

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
СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент

_____ А. В. Гробов

Выполнил:

_____ М. А. Шадрин

Москва 2019

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 технологий, и созданию новых, т.к. существующие технологии зачастую недостаточны (так пока не может быть подтверждено существование темной материи и энергии, и до недавнего времени не могло быть обнаружено предсказанное нейтрино). 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 Общая информация

Практически все методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений (α , β , γ) и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Первый сцинтилляционный детектор, названный спинтарископом, представлял собой экран, покрытый слоем ZnS . Вспышки, возникавшие при попадании в него заряженных частиц, фиксировались с помощью микроскопа. Однако существенное развитие эта методика получила после разработки в 1930-х годах фотоэлектронных умножителей

(ФЭУ) и по сей день, являющиеся наиболее распространённым устройством для улавливания единичных фотонов и измерения интенсивности сцинтилляции. Концепция подсчета света, испускаемого сцинтиллятором, до сих пор является основой современных сцинтилляционных детекторов. Однако на смену фотоумножающим трубкам приходят новые методы. Кремниевый фотоумножитель (SiPM) - это сравнительно новая технология полупроводниковых детекторов, которая может эффективно конкурировать с существующими на данный момент ФЭУ. Основными преимуществами SiPM являются компактность, отсутствие необходимости в работе с высоким напряжением и нечувствительность к магнитным полям.

Данные преимущества делают SiPM перспективным прибором в физике элементарных частиц, в связи с чем изучение основных характеристик SiPM и получение навыков по работе с ним являются важными для физика-экспериментатора.

1.3 Используемые Физические свойства

Взаимодействие частиц с веществом зависит от их типа, заряда, массы и энергии и зависит от таких характеристик вещества как его плотность, атомный номер и средний ионизационный потенциал вещества. Тяжёлые заряженные частицы при прохождении в веществе в основном теряют свою энергию в результате неупругих кулоновских столкновений с атомами, приводящих к ионизации и возбуждению их электронных оболочек. В отличие от тяжёлых частиц, ионизационные потери энергии преобладают для низкоэнергетичных электронов (< 2 МэВ). С ростом энергии электрона растут радиационные потери, и начиная с энергий порядка нескольких десятков МэВ, радиационные потери превышают ионизационные. Нейтроны и гамма-кванты, не имеют собственного электрического заряда и поэтому не создают заметных ионизационных и радиационных эффектов. Но в результате упругих и неупругих (ядерных, электромагнитных) столкновений с атомами и ядрами среды, образуют свободные заряженные частицы, передавая им свою энергию. В свою очередь заряженные частицы сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию. В случае гамма-квантов основными процессами, приводящими к образованию заряженных частиц, являются фотоэффект, эффект Комптона и рождение

электрон-позитронных пар.

Некоторые методы детектирования элементарных частиц основаны на регистрации ионизационных потерь[1]. При переходе частиц вещества (атомов, молекул, ионов) из возбужденного электронного состояния в основное наблюдается вылет фотонов с определенной частотой.[2] После вылета фотоны могут быть зарегистрированы оптическими счетчиками (в частности SiPM), в которых происходит преобразование оптического излучения в аналоговый сигнал, который можно обработать с помощью специальных устройств (осциллограф, специальная электроника и др.). Данный метод детектирования элементарных частиц получил широкое распространение во многих областях физики. Сцинтилляционные детекторы широко используются в ядерной физике, космофизике, в физике твердого тела, геологии, биологии и медицине.

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) p-n-переходов, выполненных на общей кремниевой подложке. Характерный размер одной ячейки составляет 10-100 мкм. Площадь чувствительной поверхности находится в пределах от 1×1 до 6×6 мм². [3]

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. При этом напряжение смещения на несколько вольт превышает напряжение пробоя p-n-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.

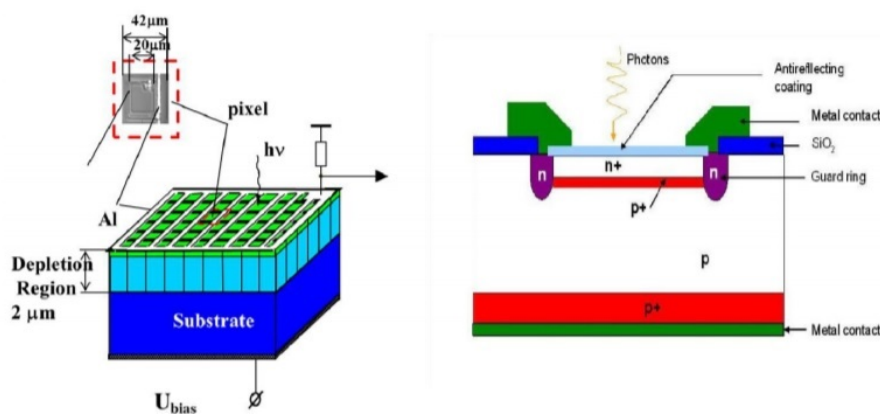


Рисунок 1 – устройство SiPM

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, вызвавших срабатывание ячейки. Отклик детектора на слабые световые вспышки пропорционален их интенсивности. Фотоотклик прибора остается линейным до тех пор, пока не становится вероятным попадание двух или более фотонов на один пиксель.

Основной характеристикой прибора является эффективность регистрации фотона [1] ϵ , которая является произведением квантовой эффективности р-п-перехода QE , геометрического фактора A и вероятности возникновения гейгеровского разряда G .

$$\epsilon = QE \times A \times G \quad (1)$$

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 спектральной 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 высокая, 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.

$$K = \frac{C_a(U - U_1)}{e} \quad (2)$$

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.

1.5 Характеристики сцинтилляторов

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.

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

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 соединения E :

$$n_e = \frac{E_\gamma}{\beta * E}, \quad (3)$$

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

$$R = \frac{\Delta E}{E_\gamma}, \quad (4)$$

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 возможной 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:

$$J = J_0 \exp \frac{-t}{\tau}, \quad (5)$$

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.

В зависимости от расположения атомов сцинтиллятора изменяется вероятность взаимодействия гамма кванта с веществом, как следствие при выборе сцинтиллятора так же следует сравнивать плотности различных веществ для определения оптимального. 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 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.

2 Описание установки

Для измерений использовался набор CAEN Educational Gamma Kit SP5600C для изучения гамма-излучения, а так же радиоактивные источники Am^{241} , Co^{57} , Na^{22} , Cs^{137} . В комплекте находится набор различных сцинтилляторов, с характеристиками приведенными в таб.1, а также одного SiPM Hamamatsu S10931-050P. Кристаллы $LYSO$, BGO —не гигроскопичны. Некоторые сцин-

	ρ , г/см ³	λ_{max} , нм	τ распада, нс	Световыход, фот/МэВ
$LYSO$	7.1	420	36	33200
$LaBr_3$	5.08	365	16	65000
NaI	3.67	415	250	41000
CsI	4.51	550	1100	54000
BGO	7.13	480	300	10000

Таблица 1 – Характеристики некоторых сцинтилляторов

тилляторы обладают собственной радиоактивностью, что является очень важным параметром при выборе оптимального сцинтиллятора для проведения измерений.

3 Измерения

3.1 Предварительные настройки

Для проведения измерений были выставлены определенные параметры: напряжение $U = 53,50B$, усиление $Gain[dB] = 50,00$, $Threshold[mV] = -15,00$, температура $T = 21,50C$ (данный параметр никак не регулировался), а так же количество столбцов в гистограмме ($N=4096$). Все параметры сохранялись одинаковыми для всех измерений. Время проведения одного измерения равнялось $t = 600$.

3.2 Проведение измерений и обработка

После установки параметров были набраны спектры для 4 источников (Am^{241} , Co^{57} , Na^{22} , Cs^{137}) с использованием сцинтиллятора $LYSO$, а так же с источником Bi^{83} и набором сцинтилляторов, состоящим из $LYSO$, $LaBr_3$, NaI , CsI , BGO . По полученным данным с помощью пакета обработки данных Root[4] были построены спектры распределений. Спектры распределений количества событий в зависимости от номера столбца в гистограмме подчиняются нормальному закону распределения, что согласуется с теорией. Вершины распределений соответствуют определенным энергиям испускания гамма квантов, теоретические значения данных энергий измерены и известны. Далее было проведено соответствие между найденными вершинами распределений и построена энергетическая шкала для каждого источника. После, было определено энергетическое разрешение кристалла для каждого источника. Ниже приведены энергетические спектры источников Am^{241} , Co^{57} , Na^{22} , Cs^{137} (рис.2-4), измеренный с помощью сцинтиллятора $LYSO$ и SiPM Hamamatsu S10931-050P.

3.3 Энергетическое разрешение кристалла $LYSO$

По набранным спектрам различных источников, по формуле 5 было определено энергетическое разрешение для различных энергий и построена зависимость, представленная на рис.6. Стоит отметить что с ростом энергии испускания источника энергетическое разрешение сцинтиллятора увеличивается, что согласуется с теоретическими данными. Энергетическое разрешение для энергии $E_\gamma = 662 \text{ KeV}$ составило 8.8% (2), что совпадает с паспортными данными.

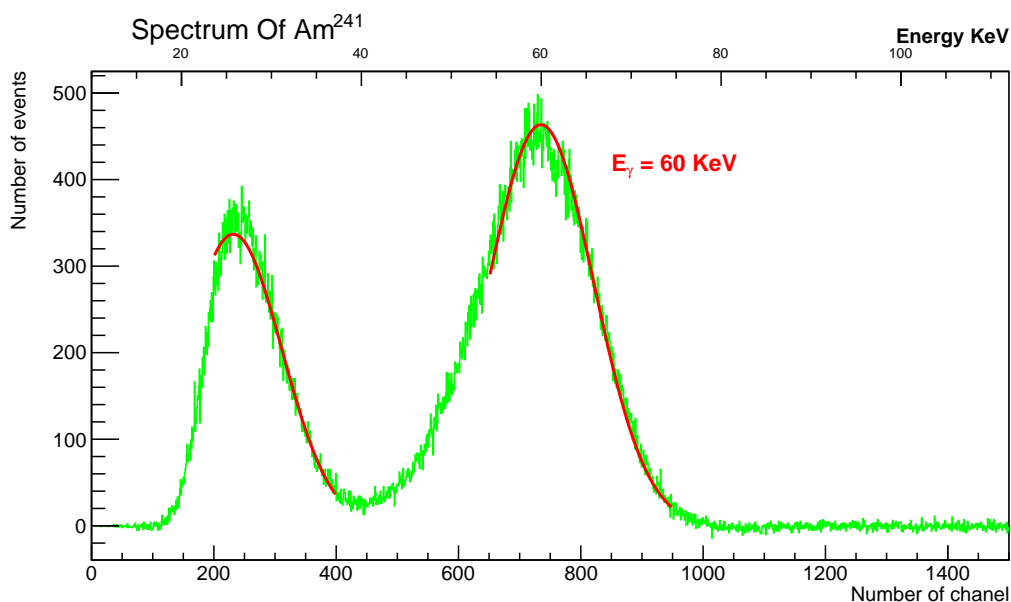


Рисунок 2 – Энергетический спектр Am^{241}

Источник	Cs^{137}	Am^{241}	Co^{57}	Na^{22}	Cs^{137}	Na^{22}
$E_\gamma, \text{ KeV}$	32	60	122	511	662	1274
$\frac{\Delta E}{E_\gamma}$	0.440217	0.301090	0.264620	0.117304	0.087500	0.074436

Таблица 2 – Энергетическое разрешение сцинтиллятора $LYSO$

Lu_2SiO_5 ($LYSO$) принадлежит к группе ортосиликатов редкоземельных элементов. Кристалл $LYSO$ не является изотропным и имеет выделенные оптические оси, как следствие коэффициент собирания света с разных граней может быть различным. Лютеций имеет два изотопа: стабильный Lu^{175} и Lu^{176} , который претерпевает бета-распад, его время жизни составляет $3 \cdot 10^{10}$ лет. Содержание Lu^{176} в природном лютеции составляет 2.6%. Радиоактивный изотоп излучает гамма-кванты с энергиями 88, 202 и 307 кэВ, что порождает собственный фон кристалла, составляющий 40 имп/с на грамм $LYSO$. Собственный фон кристалла является достаточно заметным и сильно ухудшает видимый спектр слабознергетичных источников. Тем не менее, на сегодняшний день $LYSO$ является уникальным сцинтиллятором, обладающим плотностью более 7 г/см³, атомным номером выше 60, световыходом около 30000 фотонов/МэВ и временем высвечивания менее 50 нс.

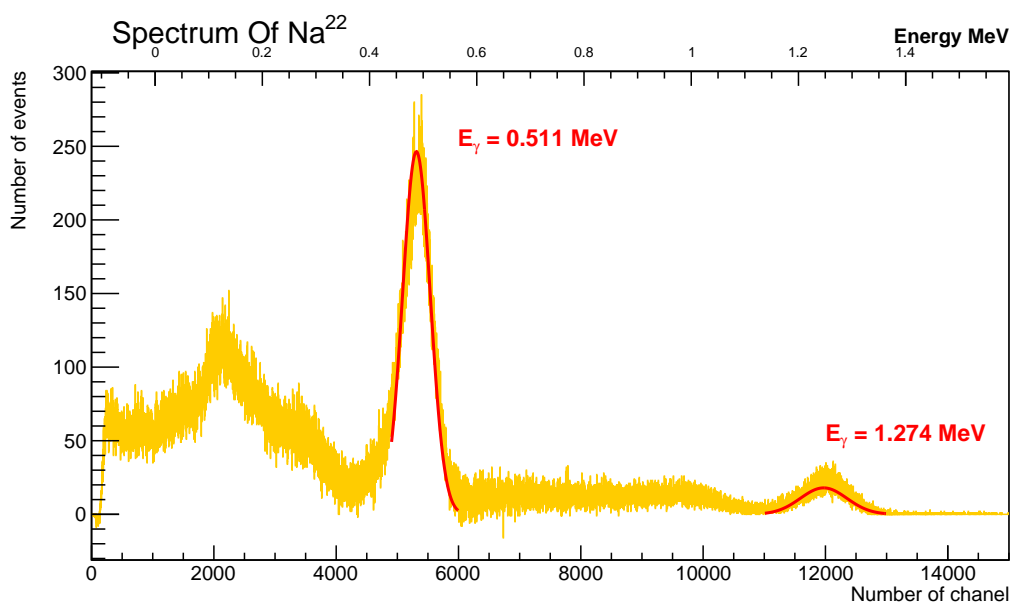


Рисунок 3 – Энергетический спектр Na^{22}

4 Анализ сцинтилляторов

В предыдущей части работы был проведен анализ сцинтиллятора *LYSO* с использованием нескольких радиоактивных источников. В данной части работы в качестве источника был использован висмут (*Bi*), Были сняты энергетические спектры с использованием различных сцинтилляторов. Измерения проводились с ФЭУ (рис.7) и SiPM (рис.8). Как можно заметить, спектры для различных сцинтилляторов отличаются, это связано с собственной радиоактивностью, эффективным атомным номером, плотностью вещества сцинтиллятора. После было определено энергетическое разрешение сцинтилляторов по данным с ФЭУ И SiPM. Результаты приведены на рисунке 9. Из рисунка видно, что большая часть сцинтилляторов обладает разрешением от 15% – 25% при энергии 600(KeV). При измерениях с использованием ФЭУ наилучшим энергетическим разрешением обладают *NaI* и *LaBr3*, а с SiPM *CsI* и *LaBr3*.

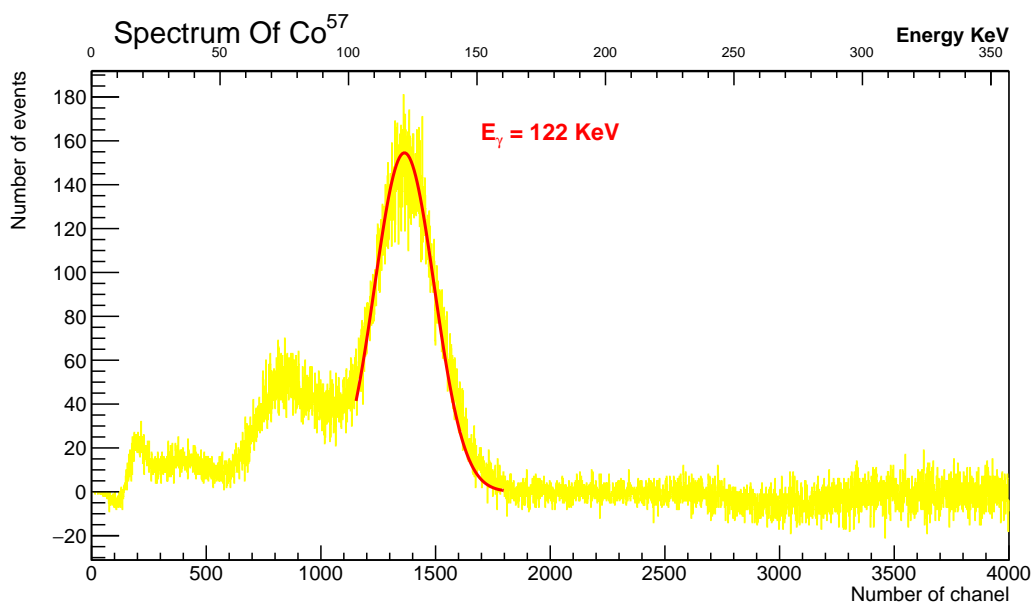


Рисунок 4 – Энергетический спектр Co^{57}

5 Заключение

Изучение сцинтилляторов и освоение методик работы со сцинтилляционными детекторами является важным аспектом, в подготовке физика-экспериментатора. Это помогает лучше осознать основные закономерности, на основе которых построены детекторы, а так же получить навыки по построению и проведению физических экспериментов, работы с данным типом детекторов и анализом получаемых данных. В данной работе были изучены основные характеристики сцинтилляторов и освоена методика работы с кремниевыми фотоумножителями. По результатам измерений, можно сказать что кремниевый фотоумножитель является хорошей заменой классическому ФЭУ. Данные измерения являются основой для дальнейшего изучения детекторов данного типа, и могут быть использованы при выборе сцинтиллятора для не учебных измерений.

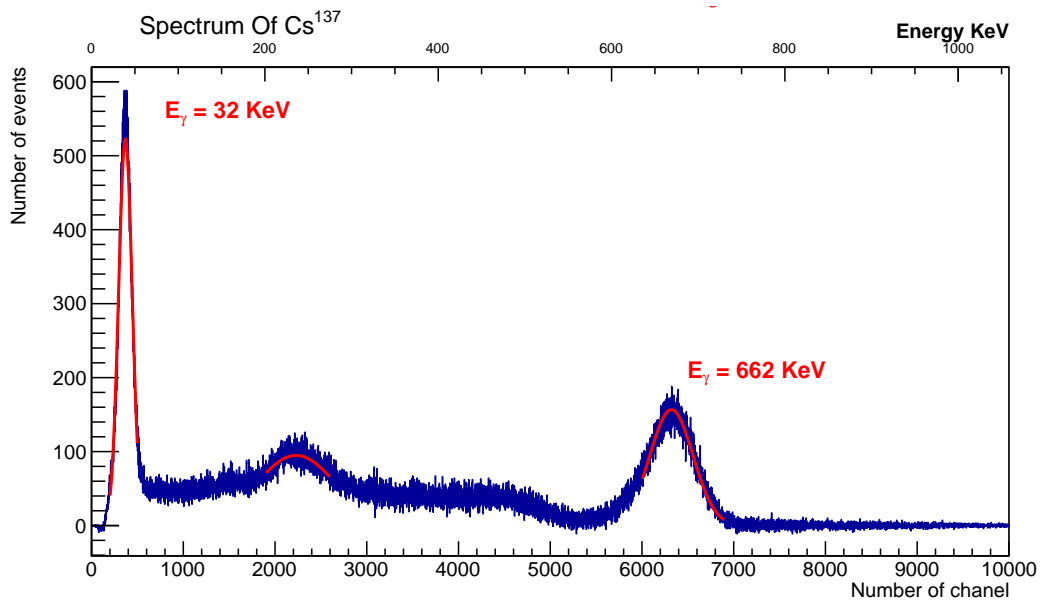


Рисунок 5 – Энергетический спектр Cs^{137}

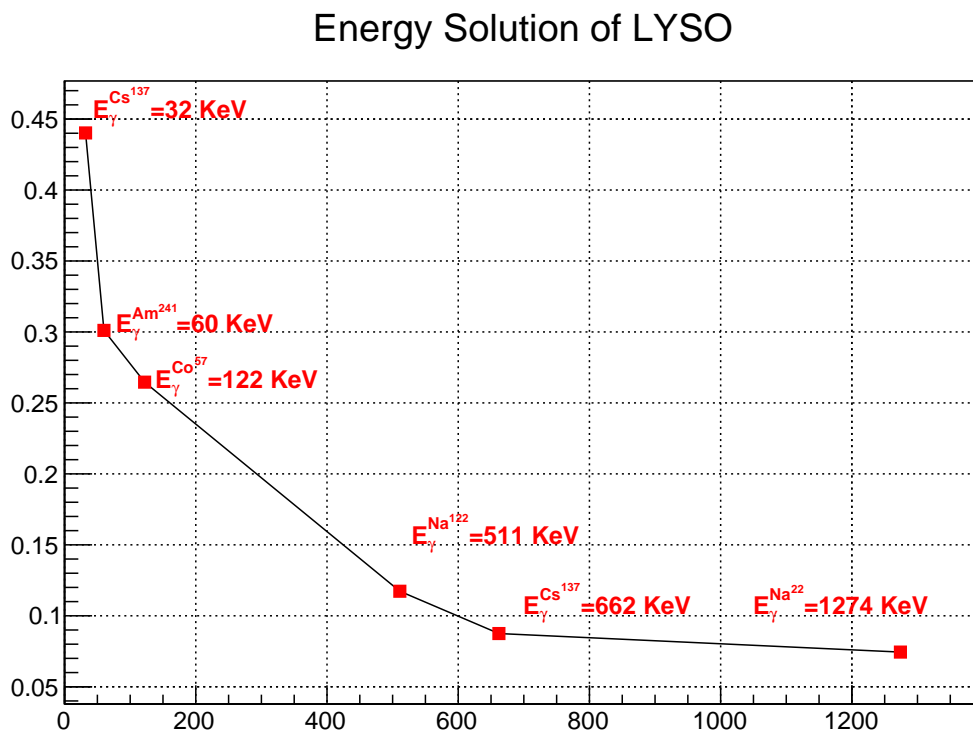


Рисунок 6 – Энергетическое разрешение неорганического сцинтиллятора *LYSO*

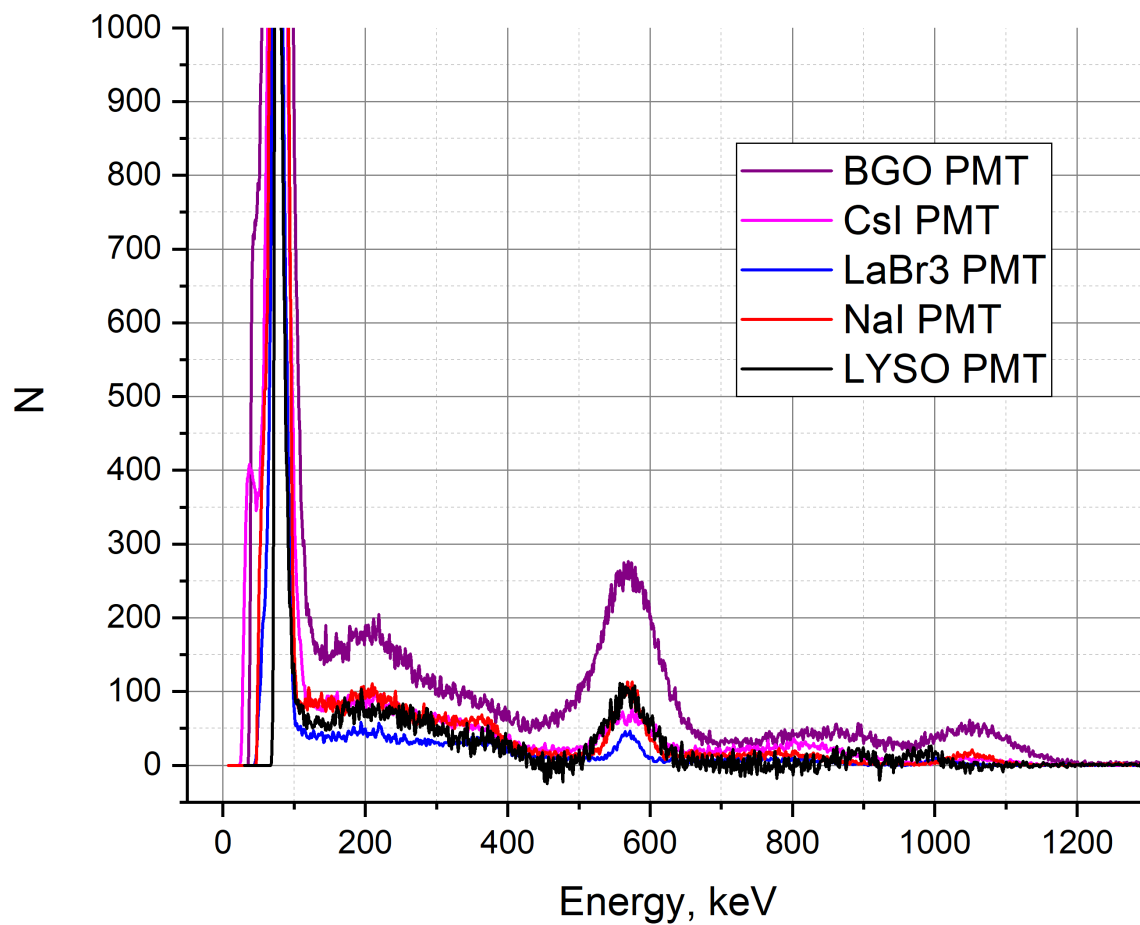


Рисунок 7 – Энергетический спектр Cs^{137} измеренный фотоумножителем с использованием различных сцинтилляторов

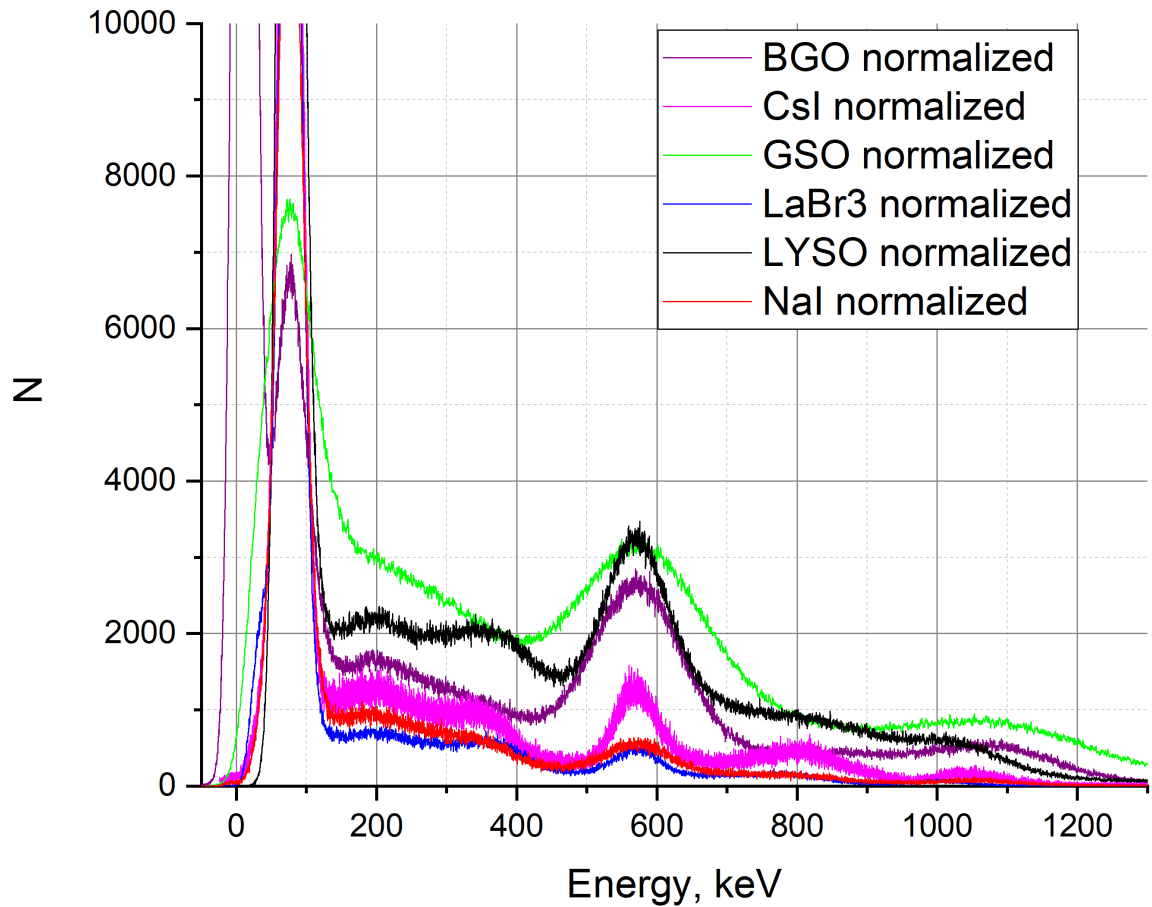


Рисунок 8 – Энергетический спектр Cs^{137} измеренный SiPM с использованием различных сцинтилляторов

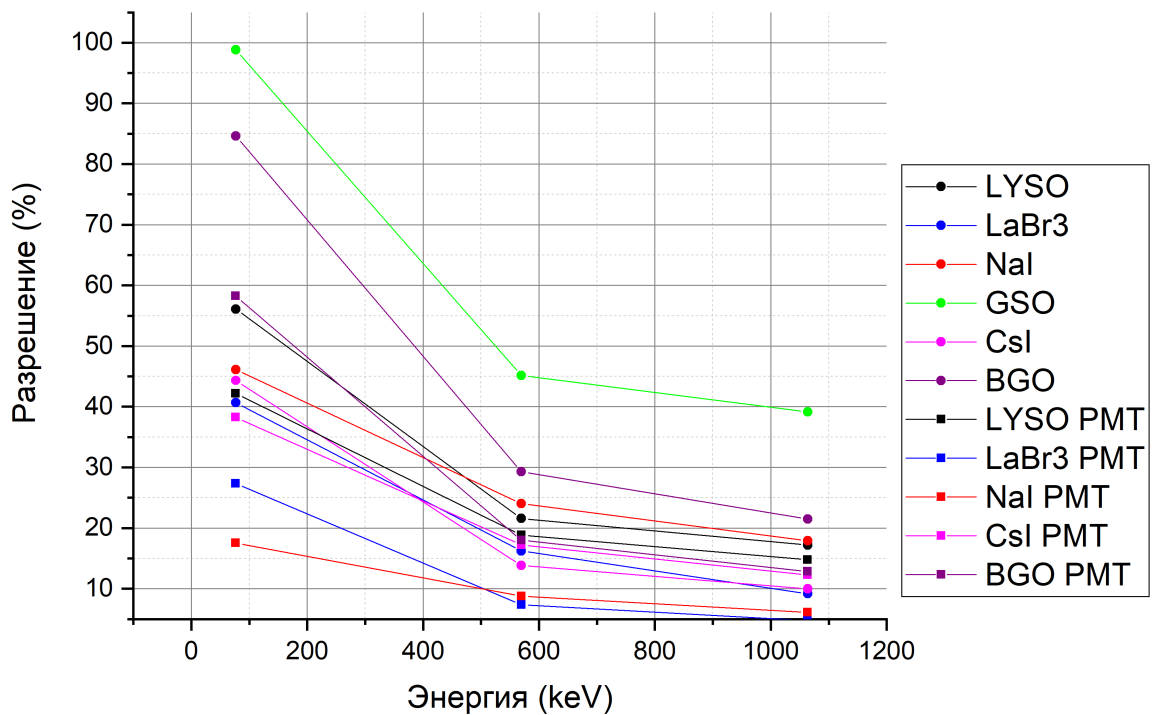


Рисунок 9 – Энергетическое разрешение сцинтилляторов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Physical principles for the detection of elementary particles <https://elementy.ru/>
2. *Мухин К.* ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. — 1993. — с. 408.
3. *Т.С. Брантова Б. Д.* ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ. — 2008. — с. 24.
4. Root - an object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.