

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент

_____ А. В. Гробов

Консультант:

Выполнил:

_____ Г. Д. Долганов

_____ М. А. Шадрин

Москва 2020

1 Введение

1.1 Мотивация

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.

1.2 Задачи

Целью проведения данного эксперимента является получение практических навыков по измерению временных характеристик веществ и обработки полученных данных, а так же по выработке методики данных измерений. Все это является актуальным, 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. Так же стоит отметить, что измерение характеристик и подбор наиболее подходящих веществ не является конечным итогом данного эксперимента. В случае нахождения веществ с подходящими параметрами, на их основе возможна реализация макета, подходящего для измерения в реальных условиях (в на-

шем случае это макет ПЭТ). Для данного макета, в свою очередь, необходимо создание программ для интерпретации данных, полученных в измерения. Все это является логическим продолжением, проводимого в настоящее время, эксперимента по определению временных характеристик сцинтилляторов для Их дальнейшего использования в ядерной медицине[1].

1.3 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 так же жидкие сцинтилляторы, например ксенон и аргон. Сцинтилляторы обладают рядом различных 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 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 :

$$n_e = \frac{E_\gamma}{\beta * E}, \quad (1)$$

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 сцинтил-

лятора, 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 показывающая, насколько будет размытой данная линия. Наименьшее энергетическое разрешение R для сцинтилляторов, просматриваемых фотоэлектронным умножителем, определяется выражением[2]:

$$R = \frac{\Delta E}{E_\gamma}, \quad (2)$$

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

При высоком 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 фотона люминесценции. 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:

$$J = J_0 \exp \frac{-t}{\tau}, \quad (3)$$

Величина t — 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 гамма кванта с веществом, как следствие при выборе сцинтиллятора, так же следует учитывать плотности различных веществ для определения оптимального для детектирования гамма квантов. Следующей характеристикой является эффективный атомный номер. Под эффек-

тивным 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 многих явлений происходящих внутри сцинтиллятора. 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.

1.4 Устройство SiPM

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) (рис.1) представляет собой детектор, чувствительный к единичным фотонам, который сочетает в себе эксплуатационные характеристики, превосходящие традиционные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Кремниевый фотоумножитель изготовлен на основе множества микроячеек, представляющих собой плотно упакованные лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме (SPAD сенсоры), со встроенными шунтирующими резисторами, которые преобразуют двоичный сигнал с этих микроячеек в единый аналоговый сенсор. Кремниевый фотоэлектронный умножитель SiPM представляет собой фотоприёмник на основе упорядоченного набора (матрицы) р-п-переходов, выполненных на общей кремниевой подложке[4]. Характерный размер одной ячейки составляет 10-100 мкм. Площадь чувствительной поверхности находится в пределах от 1×1 до 6×6 мм².

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 явля-

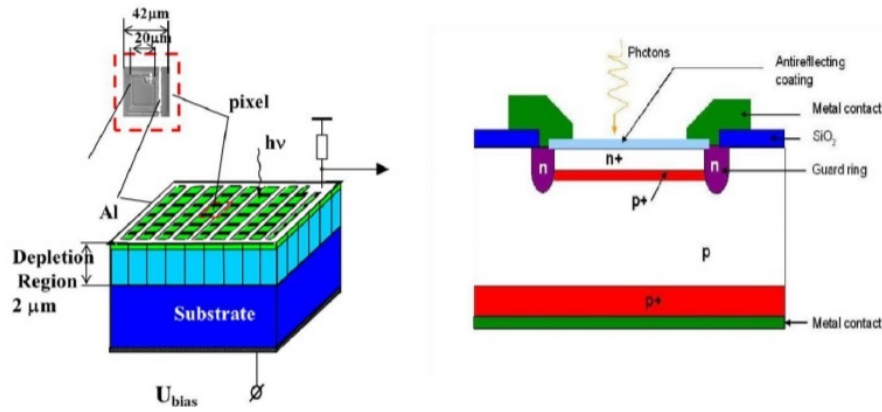


Рисунок 1: устройство SiPM

ется логическим и не зависит от числа первоначальных носителей, 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 .

$$\epsilon = QE \times A \times G \quad (4)$$

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 размера ячейки. 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 спек-

тральной чувствительности фотодиода находится в диапазоне 40 – 50%. [do] Так же стоит отметить одну из основных особенностей фотодиодов 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, 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.

$$K = \frac{C_a(U - U_1)}{e} \quad (5)$$

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 Теоретическое обоснование эксперимента

2.1 Описание геометрии детектора

В ходе эксперимента использовалась геометрия представленная на рисунке 2 Установка состоит из пластикового сцинтиллятора на основе полистирола, 2 SiPM, усилителей (не представлены на рисунке 2, платы Petiros2A, радиоактивного источника)

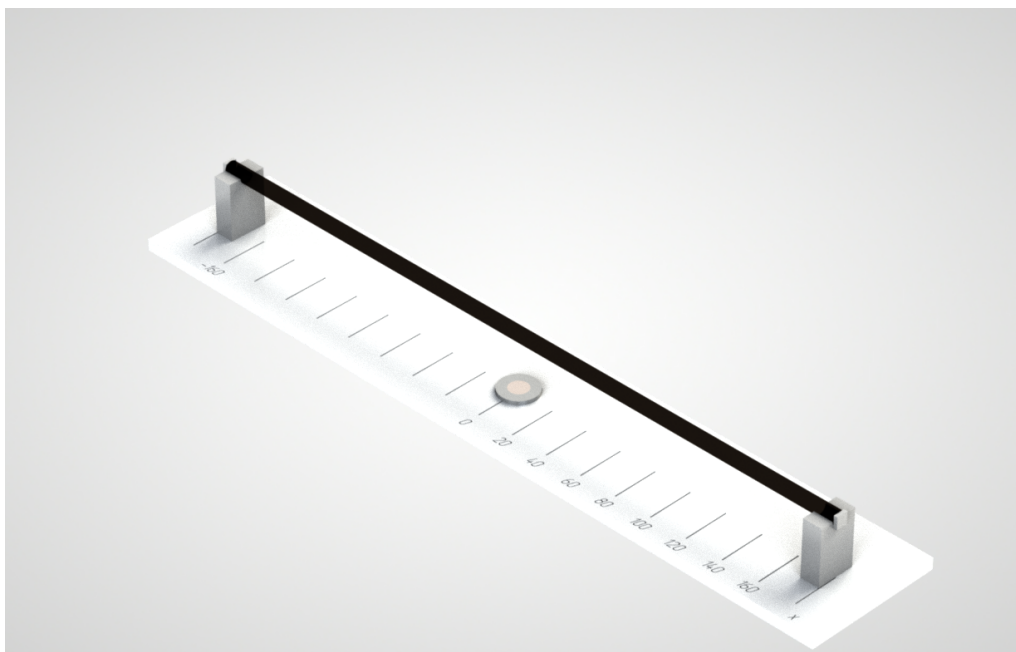


Рисунок 2: Фото-реалистичный вид геометрии установки

2.2 Плюсы и минусы геометрии

Плюсы:

1. Протяженность сцинтиллятора

За счет протяженности сцинтиллятора появляется возможность большего покрытия тела человека в ПЭТ, при сравнительно небольшом числе каналов, что позволит удешевить ПЭТ и упростить обработку полученных данных.

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.

2. Протяженность сцинтиллятора

Из-за протяженности сцинтиллятора, в нем увеличивается вероятность наличия дефектов материала, которые приводят к дополнительным потерям света в объеме. Так же из-за протяженности сцинтиллятора до SiPM долетает меньшее количество света, в связи с наличием энергетических потерь при отражении от стенок и оптической непрозрачностью среды.

3 Проведение измерений

3.1 Получение навыков по работе с платой Petiros2A

Для получения навыков по работе с платой Petiros2A и проведения эксперимента, была построена модель детектора, состоящая из сцинтиллятора(пластик:полистирол), двух SiPM HAMAMATSU соединенных с сцинтиллятором через оптическую смазку, усилителей с коэффициентом усиления 40, а так же источников питания для усилителей и источника ионизирующего излучения Bi^{207} . Все элементы данной установки были помещены в металлических 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[5].

Для получения навыков по практической работе с аппаратурой была проведена серия измерений, в ходе которых, методом изменения различных параметров платы, были определены необходимые параметры измерений. Для настройки параметров платы использовалось программное обеспечение

Weegoc от производителя платы. Стоит отметить, что в ходе проведения эксперимента, при обработке данных возникала необходимость проводить одни и те же измерения несколько раз при различных параметрах платы и конфигурациях детектора, для подтверждения или опровержения гипотез возникавших при обработке данных.

По технической документации[5] платы Petiros 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, после чего была создана программа для определения временных параметров по записанным данным. Необходимость в правильной идентификации всех записанных данных возникла в связи с возможностью проведения будущих отборов интересующих нас событий.

Получение навыков по работе с платой Petiros 2A, а так же навыков по подготовке установки к проведению эксперимента, являются очень важными, для работы физика-экспериментатора, т.к. данные навыки необходимы для правильного проведения эксперимента, в котором исключаются ошибки связанные с неверной работой электроники. Иначе результаты эксперимента могут быть неверными в связи с наличием в них ошибок, вызванных записью данных не относящихся к изучаемым физическим процессам. Неправильная настройка и калибровка так же может привести как к неверным результатам, так и к значительному усложнению последующей обработки данных.

3.2 Проведений временных измерений

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. После проведения первой серии измерений была проведена первичная обработка данных, в которых были обнаружены некоторые особенности, представляющие из себя наличие некоторых постоянных неизменяемых компонент во временных измерениях. Данные особенности возникли, как выяснилось, из-за наличия коллиматора, который в значительной мере уменьшал количество регистри-

руемых электронов. Подробнее в п. 4 Обработка результатов измерений.

После этого была проведена серия измерений для различных положений источника (от -160 до 160 по оси x см. рис3 с шагом 20мм) без коллиматора. Далее была проведена запись фона, для этого были проведены измерения

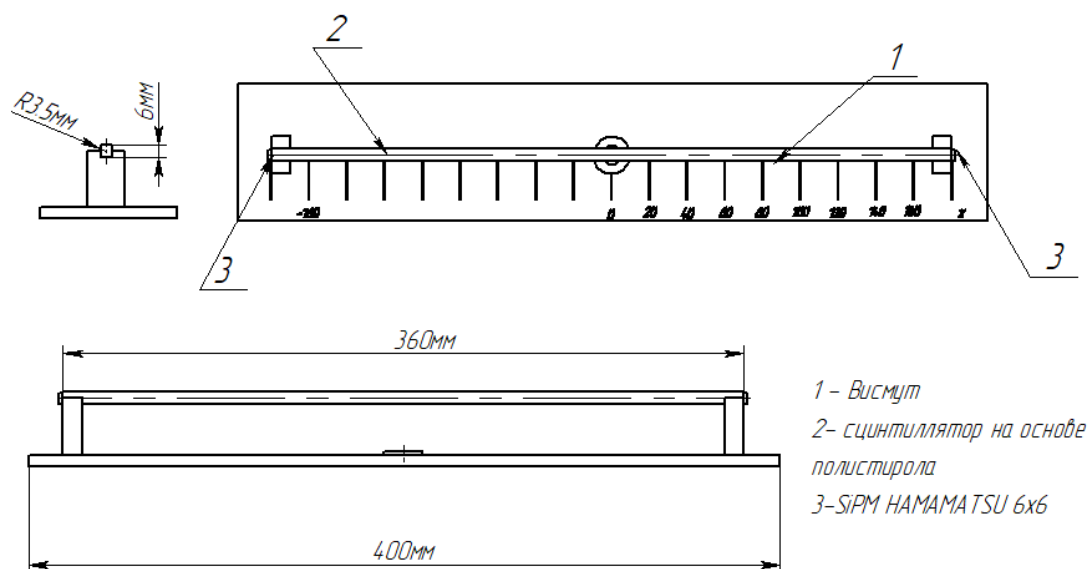


Рисунок 3: Схематичное изображение установки в 3-х проекциях

без источника.

Так же для подтверждения предположения о частицах дающих пик распределения была проведена серия измерений с алюминиевой пластиной.

Общее число измерений составляет 65. Частота событий в одном измерении составляет около 220 событий в секунду (при измерении без коллиматора).

Для определения оптимального рабочего напряжения было увеличено напряжение подаваемое на SiPM, что привело к значительному росту скорости счета (см таб. 1). В конечном счете, в качестве рабочего напряжения было выбрано напряжение в 53 В. Данное напряжение можно считать оптимальным для данных SiPM, т.к. при нём частота шумовых импульсов не велика по сравнению с частотой импульсов соответствующих реальным событиям, при

этом скорость счета достаточно велика, что позволяет набирать статистику меньшее время. Так же стоит отметить, что при увеличении напряжения происходил уход в режим насыщения зарядового усилителя при больших напряжениях , это происходило в связи с тем, что был выбран слишком сильный предусилитель ($k=10$)).

напряжение U, В	частота событий, Гц
53.00	4.60
55.00	878.75
54.50	271.84
55.00	69.19
53.50	6.29

Таблица 1 – Зависимость частоты событий от напряжения

4 Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводилась при помощи программного обеспечения Root[6].

4.1 Выделение "фона" во временных измерениях

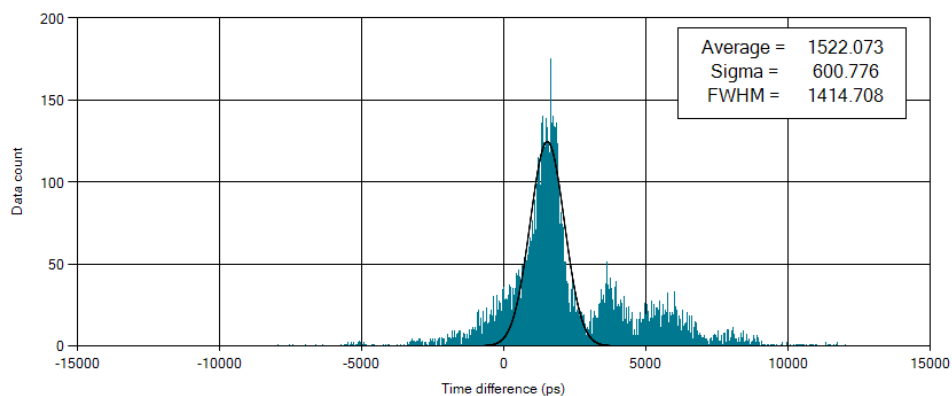


Рисунок 4: разница времен между каналами в измерении 1

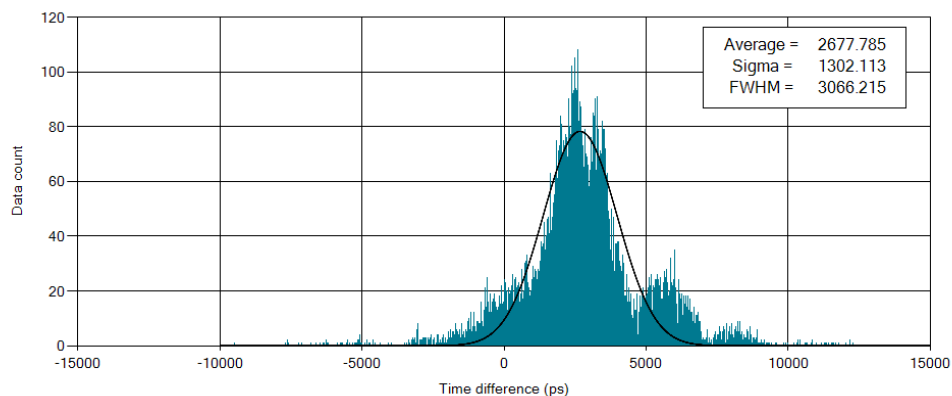


Рисунок 5: разница времен между каналами в измерении 2

Измерения с коллиматором. В наборе полученных данных для нескольких временных измерений наблюдается наличие определенного фона, положение которого не изменяется в зависимости от положение радиоактивно источника (см. рис 4-8 и таб. 2). Для более точного определения временных параметров необходимо выделить данный фон и очистить от него данные. Распределение разности времен между двумя событиями должно подчиняться нормальному распределению. Важным параметром является ширина на полу высоте, поскольку она определяет, насколько близкие пики мы сможем

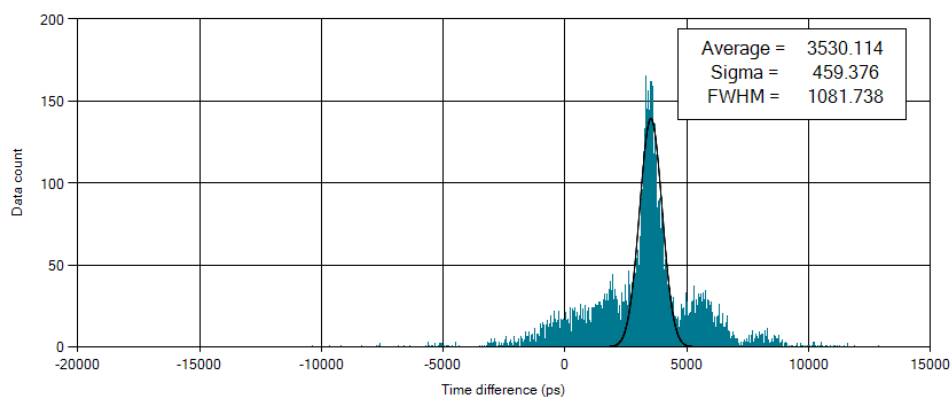


Рисунок 6: разница времен между каналами в измерении 3

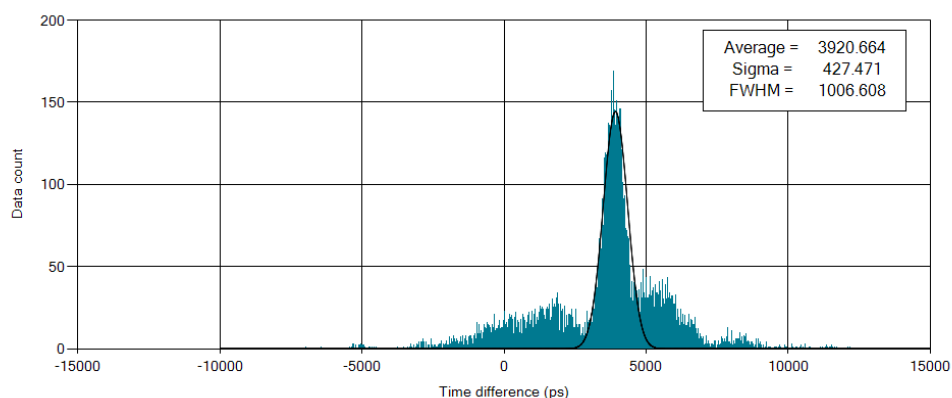


Рисунок 7: разница времен между каналами в измерении 4

отличить друг от друга, что в свою очередь несет информацию об изменении положения источника, что в конечном счете влияет на пространственное разрешение всего детектора. (тут подразумевается насколько два близкие положения источника мы сможем различить). Для выделения фона были построены распределения числа событий, зарегистрированных обоими SiPM и отвечающие всем параметрам отбора совпадений, от разности времен между двумя этими событиями (рис. 9-10), после этого было проведено сравнение количества событий отвечающих каждой разности времен, если количество отличалось меньше чем на величину приборной погрешности для различных положений источника, то данное событие считалось фоновым, при этом сравнение проходило по всем возможным наборам данных, т.е. данные записанные в 1 бин первого измерения сравнивались с аналогичными данными всех остальных измерений, а так же в других измерениях между собой, данное сравнение проводилось только в тех бинах на которых не находилось

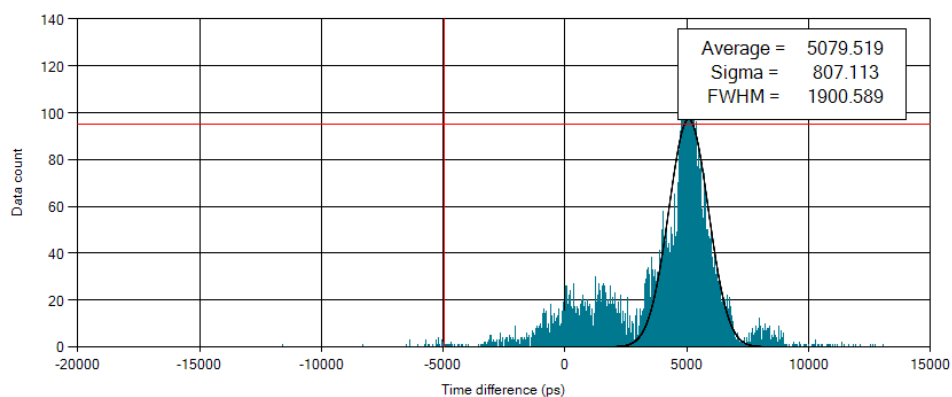


Рисунок 8: разница времен между каналами. в измерении 5

Номер измерения	Положение источника относительно центра мм
1	-100
2	-40
3	0
4	40
5	100
6	-50
7	50

Таблица 2 – Положение источника относительно центра

сама вершина распределения. Результат данного отбора можно увидеть на рис. 11 - 12

В связи с тем, что время набора событий в проведенных измерениях мало, а так же достаточно низкая скорость счета, что в итоге дает малое число записанных событий и большую относительную погрешность, был введен параметр(k) отвечающий за возможность разброса значений в бинах, т.е. если разность значений в двух одинаковых бинах была меньше 10 событий, то мы считали, что количество событий совпадает, а так же параметр количества событий от которого мы начинали считать что данному бину соответствует вершина интересующего нас распределения. Был взят параметр $k = 10$, т.к. погрешность в вершине распределения определяется как корень из числа событий, а данное значение для измерений составляет более 10.

В результате удалось выделить фон, и очистить данные от него, что поз-

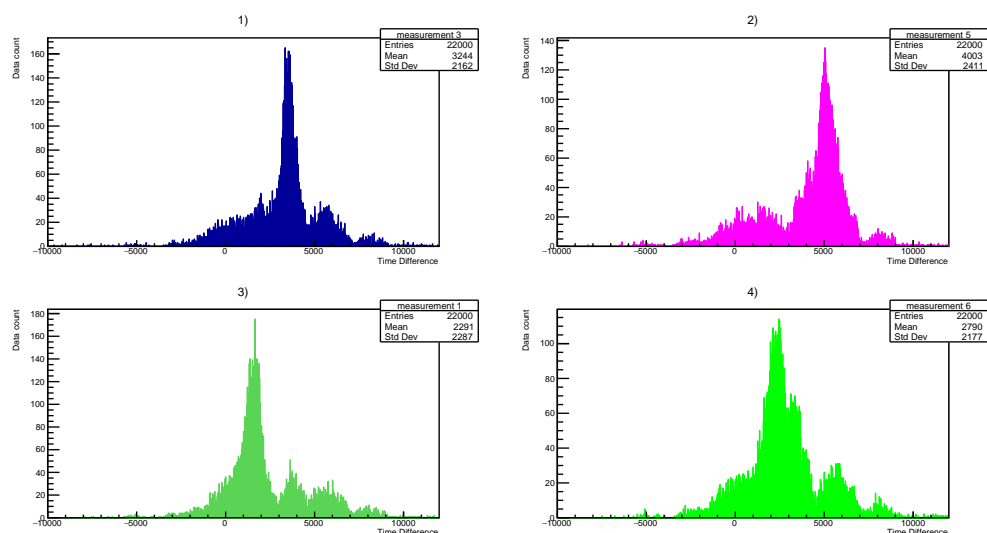


Рисунок 9: разница времен между событиями без обработки 1) в измерении 3; 2) в измерении 5; 3) в измерении 1; 4) в измерении 6

волило сделать полученные пики уже и уменьшить ширину на полу высоте. В таблице 3 ниже приведены значения до и после очистки.

Номер измерения	$M(t)$ (пс) до	$\sigma(t)$ до	$M(t)$ (пс) после	$\sigma(t)$ после
1	1522	1600	1262	554
2	2677	1302	2598	690
3	3530	459	4547	379
4	3920	427	3953	298
5	5079	807	5023	561
6	2481	1139	2399	644
7	4547	886	4833	529

Таблица 3 – разница времен между событиями до и после отбора

Стоит сказать, что проводилось две серии измерений, с коллиматором и без него. Необходимость в этом возникла в связи с тем, что в первоначальных измерениях с коллиматором, на зарядовом спектре полностью отсутствовал электронный пик, который должен был наблюдаться.

Измерения без коллиматора.

В измерениях проведенных без коллиматора постоянная составляющая вносит куда меньший вклад. И значительного улучшения временных параметров за счет её удаления добиться не получается. Поэтому описанный вы-

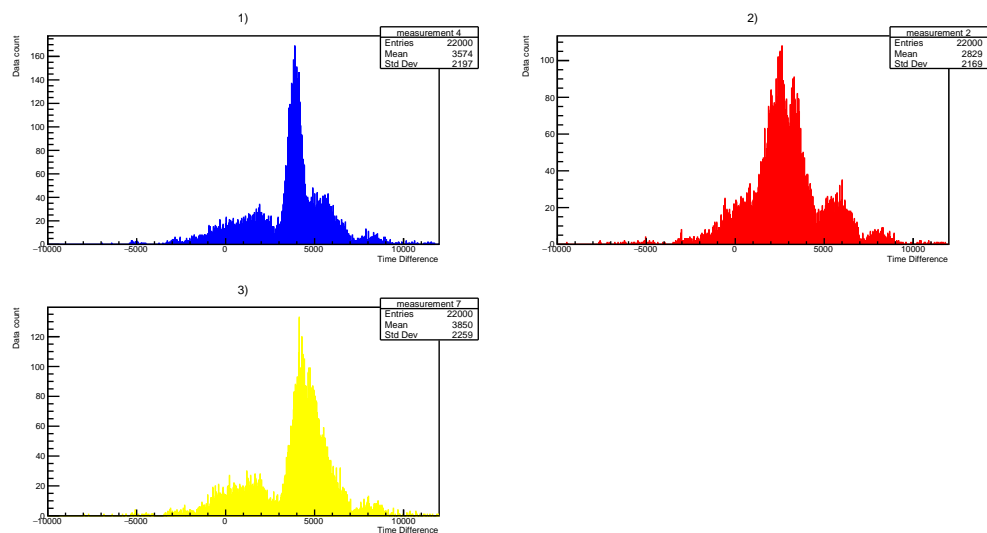


Рисунок 10: разница времен между событиями без обработки 1) в измерении 4; 2) в измерении 2; 3) в измерении 7

ше способ при измерениях не используется. В данных измерениях для улучшения временных были введены отборы по заряду, этому посвящен пункт ниже.

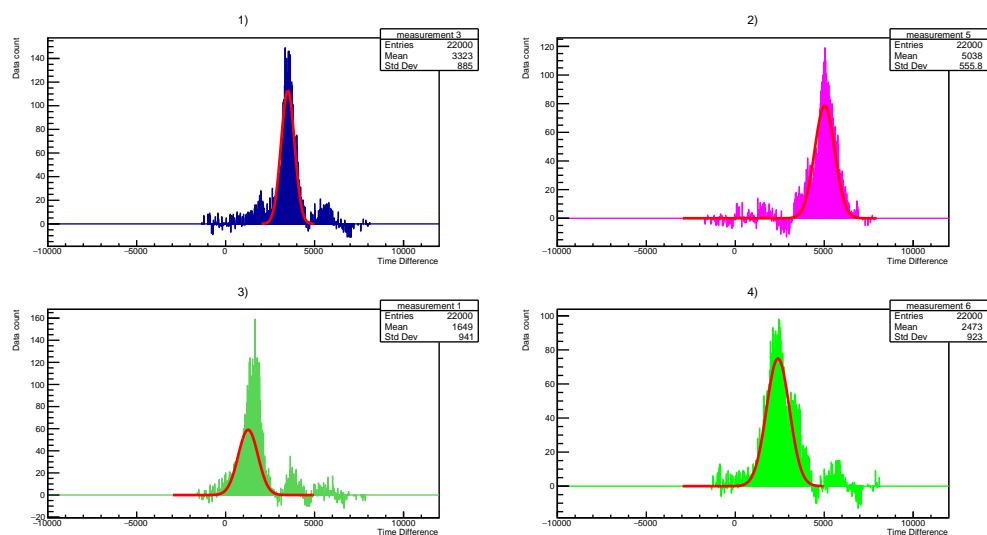


Рисунок 11: разница времен между событиями после обработки 1) в измерении 3; 2) в измерении 5; 3) в измерении 1; 4) в измерении 6

4.2 Поиск источника фона, а так же неоднородности временного разрешения

Фон может быть вызван наличием собственной радиоактивности сцинтиллятора пластика, для проверки этого необходимо провести измерения без использования радиоактивного источника.

Флуктуации разброса среднего квадратичного отклонения при временных измерениях могут быть вызваны неоднородностью вещества сцинтиллятора. Можно заметить, что в определенных областях сцинтиллятора сигма принимает близкие значения в серии независимых измерений, что частично подтверждает данное предположение. При детальном рассмотрении временных спектров можно увидеть, что распределение разности времен включает в себя несколько распределений гаусса, что говорит нам о распространении излучений с двумя разными скоростями, либо о наличии определенных дефектов материала сцинтиллятора, которые могут приводить к торможению излучения и как следствие смещения времени прилета части событий. Как предположение, что часть фотонов просто высвечивается дольше в этих областях. Так же флуктуации могут быть связаны с собственной радиоактивностью сцинтиллятора, которая может быть распространена по сцинтиллятору неравномерно, и данная постоянная составляющая может так же давать некоторую постоянную не смещающуюся компоненту, которую легко заме-

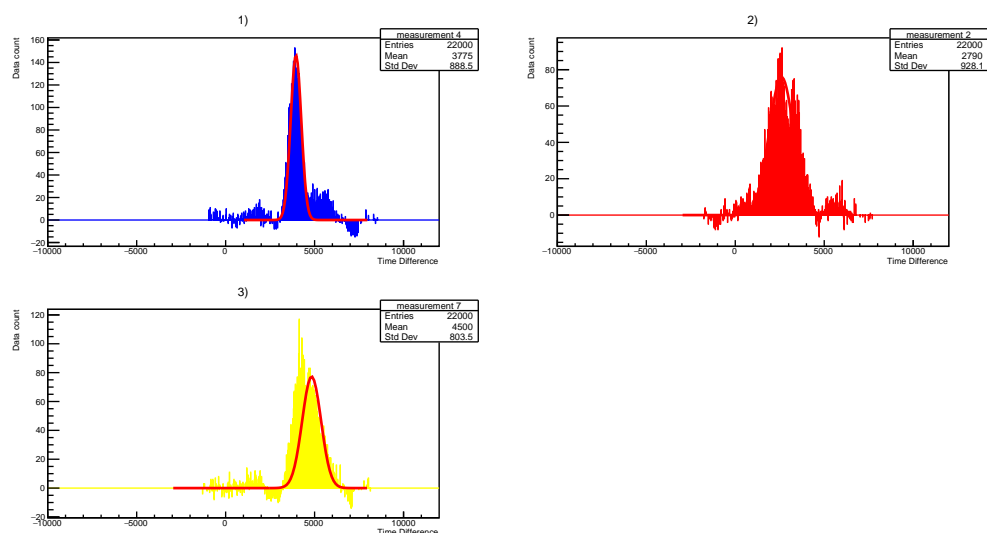


Рисунок 12: разница времен между событиями после обработки 1) в измерении 4; 2) в измерении 2; 3) в измерении 7

туть на временных измерениях. Данная не смещающаяся компонента так же подчиняется распределению гаусса и расположена ближе к правой части по разнице времен. В следствии чего два пик интересующего нас распределения начинает сливаться с распределением фона. Для проверки данной гипотезы необходимо провести отбор по энергиям событий, т.к. это позволит работать только с событиями чья энергия соответствует спектральным линиям нашего источника и исключить шумы SiPM. А так же провести измерения без источника и вычесть полученные события из наших данных. Если после этого постоянная составляющая пропадет, то наша гипотеза подтвердится.

4.3 Построение энергетических спектров

Для измерений использовался органический сцинтиллятор, поэтому энергетические спектры для гамма квантов будут включать в себя плато Комптона, а для электронов представлять из себя набор вершин описываемых распределением гаусса. Вид энергетических спектров приведен ниже.

В ходе эксперимента была изменена геометрия детектора. В начале источник находился над сцинтиллятором и был отделен от него коллиматором из свинца, толщиной 2 см. В ходе измерений была обнаружена особенность, состоящая в том, что при данной геометрии детектора, на энергетическом спектре отсутствуют вершины отвечающие распределениям электронов различной энергии, либо данные пики сильно меньше общей статистики, а само

амплитудное распределение больше похоже на плато Комптона. Также можно заметить, что скорость набора событий была намного ниже скорости, которая должна была соответствовать активности используемого источника. После была проведена серия экспериментов, в которой источник находился под сцинтиллятором и не был отделен коллиматором. При данной конфигурации значительно увеличилось число регистрируемых событий и на амплитудных распределениях стали явно видны пики распределений отвечающие линиям электронов.

Для подтверждения предположения о том, что пики принадлежат электронам, необходимо провести проверку. Для проверки расположим между радиоактивным источником и сцинтиллятором алюминиевую пластину, если после этого пик изменит свое положение, то он отвечает электронной линии, что так же подтвердит предположение о том, что электроны составляющие данную линию полностью теряют энергию в объеме сцинтиллятора, за счет чего и появляется пик распределения (в противном случае распределение электронов представляло бы из себя непрерывную убывающую кривую), в случае же с гамма-квантами пик распределения не изменит своего значения, данная особенность связана с высокой проникающей способностью гамма квантов, а так же низкой вероятностью взаимодействия с алюминием и, как следствие, с очень низкими энергетическими потерями в нём.

На рисунках 13 и 14 приведены распределения соответствующие измерениям с алюминиевой пластиной и без нее для одинакового источника (в данных измерениях источник располагался на одинаковом расстоянии от SiPM). Как можно заметить, на рисунке 13, полностью отсутствует пик распределения, который можно увидеть на рисунке 14. Это подтверждает предположение о том, что данный пик соответствует распределению электронов. Аналогичная картина наблюдалась на втором SiPM, а так же при другом расположении источника.

Исходя из сложившейся ситуации было принято решение проводить измерения без коллиматора. Отсутствие линий электронов можно связать с возможным взаимодействием электронов со свинцом, а так же с достаточно большим расстоянием до сцинтиллятора. Гамма кванты в свою очередь долетали до сцинтиллятора т.к. они обладают куда большей проходящей спо-

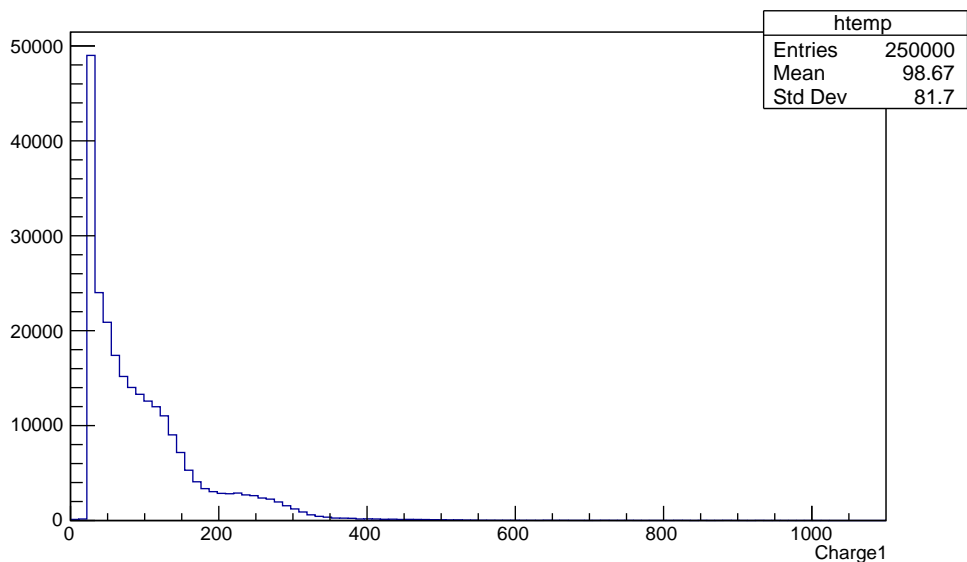


Рисунок 13: Энергетический спектр при измерениях с алюминиевой пластиной

собностью.

4.4 Определение энергетических разрешений в зависимости от расстояния между SiPM и радиоактивным источником

Для определения энергетических разрешений были использованы измерения без коллиматора. На рисунках 15 и 16 видна зависимость энергетического разрешения от положения источника. Стоит отметить, что энергетическое разрешение значительно отличается для различных участков сцинтиллятора, это можно объяснить неоднородностью вещества сцинтиллятора, которая так же подтверждается наличием большого разброса при временных измерениях на определенных участках.

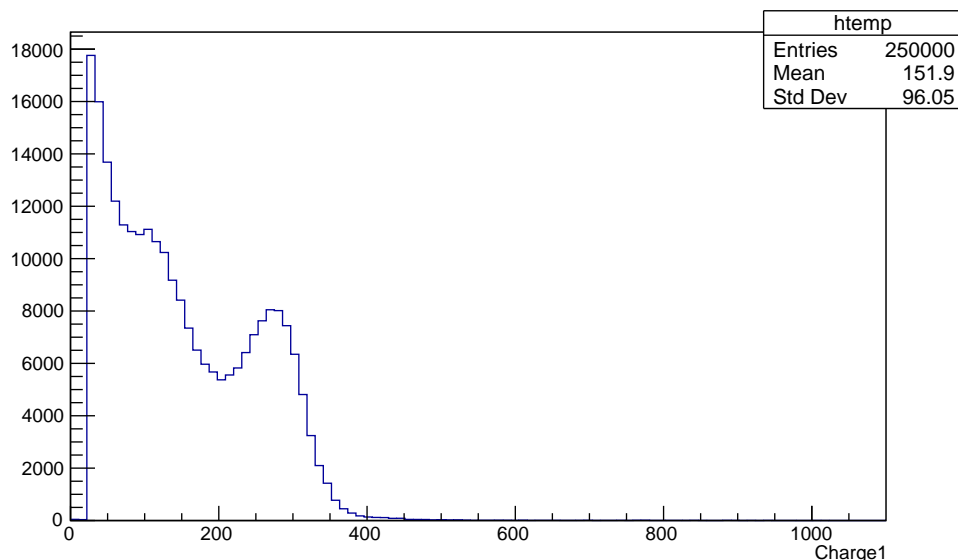


Рисунок 14: Энергетический спектр при измерениях без алюминиевой пластины

4.5 Построение калибровочного графика разницы времен между сигналами от положения источника

График приведенный на рисунке 17 соответствует данным полученным при измерениях, проведенных с коллиматором. В данных измерениях было получено плохое временное разрешение, что видно на графике. График построен Методом Наименьших Квадратов.

График приведенный на рисунке 19 соответствует данным полученным при измерениях, проведенных без коллиматора. На графике различима линейная зависимость разницы времен от положения источника. Значение Среднего квадратичного отклонения для таких измерений находится в диапазоне от 300 до 420 пикосекунд. Калибровочный график позволяет определить положение источника по набранным данным.

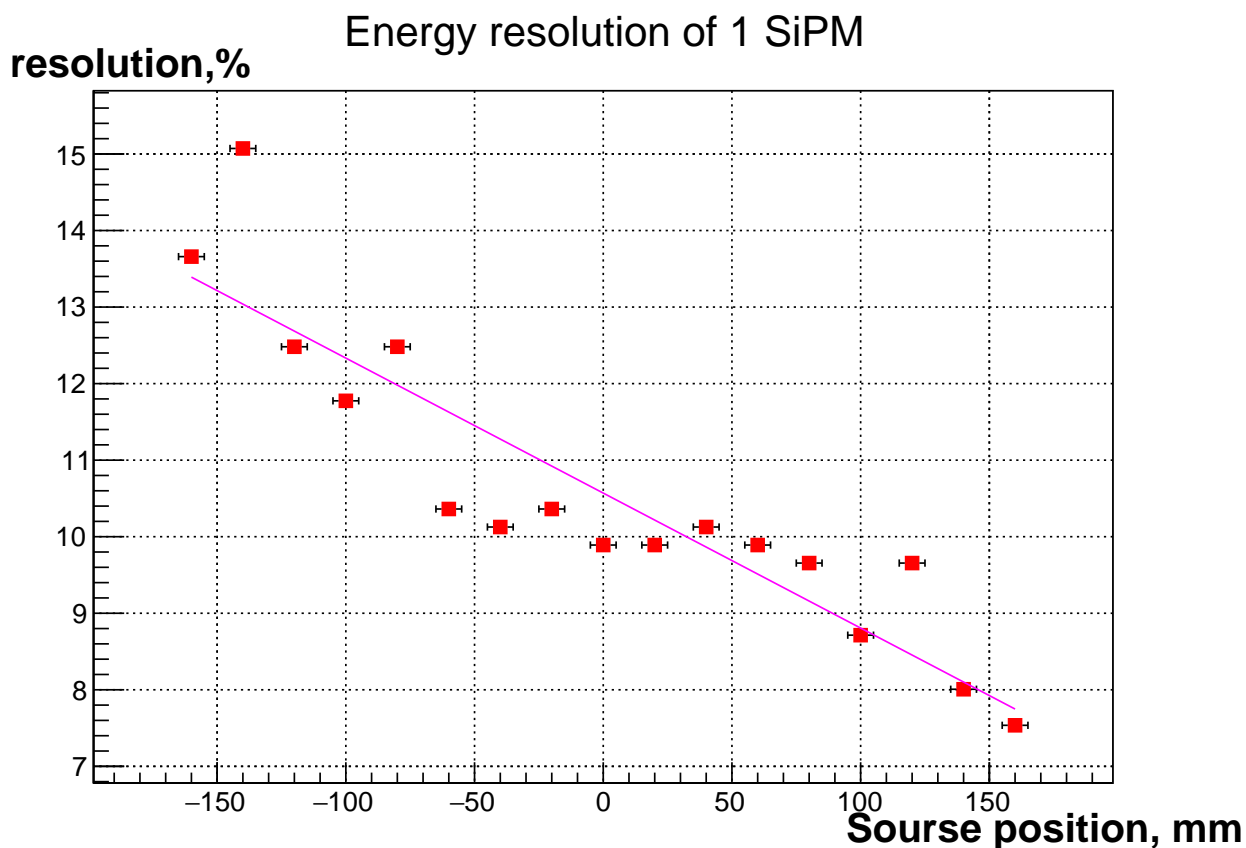


Рисунок 15: Энергетическое разрешение в зависимости от положения источника для 1 SiPM

4.6 Добавление критериев отбора на регистрируемые события и проверка их влияния на временные параметры детектора

Для улучшения временных параметров помимо выделения фона, можно так же ввести критерии отбора на события, в нашем случае отбор будет проводиться по заряду считанному в SiPM, т.к мы используем органический сцинтиллятор, то для гамма квантов проведение такого отбора затруднительно, т.к. отсутствует пик обратного поглощения и фото пик, в связи с чем построение энергетической шкалы затруднительно. И для измерений в которых не удастся идентифицировать электронный пик, данные отборы проводиться не будут.

Как было сказано выше, после удаления коллиматора, значительно увеличилась скорость счета, и стал различим пик соответствующий распределению электронов. Известно, что данный пик соответствует пику полного

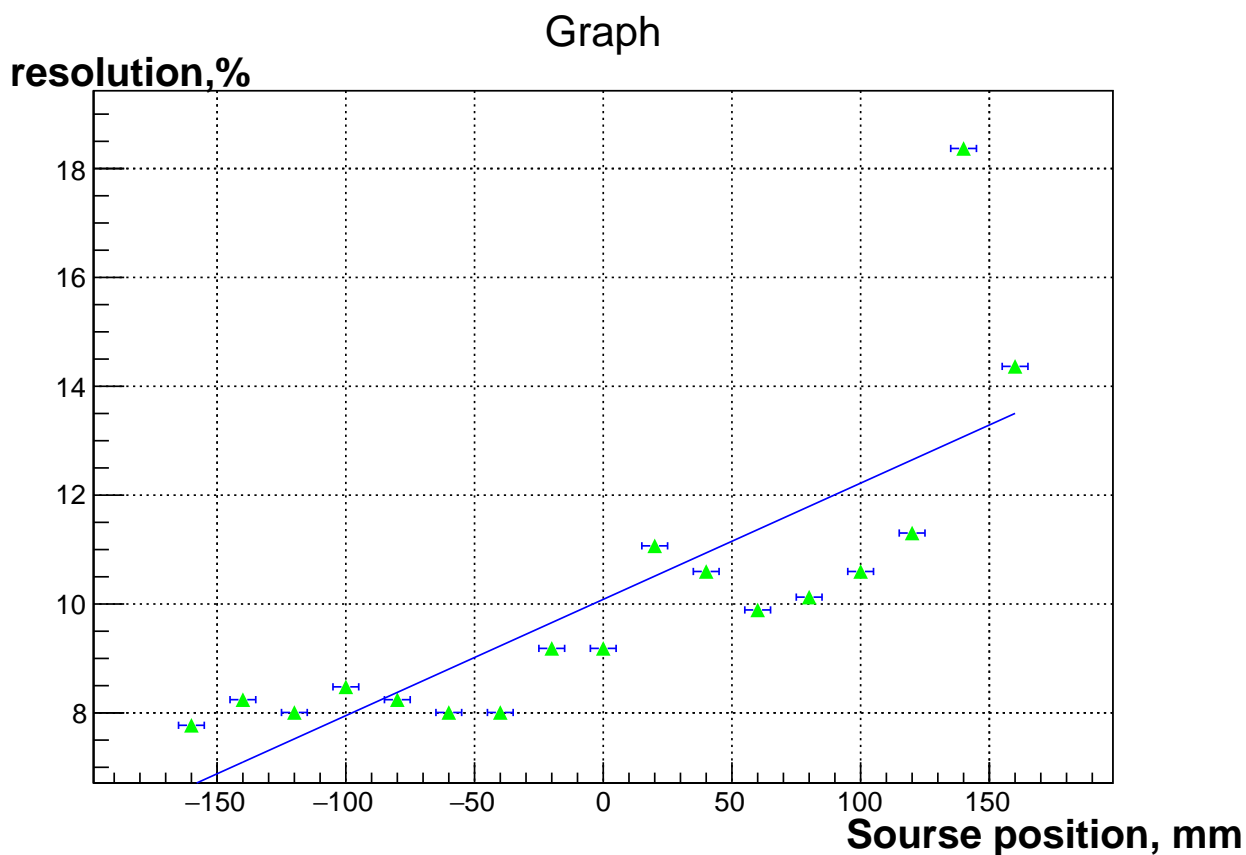


Рисунок 16: Энергетическое разрешение в зависимости от положения источника для 2 SiPM

поглощения электронов с энергией $E_e = 959$ кэВ.

В качестве критериев на отбор возьмем заряд соответствующий данному пику.

Как видно на рис.19 после проведения отборов среднеквадратичное отклонение уменьшилось для всех измерений в сравнении с данными без отбора рис.18, что свидетельствует об эффективности данного отбора и применимости его в данных измерениях. Так же, результат по некоторым измерениям можно увидеть на рисунках 20,21,22,23. Аналогичные результаты наблюдались и в остальных измерениях. Как можно заметить, распределения стали уже, что улучшает временное разрешение, а так же пропали данные не относящиеся к данным распределениям. Стоит отметить, что после проведения отбора статистика уменьшилась примерно в 2.5 раза.

В результате можно сказать, что введение данного отбора положительно сказывается на временном разрешении детектора.

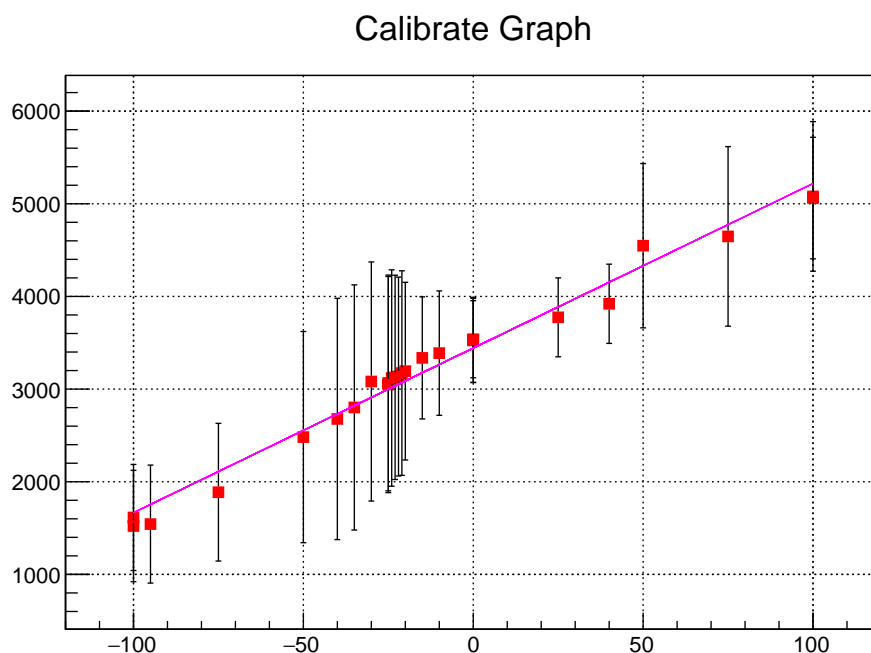


Рисунок 17: Калибровочный график разницы времен между сигналами от положения источника с необработанными данными при измерениях с коллиматором

5 Заключение

Для проведения данного эксперимента были получены навыки по работе с платой Petiros 2A, освоена методика по проведению временных измерений для сцинтилляторов, а так же получены навыки по построению модели детектора и построению процесса эксперимента и подготовки к нему.

В ходе данного эксперимента была проведена серия из 69 измерений с радиоактивным источником Bi^{207} и сцинтиллятором на основе полистирола, после этого была проведена обработка полученных данных с целью определения временного разрешения сцинтиллятора и улучшения данного параметра различными способами.

В связи с тем, что установить добавку не удалось, то на данный момент не представляется возможным полностью завершить моделирование данной установки в пакете Geant4, и провести сравнение полученных результатов с расчетными.

Тем не менее данную методику проведения измерений можно считать успешной, и на основе полученного опыта проводить измерения с другими

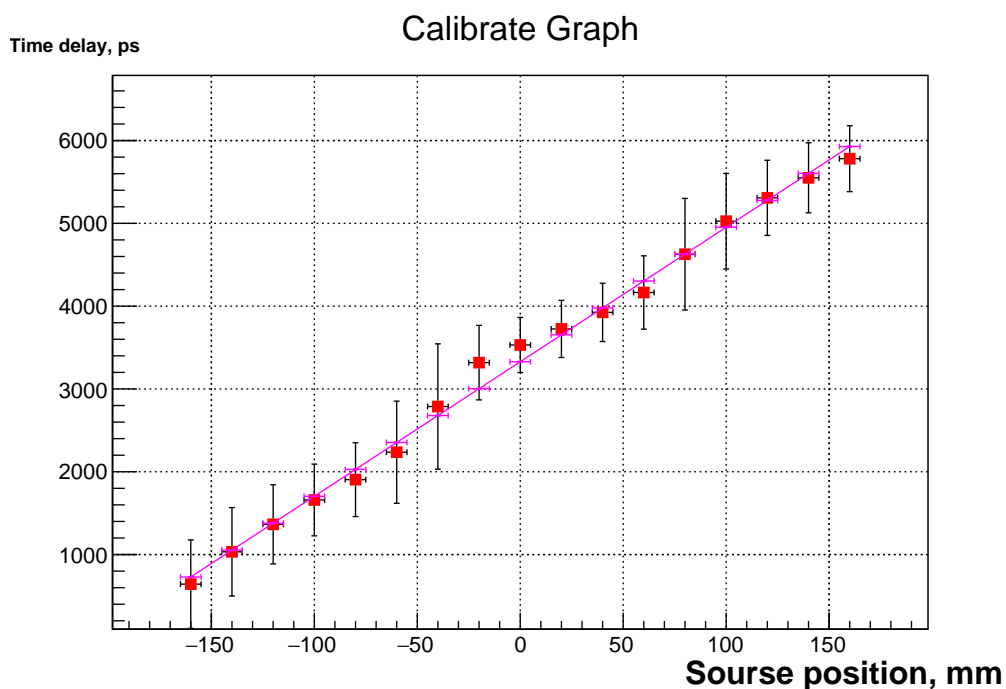


Рисунок 18: Калибровочный график разницы времен между сигналами от положения источника до проведения зарядовых отборов для измерений без коллиматора

веществами, для проверки возможности их использования в модели ПЭТ.

Полученные для данного пластика результаты временного разрешения находятся в промежутке от 800 пс до 1000 пс, что является недостаточным для улучшения геометрического разрешения существующего ПЭТ. Так же значительным недостатком пластика для применения в ядерной медицине является то, что эффективность регистрации гамма квантов крайне мала, и все измерения проводились для электронов, что не подходит для применения с живыми существами.

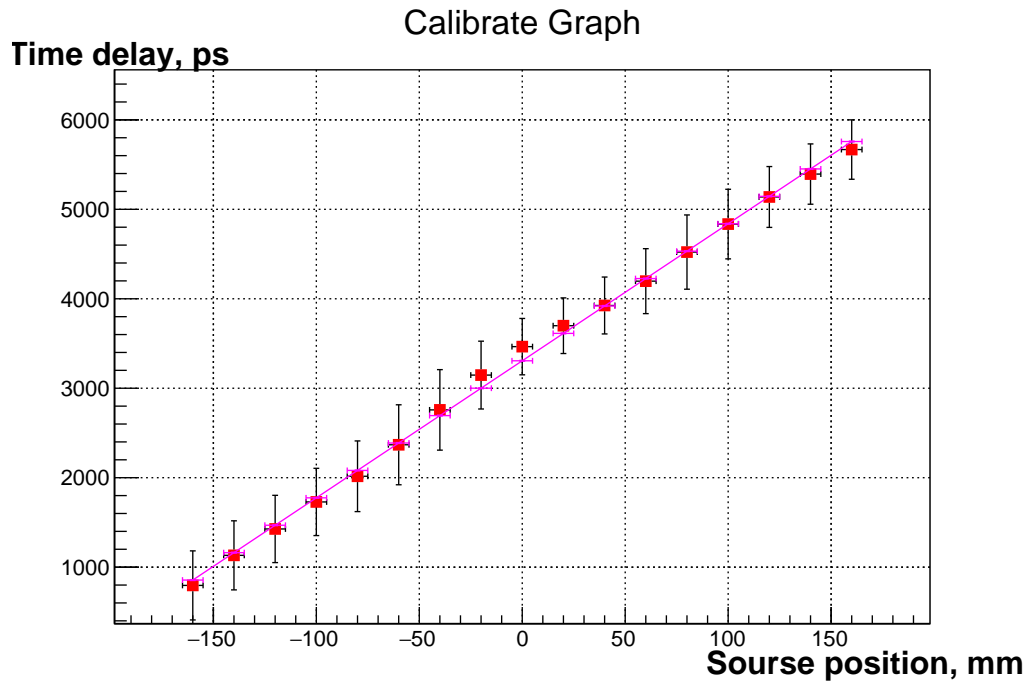


Рисунок 19: Калибровочный график разницы времен между сигналами от положения источника после проведения зарядовых отборов для измерений без коллиматора

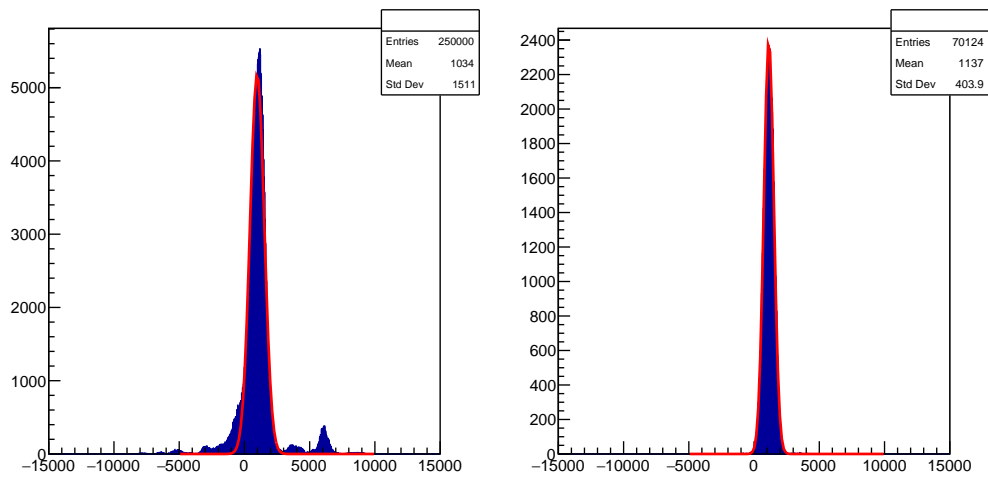


Рисунок 20: Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x = -140$ относительно центра; Справа до отбора, слева после отбора

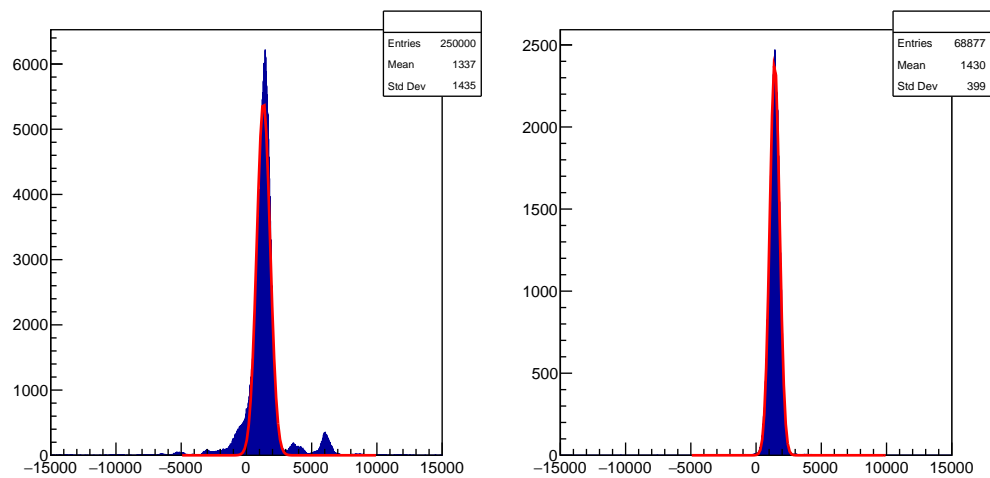


Рисунок 21: Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x = -120$ относительно центра; Справа до отбора, слева после отбора

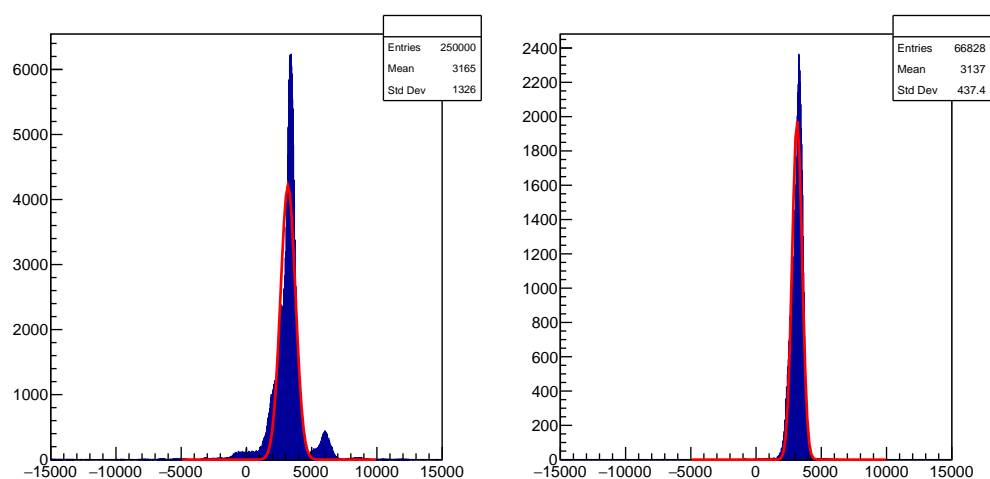


Рисунок 22: Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x = -20$ относительно центра; Справа до отбора, слева после отбора

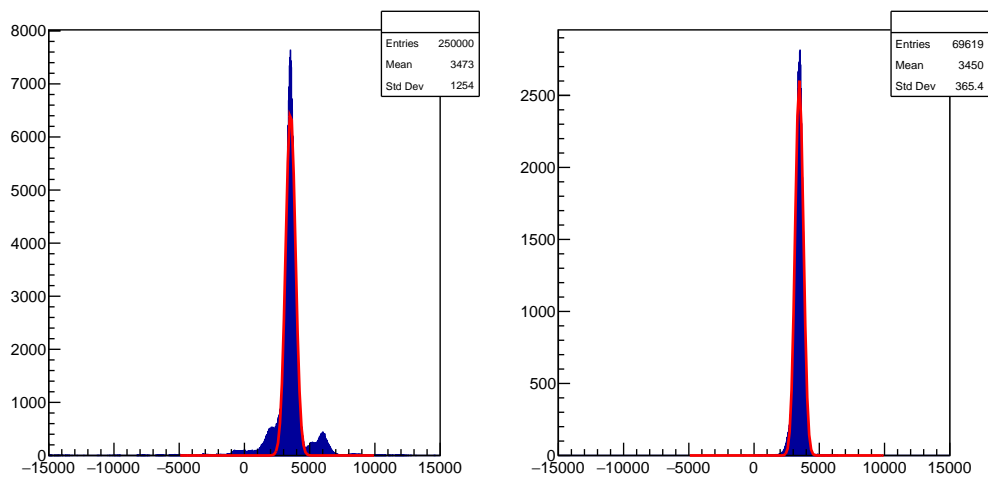


Рисунок 23: Распределение числа событий в зависимости от разницы времен между событиями для положения источника $x = -0$ относительно центра; Справа до отбора, слева после отбора

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *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.
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. — авг. — с. 80—86.
5. PETIROC 2A SiPM read out for time of flight PET. <https://www.weeroc.com/pro/read-out/petiroc-2a>.
6. Root - an object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.