

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
ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛИСТИРОЛА

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 данной работы является получение практических навыков по измерению временных характеристик веществ и обработки полученных данных, а так же по выработке методики данных измерений. 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 этого планируется применения выработанной методики для исследования аргона, и последующей реализацией макета, подходящего для измерения в реальных условиях (в нашем случае это макет ПЭТ). Это является логическим продолжением, проводимого в настоящее время, эксперимента по определению временных характеристик полистирола. [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-

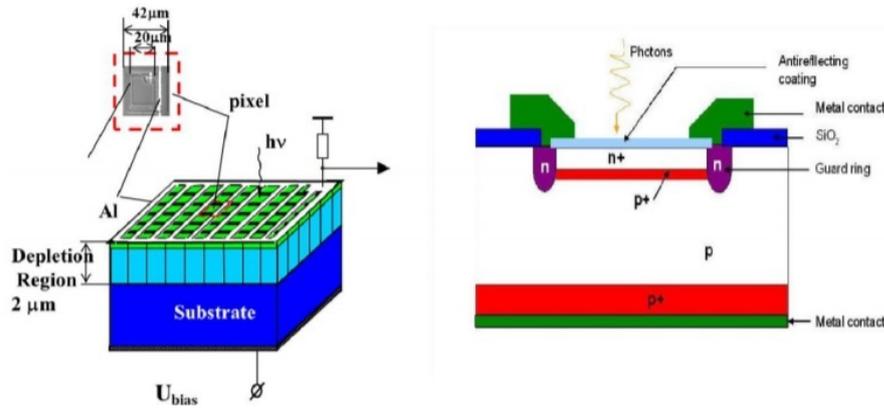


Рисунок 1: устройство SiPM

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, 2 усилителей CAEN A1423B (не представлены на рисунке 2), платы Petiros2A и платы XTDc4, радиоактивного источника Bi^{207}

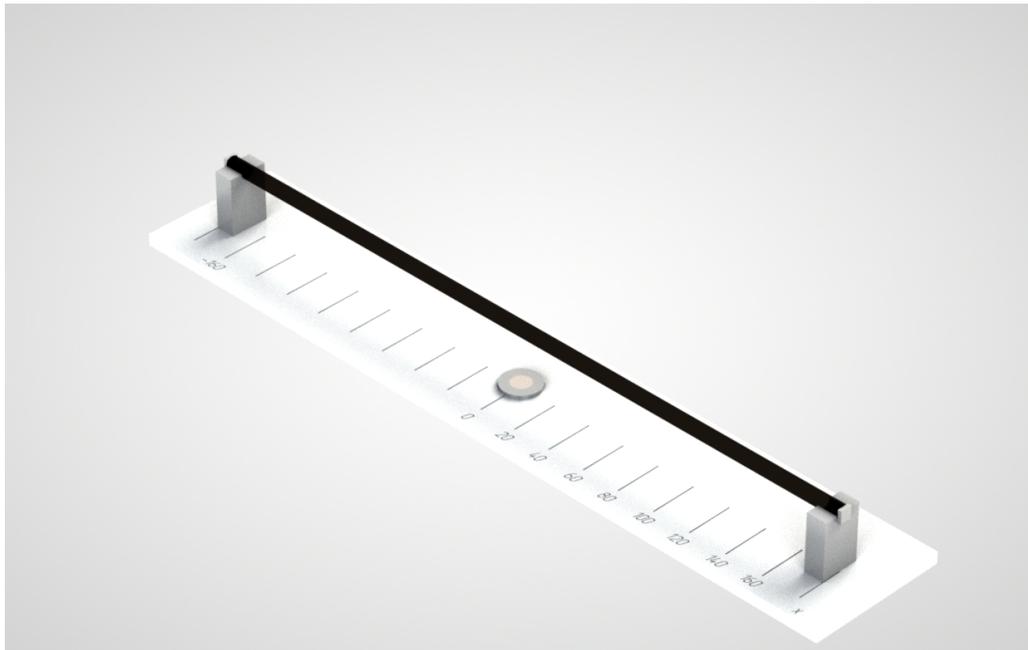


Рисунок 2: Фото-реалистичный вид геометрии установки

2.2 Плюсы и минусы геометрии

Плюсы:

1. Протяженность сцинтиллятора

За счет протяженности сцинтиллятора появляется возможность проведения измерений с использованием радиоактивного источника с низкой интенсивностью излучения, поскольку при перемещении источника не изменяется расстояние между источником и сцинтиллятором, а следовательно не уменьшается скорость счета. При этом нет необходимости в позитронном источнике, поскольку отсутствует необходимость в наличии двух γ .

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

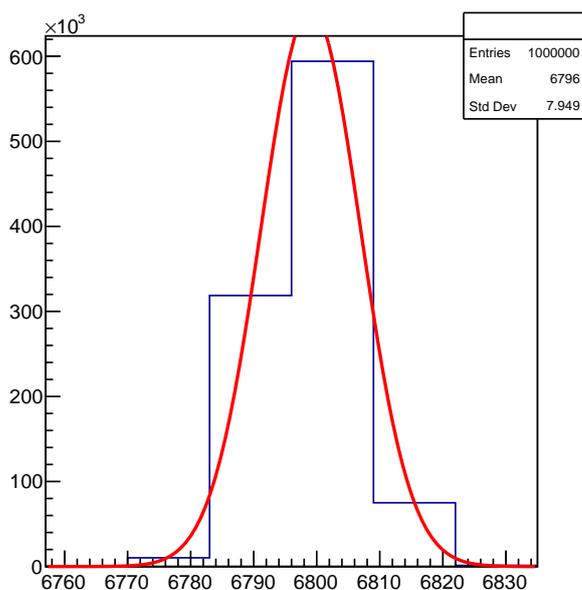


Рисунок 3: Разница времен между событиями при измерении с генератором для платы xTDC4

3.1 Получение навыков по работе с платой xTDC4

В измерениях с платой Petiros2A и генератором импульсов была определена приборная погрешность данной платы, которая составляет порядка 150 пс *p.4*. Такое ограничение на временное разрешение может стать критической проблемой для будущих измерений быстрых сцинтилляторов (BaF2).

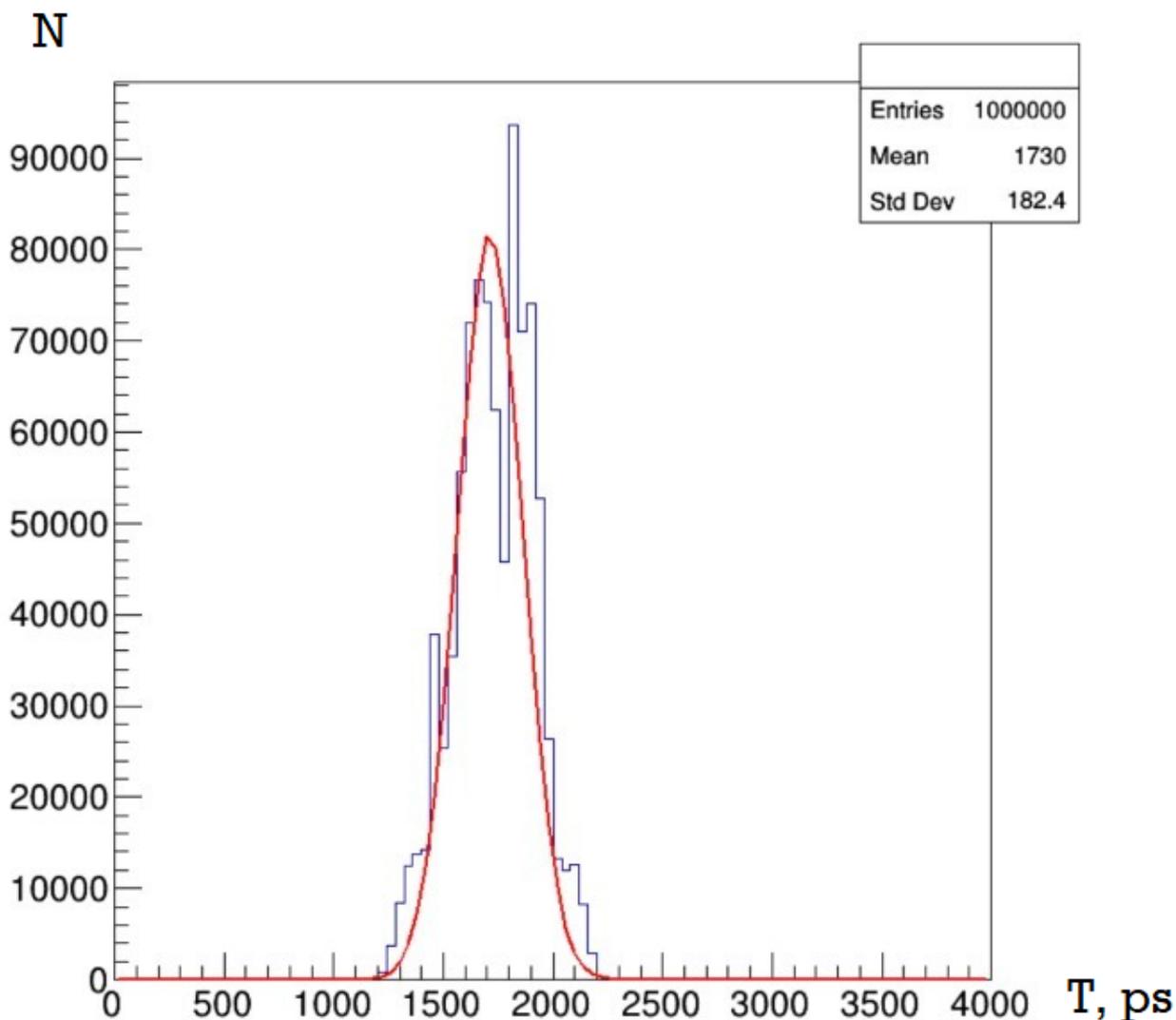


Рисунок 4: Разница времен между событиями при измерении с генератором для платы Petiros 2A

Данное значение приблизительно 2-3 раза меньше, чем погрешность получаемая в измерениях с реальным источником и пластиком, из-за чего возникает неопределенность в измерении временного разрешения детектора. Поэтому возникла необходимость в использовании электроники позволяющей проводить измерения с большей точностью. Для данных целей была выбрана 4 канальная плата xTDC4.

Для определения функционала данной платы была изучена техническая документация[5], из которой была получена информация о режимах работы платы, необходимых параметрах входного сигнала. Вместе с платой предоставлялся код примера работы с ней, но данный код не работал ввиду отсутствия определенных библиотек. Так же в документации не был описан

принцип записи данных, а пример приведенный в документации отличался от поставляемого в комплекте с платой.

После добавления необходимых библиотек и успешной сборки проекта с тестовой программой, возникла задача по поиску в коде переменных отвечающих за параметры сигнала и настройки, связанные с режимом работы платы, а так же проверка работы платы на сигнале с SiPM с кристаллом *LYSO*. Данный кристалл использовался из-за наличия собственной радиоактивности, что позволяло работать без радиоактивного источника. В данной серии измерений использовался раздвоенный сигнал, замедленный проводами по одному из каналов, плата xTDC4 и модифицированная программа для измерений поставляемая в комплекте с платой. В ходе измерений удалось получить первые данные, формат которых приведен на рис.???. Как можно заметить, в данных присутствуют различные значения времен между сигналами, а так же "случайное" количество 0.

Так же возникли проблемы с неопределенностью переменных выставляемых в программе для проведения измерений и изменяющемся количеством записанных данных. Поэтому было принято решение продолжить работу с тестовым файлом, т.к. он позволял проводить более тонкую настройку работы платы, а так же при запуске отображал все предупреждения и ошибки возникающие при работе платы.

После анализа тестового файла было выдвинуто предположение о причине появления 0 и "случайных" значений времен, не соответствующих реальной задержке проводами. Для проверки предположения был изменен характер измерений. Вместо раздвоенного сигнала на каналы платы подавались сигналы с разных каналов генератора. После варьировались параметры сигнала.

Стоит отметить одну особенность данной платы, в ней существует 5 каналов, но один канал всегда используется для "старт" сигнала, и данный сигнал должен приходить раньше других. Остальные 4 канала используются для "стоп" сигнала.

В ходе измерений было определено:

1. После получения "старт" сигнала плата ожидает определенный промежуток времени t сигнал "стоп" при этом плата проверяет его наличие

через определенные промежутки времени τ , и производит запись в заданное окно времен всех пришедших сигналов стоп. Т.е. на один сигнал "старт" может приходиться несколько сигналов "стоп" и будут записаны все времена между сигналом "старт" и каждым сигналом "стоп". Отсутствие сигнала "стоп" и соответствовало наличию 0 в записанных данных.

2. Ожидание сигнала "стоп" может прекратиться раньше времени ожидания t , если придет следующий сигнал "старт" т.е. если частота сигнала "старт" намного превышает частоту сигнала "стоп" то количество записанных данных будет определяться количеством сигналов "стоп".
3. плата ожидает сигналы с определенной частотой и не записывает сигнал выходящий за определенный частотный диапазон.
4. программа работает до определенного числа ошибок в измерении

Далее программа была модифицирована для записи определенного числа событий, с учетом потерянных событий и событий с ошибками. Так же был написан код для записи интересующих нас данных в файл, для их дальнейшей обработки и анализа.

После было проведено измерение с генератором, на рисунке 3 представлено распределение числа событий в зависимости от разницы времен между сигналами, после первичного анализа данных временное разрешение составило 18,84 пс, а $\sigma = 8$ пс. Данные значения совпадали с заявленными производителем данных плат.

Окончательным этапом в получении навыков по работе с платой xTDC4 стал запуск платы на установке использовавшейся в предыдущем семестре для проверки корректности работы.

3.2 Подбора оптимальных параметров установки

Для определения оптимальных параметров работы установки была проведена серия измерений для различных комбинаций напряжения приложенного к SiPM и коэффициента усиления. Оптимальным напряжением является

$$U = 55.5 \text{ V}$$

Оптимальным коэффициент усиления является

$$k = 30 \text{ dB}$$

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 эффективность регистрации достаточно велика, что позволяет набирать статистику меньшее время. При данных параметрах временное разрешение детектора является наилучшим.

3.3 Проведений временных измерений с платой xTDC4

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. рис5 с шагом 20мм) без коллиматора. В качестве

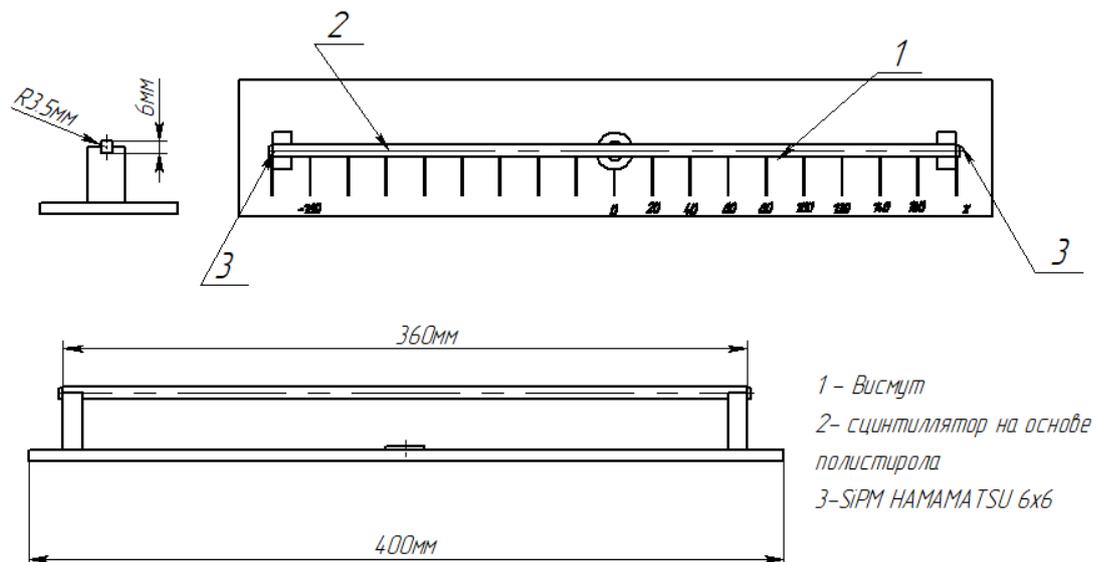


Рисунок 5: Схематичное изображение установки в 3-х проекциях

сигнала "старт" был использован сигнал с левого SiPM, для того чтобы данный сигнал с всегда приходил раньше, второй сигнал был сильно задержан. Для задержки использовались провода.

Стоит отметить, что данная конфигурация проведения эксперимента, является неудачной, поскольку при проведении измерений для определения положения источника на реальной установке не известно придет ли сигнал в каждый из используемых SiPM, количество которых может исчисляться 1000, в связи с чем возникает неопределенность, связанная с выбором SiPM для сигнала старт. Поэтому было принято решение в качестве сигнала "старт" использовать генератор постоянных импульсов. В данной конфигурации проводятся измерения времени не между сигналами, пришедшими на фотомножитель, а между каждым сигналом с SiPM и импульсом с генератора. Вычисление же времени между сигналами, будет производиться на этапе обработки первичных данных. Стоит отметить, что увеличение погрешности связанное с двойным измерением времени незначительно, так как временное разрешение самой платы, много меньше чем измеренные значения временного разрешения. Ниже приведена таблица (1), в которой приведены значения временного разрешения для измерений при различных положения источника.

Положение источника, мм	σ , пс	σ_{gen} , пс	$\sigma_{petiroc}$, пс
120	463	471	478
100	477	499	446
80	464	483	433
60	468	499	617
40	488	484	757
0	433	467	333

Таблица 1 – Временное разрешение в зависимости от положения источника

В результате, была выработана методика по проведению временных измерений с платой xTDC4, написана программа для записи данных, модифицировано программное обеспечение для работы с платой. Все это является необходимым для дальнейшей работы по изучению временных характеристик веществ. Как можно было заметить на данный момент в эксперименте

нигде не ставились отборы на амплитуду сигнала, следовательно не была записана информация, необходимая для определения положения источника по амплитуде сигнала.

4 Обработка результатов измерений

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

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

Для определения энергетических разрешений были использованы измерения без коллиматора на плате Petiros2A, поскольку она позволяет записывать как разницу времен между двумя сигналами, так и амплитуду каждого сигнала в отдельности. На рисунках 6 и 7 показана 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.

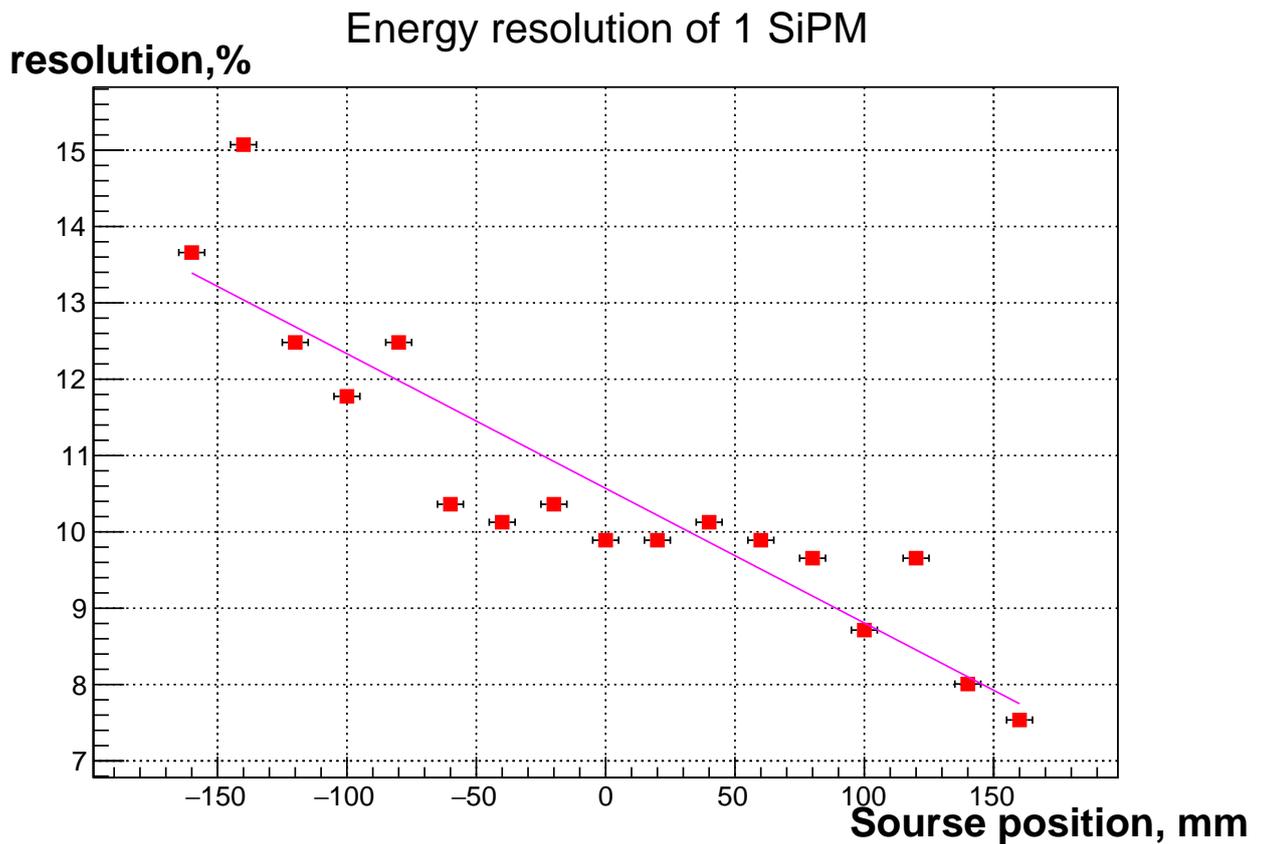


Рисунок 6: Энергетическое разрешение в зависимости от положения источника для 1 SiPM

4.2 Определение положение источника по временным измерениям с платой xTDC4

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.8), на который были нанесены экспериментальные точки, после чего было проведено фитирование линейной функцией ($\tau = k * x + b$). Ниже приведены значения коэффициентов и их ошибки.

$$k = 21.8 \pm 0.2$$

$$b = 4926.2 \pm 23.9$$

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 24 мм. Данное значение не является предельным для полистирола, для улуч-

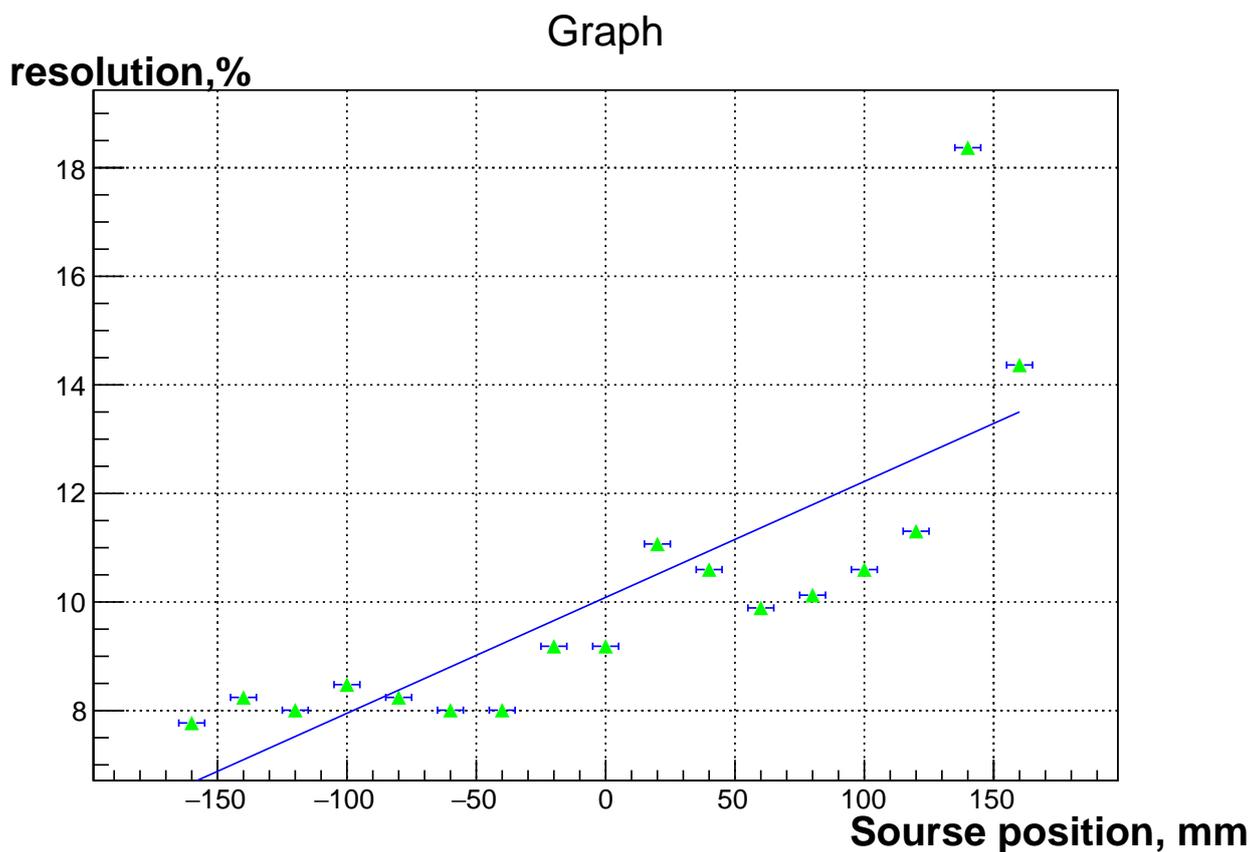


Рисунок 7: Энергетическое разрешение в зависимости от положения источника для 2 SiPM

шения итогового разрешения необходимо внедрение амплитудных отборов, которые не проводились в данной серии измерений.

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.

4.3 Определение положение источника по амплитудным измерениям с платой Petiros 2A

Дополнительную информацию о положении источника могут дать амплитудные измерения. Плата Petiros 2A позволяет собирать необходимую информацию, на основе полученных данных была построена зависимость амплитуды сигнала, для энергии $E_e = 959$ кэВ, от положения радиоактивного источника, для определения характера зависимости и параметров функций, было произведено фитирование различными функциями. В качестве итогов-

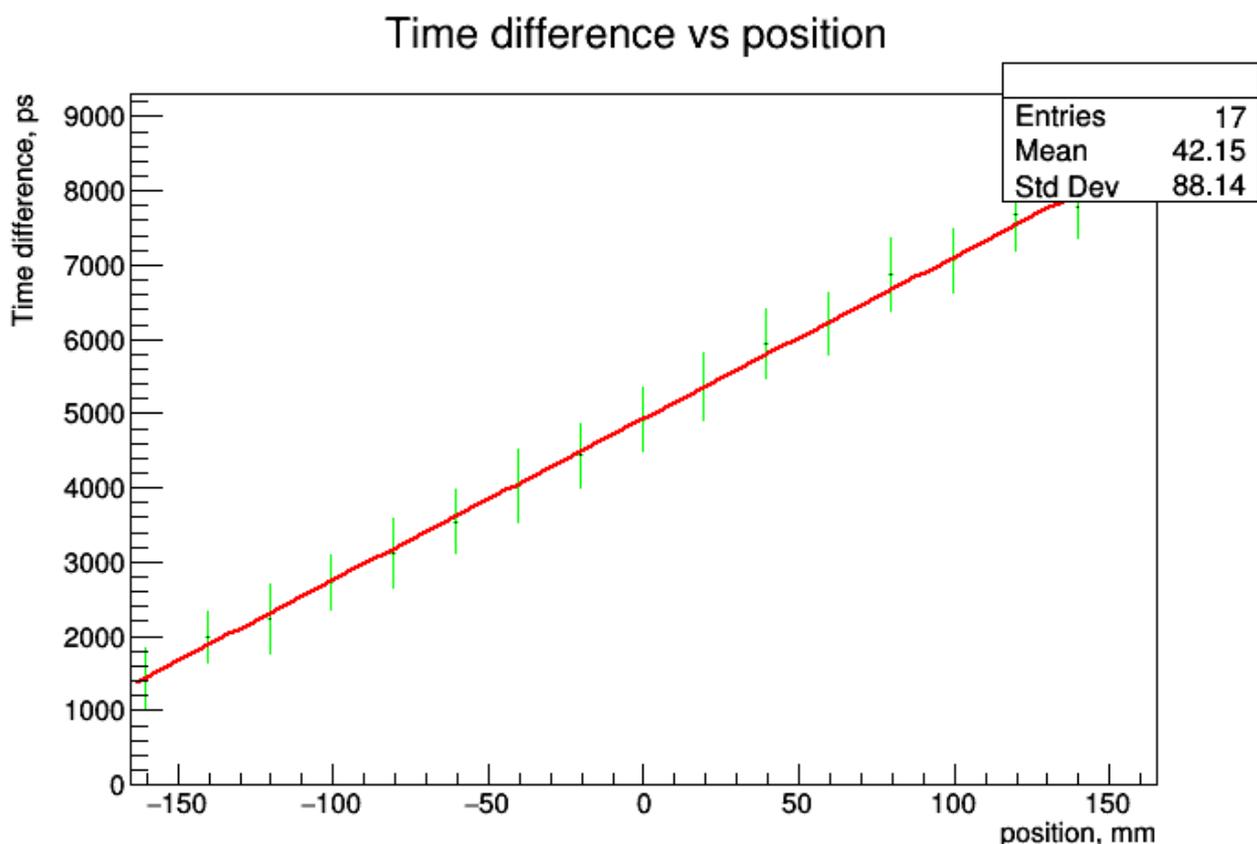


Рисунок 8: График зависимости разницы времен между сигналами от положения источника

вой функции была выбрана экспоненциальная зависимость:

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

На рисунках (9 – 10) приведены графики зависимостей амплитуды сигнала от положения источника для двух фотоумножителей.

Амплитуда измерялась относительно положения пика соответствующего энергии $E_e = 959$ 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 привязки к энергии). Несмотря на это, амплитудные измерения являются дополнительным источником информации, что должно улучшить итоговое разрешения.

После учета амплитудных измерений ошибка определения координаты составляет не более 18 мм. В это время наибольшая ошибка определения положения только за счет амплитудных измерений составляет 100 мм.

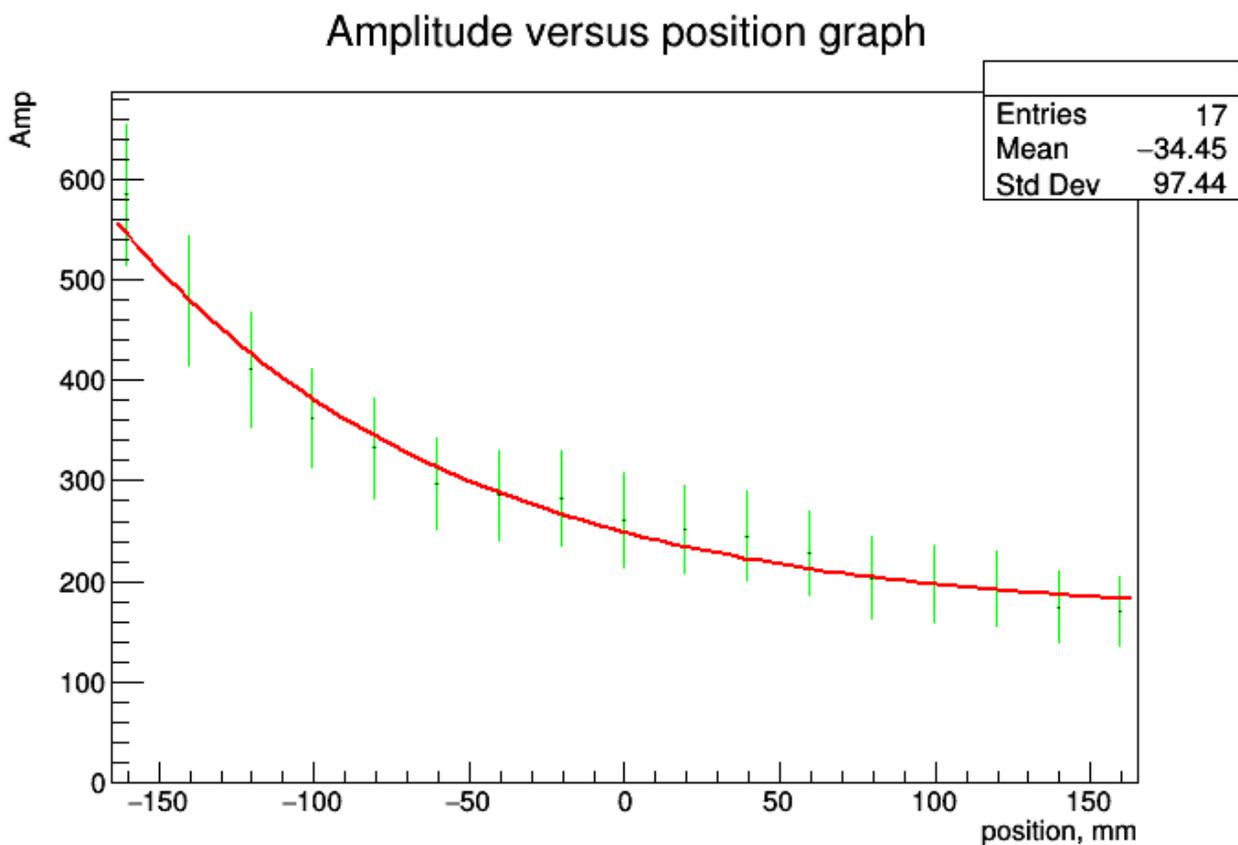


Рисунок 9: Амплитуда сигнала в зависимости от положения источника для 1 SiPM

5 Заключение

Для проведения данного эксперимента были получены навыки по работе с платой xTDC4, доработано программное обеспечение, 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 17 измерений с радиоактивным источником Bi^{207} и сцинтиллятором на основе полистирола, после этого была проведена обработка полученных данных с целью определения временного разрешения сцинтиллятора. Несмотря на улучшение разрешения 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 от-

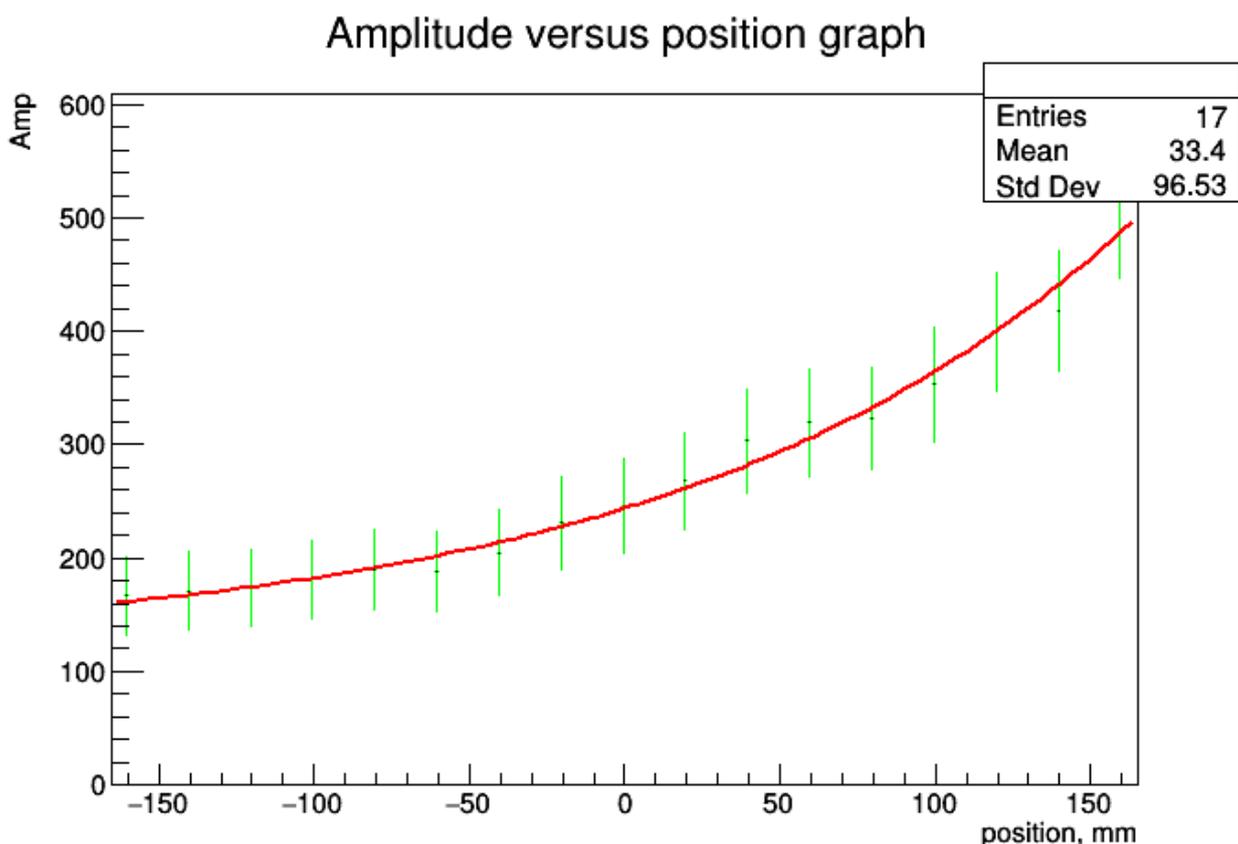


Рисунок 10: Амплитуда сигнала в зависимости от положения источника для 2 SiPM

сутствием коллиматора.

На основе полученных данных были написаны программы для восстановления положения радиоактивного источника, с использованием 3 источников информации. Результирующая погрешность составляет не более 20 мм. Что является недостаточным для проведения высокоточных измерений, требуемых в позитронной томографии, но несет значительную ценность как методика проведения временных измерений, не требующая источника высокой интенсивности, имеющая низкую стоимость, и не требующая позитронных источников. Все эти преимущества полистирола является важным при проведении методических временных измерений, с целью освоить процесс работы с электроникой и программами для восстановления координаты, во временных измерениях. Саму методику выработанную в ходе проведения данной работы можно использовать для других веществ, с целью определения из временных характеристик и оценки возможности применения их в ядерной медицине и других областях физики элементарных частиц требую-

щих определенных параметров от веществ применяющихся в экспериментах.

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 xTDC4-PCIE. <https://www.cronologic.de/products/tacs/xtdc4-pcie>.
6. Root - an object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.