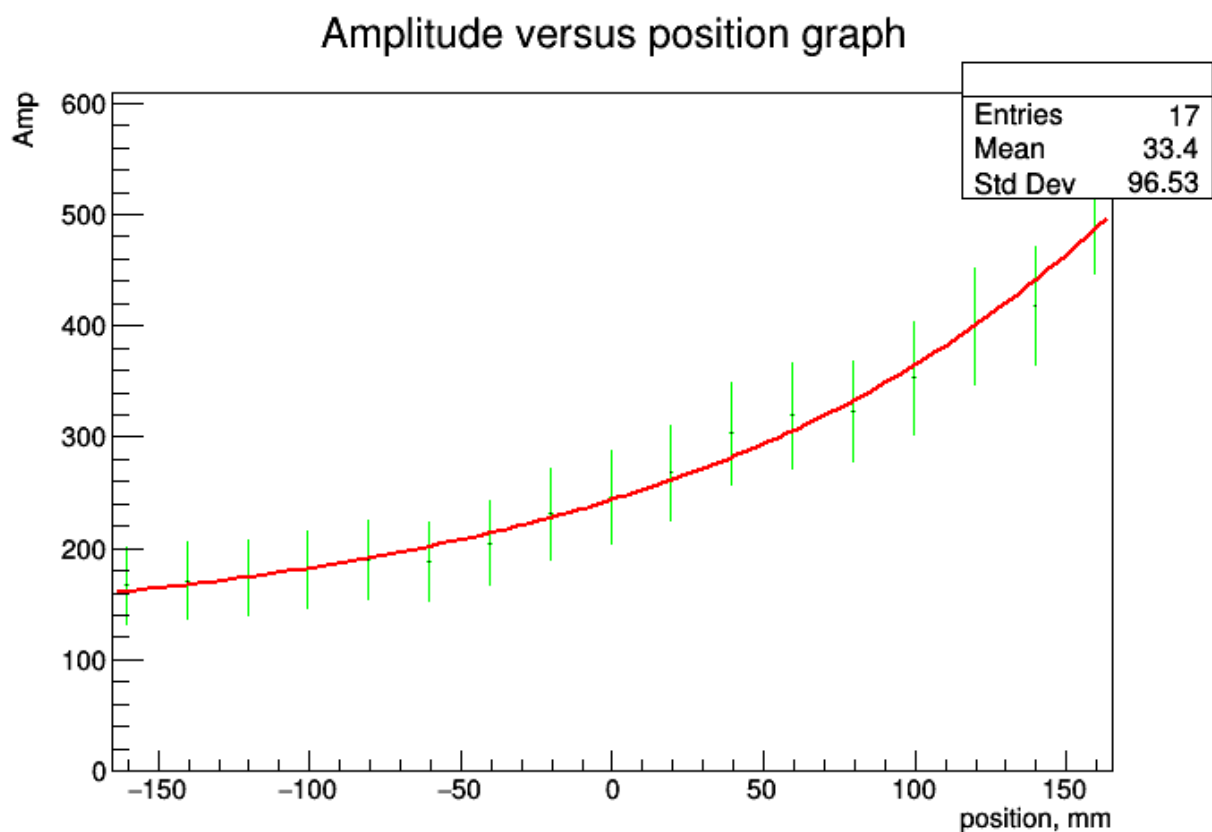


Рисунок 6.3 — Амплитуда сигнала в зависимости от положения источника для 2 SiPM

привязки к энергии). Несмотря на это, амплитудные измерения являются дополнительным источником информации, что должно улучшить итоговое разрешения. Наибольшая ошибка определения положения только за счет амплитудных измерений составляет:

$$\delta = 100 \text{ мм.};$$

6.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ПО ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

При измерения с платой Petiros2A, результирующее временное разрешение хуже, чем при аналогичных измерениях с платой xTDC4. Так же наблюдаются большие флуктуации значения в зависимости от положения источника. В связи с этим принято решение не проводить анализ по определению положения источника на основе полученных данных, поскольку точность будет заведомо ниже, чем для измерений с платой xTDC4.

6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2 ДВУХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

Для улучшения точности определения положения источника можно использовать вместе временные и амплитудные измерения. Так как время прихода сигнала и амплитуда сигнала независимые величины, мы можем использовать формулу из статистики, для подсчета итогового положения.

$$X = \frac{X_1 P_1 + X_2 P_2 + X_t P_t}{P_1 + P_2 + P_t}; \quad (6.1)$$

X_1, X_2 – координата источника получаемая во амплитудных измерениях
 X_t – координата источника получаемая во временных измерениях

$$X_i = \frac{\ln(A_i - A_{0i}) - \ln B_i}{k_i}; i = 1, 2 \quad (6.2)$$

$$X_t = \frac{\tau - \tau_0}{k} \quad (6.3)$$

$$P_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{result} = \sqrt{\frac{1}{P_1 + P_2 + P_t}} \quad (6.5)$$

Для определения положения источника и расчета погрешности определения, был написан скрипт, рассчитывающий данные параметры на основе данных полученных в измерении. При улучшении точности измерения какого либо параметра, может потребоваться перерасчет параметров фитирования.

Результирующая погрешность расчета положения радиоактивного источника находится в диапазоне от 15 до 18 мм в зависимости от погрешности измерений. Таким образом, результирующая погрешность составляет:

$$\delta = 18 \text{ мм.};$$

6.4. СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА В РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДАХ

На основе данных полученных в эксперименте было реализовано 3 различных способа определения положения источника:

- 1) По амплитудным измерениям
- 2) По временным измерениям
- 3) Используя оба источника информации

Как можно увидеть в таблице 6.1, наилучшая точность определения положения достигается при использовании 3 источников информации и составляет:

$$\delta = 18 \text{ мм.};$$

| источник информация | точность определения положения, мм |
|------------------------------------|------------------------------------|
| амплитуды сигналов на SiPM | 100 |
| разницы времен между сигналами | 24 |
| используя оба источника информации | 18 |

Таблица 6.1 — Сравнение точности определения положения

В настоящее время потребность в определении координаты радиоактивного источника имеется в позитронной томографии. Использование дополнительной информации в виде разницы прихода сигналов позволяет улучшить точность восстановления положения источника. Таким образом выработка методики по обработке данных и определению положения источника, реализованная в данном эксперименте является важной и полезной.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения данной эксперимента были определены временные характеристики полистирола, выработана методика измерения временных характеристик сцинтилляторов, написано программное обеспечение для работы измерительной аппаратуры, а так же произведена обработка экспериментальных данных. Полученное временное разрешение полистирола находится в диапазоне от 800 до 1000 пс в зависимости от участка сцинтиллятора.

Помимо проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных было проведено моделирование эксперимента с использованием пакета Geant4, в результате которого был получен нижний порог для временного разрешения полистирола. Данный порог составляет 195 пикосекунд.

На основе данных, полученных в ходе эксперимента, была выработана методика по определению положения радиоактивного источника с использованием временных и амплитудных характеристик сигнала, поступающего с SiPM соединенного с полистиролом. В результате обработки точность определения положения составила 18 миллиметров. Дополнительная информация, получаемая в данной методике, может быть использована как в экспериментах, в которых необходимо определить место прохождения элементарной частицы, так и в прикладной ядерной физике, а именно во времяпролетных томографах, как дополнительный источник информации. За счет данного источника информации можно уменьшить дозу вводимого человеку радиоактивного вещества или улучшить точность определения положения радиоактивного источника.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований временных характеристик веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФРАХ Томас (DE) ЗОЛЬФ Торстен (DE) Т. А. (ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПОЗИТРОННОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ. — 2007. — с. 22.
2. Б.А. Долгошеин Т. Б. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ. — 2008. — с. 24.
3. Мухин К. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. — 1993. — с. 408.
4. Клемин С. Кузнецов Ю. Ф. Л. Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — с. 80—86.
5. Gundacker Stefan T. R. M. Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission // Physics in Medicine & Biology. — 2020.
6. xTDC4-PCIe Start time to digital converter. <https://www.weeroc.com/products/si-read-out/petiroc-2a>.
7. PETIROC 2A SiPM read out for time of flight PET. <https://www.cronologic.de/products/pcie>.
8. Root - an object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.