

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Попов Алексей Владимирович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение фронта нарастания импульса на ФЭУ от сцинтилляционного  
кристалла CsI(Tl).**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

**Научный руководитель:**

к.ф.-м.н., Д. В. Матвиенко

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

А. А. Инжеваткина

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2021

## **Аннотация**

Работа выполнена на базе лаборатории кафедры Физики Элементарных Частиц Института Ядерной Физики СО РАН. Данная работа посвящена изучению сигналов с фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), создаваемых фотонами сцинтилляции от стандартного спектрометрического кристалла CsI(Tl). В работе проведен анализ формы импульсов с ФЭУ. Получены оценки времени фронта нарастания импульса и времени высвечивания CsI(Tl). Приводится сравнительная характеристика для двух типовых ФЭУ Hamamatsu R3256 и Hamamatsu R1847S. Описан метод обработки полученных данных. Создано программное обеспечение для обработки. Получены графики развертки сигнала с ФЭУ по времени. Получено время нарастания импульса.

Ключевые слова: Сцинтилляция, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), ионизирующий источник.

## **Оглавление**

Введение .....	4
Теоретическая часть .....	5
Сцинтилляция .....	5
Источник ионизирующего излучения .....	5
ФЭУ .....	6
Практическая часть .....	8
Экспериментальная установка .....	8
Обработка экспериментальных данных .....	9
Заключение .....	16
Список использованной литературы .....	17

## **Введение**

В современной физике закрепилось использование материалов, способных поглощать ионизирующее излучение и при этом выделять кванты значительно меньшей энергии. Такой класс материалов называют сцинтилляторами. А соответствующий процесс высвечивания квантов называют сцинтилляцией. Благодаря своему свойству сцинтилляторы находят практическое применение в качестве регистратора излучения. Вильгельм Рентген открыл Икс-лучи, используя сцинтилляционный кристалл  $\text{CaWO}_4$ . [1] С помощью сцинтилляторов были сделаны важные шаги на пути к открытию структуры атома. Эрнест Резерфорд изучал рассеяние альфа-частиц, рассматривая сцинтилляционную картину на экране из  $\text{ZnS}$ . Целью курсовой работы явилось изучение формы импульса с ФЭУ от сцинтилляционного света с кристалла  $\text{CsI(Tl)}$ . Перед выполнением курсовой было поставлено несколько задач. Во - первых, необходимо накопить теоретическую базу в контексте рассматриваемого вопроса. Во - вторых, требуется сформировать метод исследования явления и провести эксперимент. В – третьих, нужно проанализировать полученные данные и сделать на их основании вывод.

## **Теоретическая часть**

### **Сцинтилляция**

В сцинтилляторе происходит процесс преобразования фотонов высоких энергий в низкоэнергетические. При этом если квант ионизирующего излучения имеет энергию порядка кэВ – МэВ, то на выходе получаются кванты с энергией порядка эВ. Данный процесс начинается с того момента, когда частица излучения проникает в толщу вещества, и в этот момент она начинает взаимодействовать с электронной оболочкой атомов вещества. Энергия квантов излучения в основном преобразуется в энергию квантов колебания решетки вещества. Однако небольшая доля поглощенной энергии высвечивается. При этом число сцинтилляционных фотонов пропорционально поглощённой веществом энергии. Коэффициент пропорциональности называют световыходом. Он определяется количеством фотонов на один МэВ и зависит от структуры вещества, из которого состоит сцинтиллятор. Также важной характеристикой сцинтиллятора является время высвечивания, которое характеризует длительность процесса высвечивания. В современных экспериментах по физике высоких энергий важно, чтобы время высвечивания было как можно меньше. Это связано с тем, что при достаточно больших значениях времен высвечивания становится существенным шум наложения от фоновых событий. Кристалл CsI(Tl) является распространенным сцинтиллятором, так как он обладает достаточно высоким световыходом (55 фотонов/кэВ), низкой ценой производства, относительно малым временем высвечивания (1 мкс).

### **Источник ионизирующего излучения**

Для регистрации отчетливого сцинтилляционного сигнала нужно выбрать подходящий источник ионизирующего излучения. Требования, предъявляемые к нему, состоят в том, что энергия, испускаемая источником должна быть достаточно большой (от нескольких сотен кэВ). Наиболее распространённые из них это Am-241(59,5 КэВ), Co-60(1,173 МэВ, 1,332 МэВ), Cs-137(662 КэВ). Максимальной энергией излучаемых фотонов обладает Co-60, однако он излучает два фотона с разными, но довольно близкими энергиями. Причем интенсивности этих линий примерно одинаковы, поэтому в качестве источника был выбран Cs-137(Рис. 1).

Данный источник помимо квантов испускает ещё и бета частицы. Для текущего эксперимента необходимо, чтобы только фотоны попадали на сцинтиллятор, поэтому кристалл оборачивают в алюминиевую оболочку,

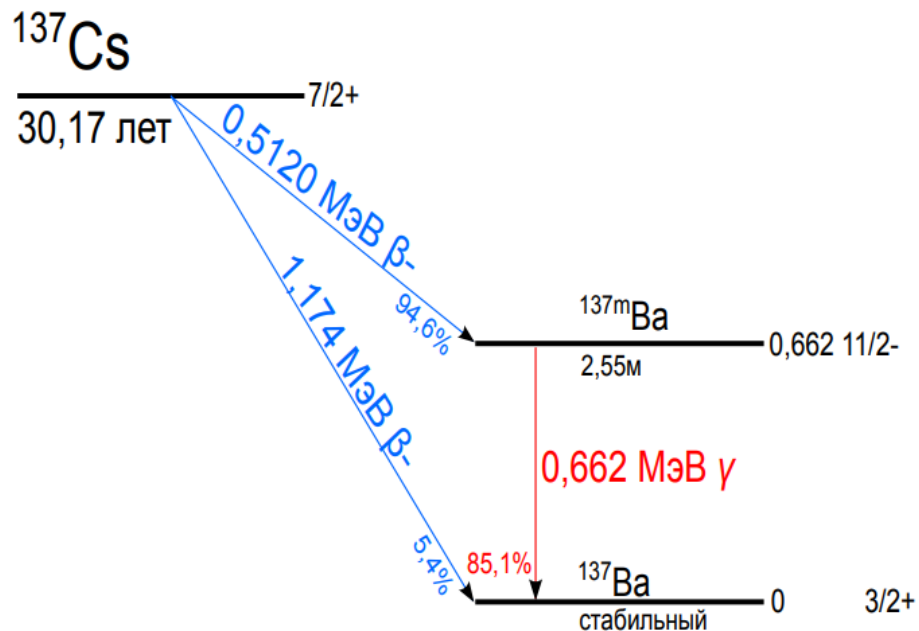


Рис. 1. Схема излучения Cs-137

проницаемую для квантов и непроницаемую для бета-излучения.

### ФЭУ

Чтобы дальше исследовать высвечиваемые фотоны, необходимо иметь устройство, которое преобразует фотоны в электрический сигнал. В качестве такого устройства могут выступать фотодиоды или фотоэлектронный умножитель (Рис. 2). Поскольку нужно будет впоследствии обрабатывать электрический сигнал, то преобразователь должен обладать высоким

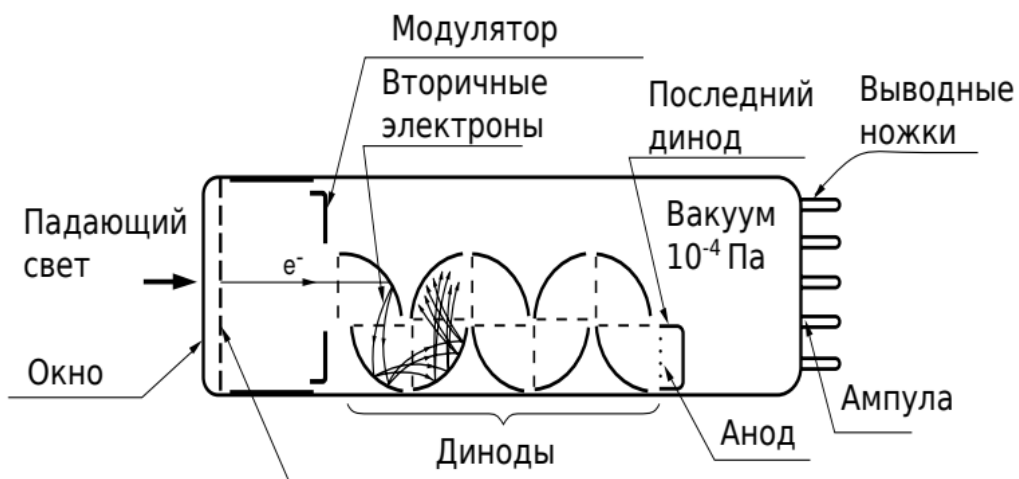


Рис. 2. Принципиальная схема фотоэлектронного умножителя [2]

коэффициентом усиления сигнала. Поскольку у фотодиодов нет усиления, то для их использования в качестве преобразователя нужно к ним добавлять зарядово-чувствительный предусилитель. В нашей работе в качестве фотоприемника используется ФЭУ, поскольку он позволяет значительно усилить световой импульс с кристалла и, таким образом, наблюдать выраженную форму импульса тока. В данной работе использовалось два различных ФЭУ. Для дальнейшей работы необходимо уделить значительное внимание устройству и принципу работы ФЭУ.

Фотоэлектронный умножитель – это электронное устройство, которое преобразует фотоны в электронный сигнал, который усиливается в определённое число раз.

ФЭУ включает в себя:

- 1) Фотокатод. За счёт явления фотоэффекта фотоны, падающие на поверхность фотокатода, способны с некоторой вероятностью выбить из него фотоэлектрон. Эта вероятность называется квантовой эффективностью фотокатода и является функцией от длины волны падающего фотона. Причём эта функциональная зависимость определяется материалом фотокатода. Следовательно, важно найти такую комбинацию длины волны и материала, для которой вероятность выбивания фотоэлектрона будет максимальной.
- 2) Диноды. Это электроды, при попадании на которые электрон выбивает из них несколько вторичных электронов. Это есть проявление вторичной эмиссии. К динодам подводится напряжение, причём оно увеличивается от динода к диноду. Это позволяет направлять вновь образованные вторичные электроны на одном диноде к следующему.
- 3) Пространство внутри ФЭУ. Внутри камеры ФЭУ создаётся вакуум, в котором эмитированные электроны ускоряются под действием электрического поля.

- 4) Анод. В конце концов, электроны, полученные последовательным умножением на динодах, достигают анода, с которого импульс перемещается дальше по электрической цепи вплоть до оцифровщика.

Основной характеристикой ФЭУ является коэффициент усиления. Для современных моделей он достигает порядка  $10^6$ –  $10^8$ .

## Практическая часть

### Экспериментальная установка

Принцип работы экспериментальной установки (Рис. 3) заключается в следующем. В светонепроницаемом ящике имеется отсек, куда встраивается

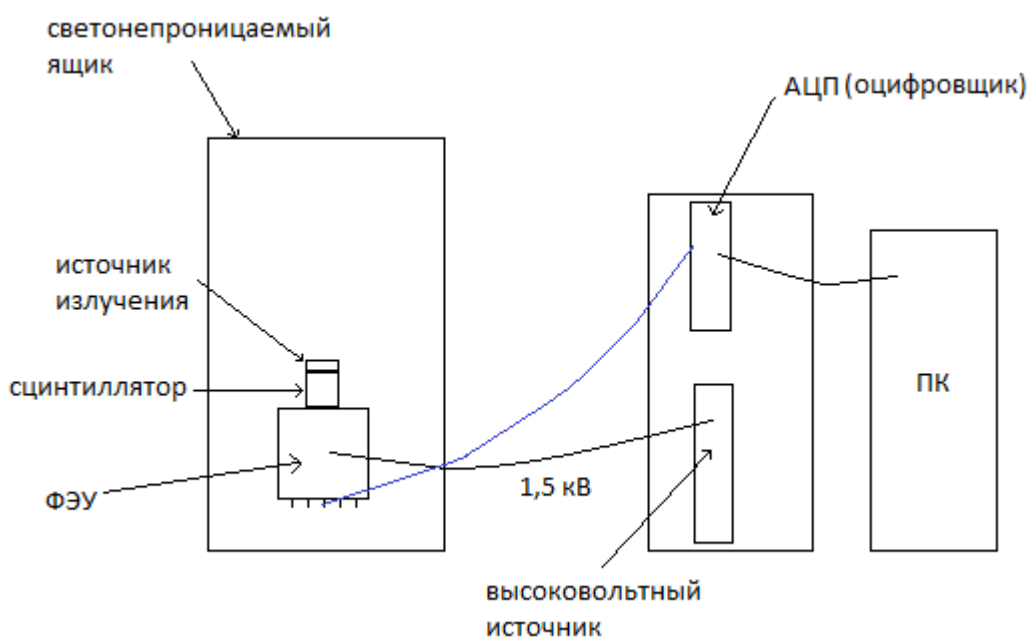


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

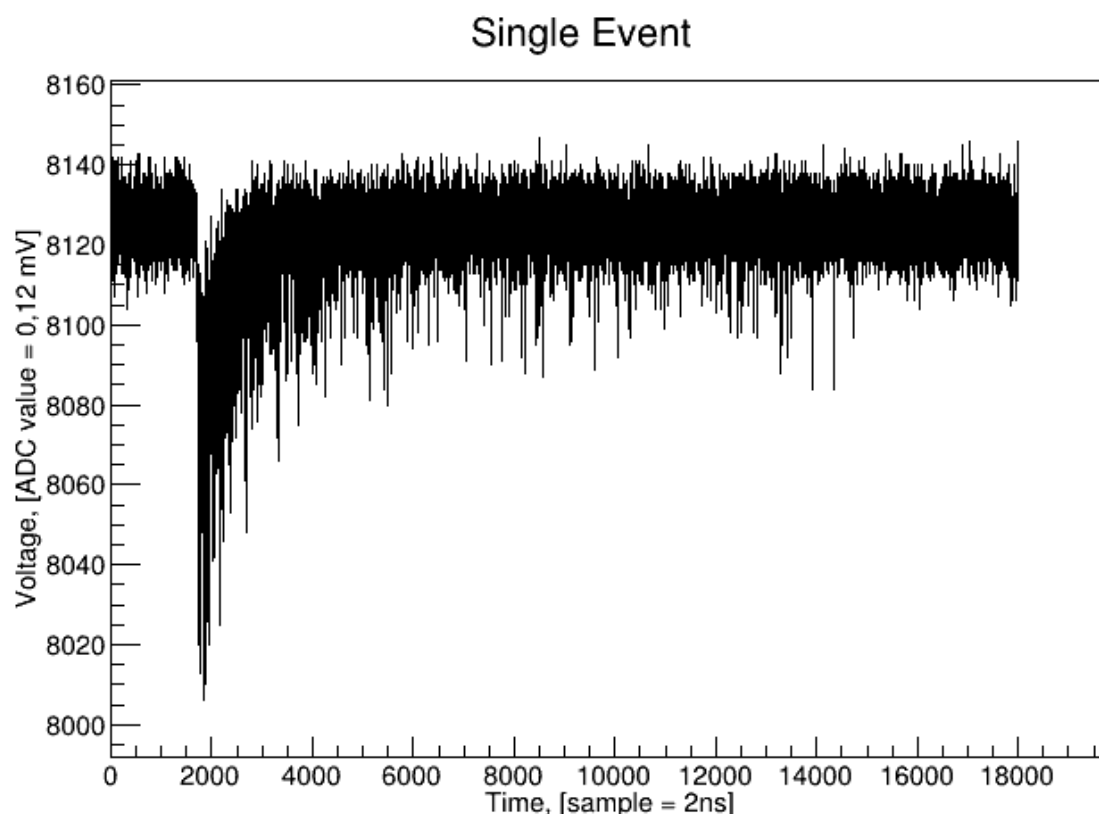
ФЭУ. В ящике поверх окна ФЭУ помещается сцинтилляционный кристалл. На кристалл кладётся источник ионизирующего излучения. В самом ящике предусмотрена система безопасности, которая при открытии дверки резко снижает напряжение. Это связано с тем, что при открытии дверки ящика на ФЭУ попадает много света, и если при этом на ФЭУ будет высокое



напряжение, то он может сломаться. С высоковольтного источника на ФЭУ подаётся высокое напряжение 1,5 кВ. С выводных ножек ФЭУ сигнал идёт на АЦП, преобразуется в цифровой и затем передаётся на компьютер для дальнейшей обработки. Программное обеспечение, с помощью которого обрабатываются данные, было написано на языке программирования C++.

### **Обработка экспериментальных данных**

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) получает на вход аналоговый сигнал с ФЭУ и на выходе формирует цифровой сигнал, который записывается в бинарном формате в память компьютера. Наиболее важной характеристикой АЦП является его разрешение – объём информации, соответствующий одному измерению. Входное сопротивление АЦП равно 50 Ом. Одиночный сигнал представляет собой множество точек (Рис. 4), записанных через одинаковые промежутки времени, которые имеют смысл



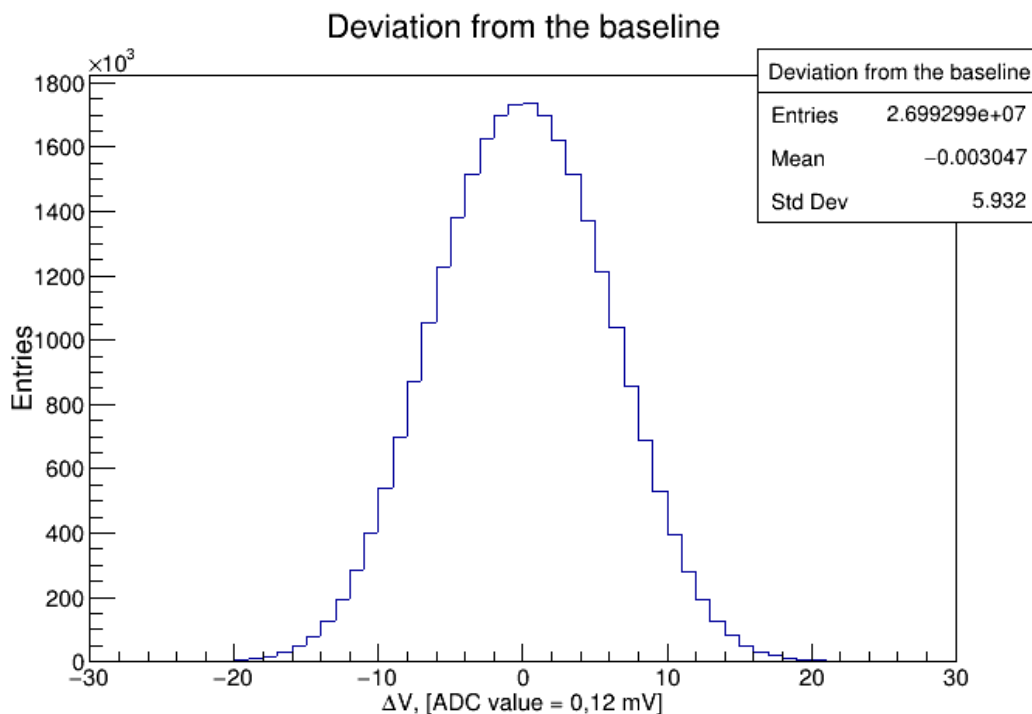
**Рис. 4. График одного события**

падения напряжения на входном сопротивлении в соответствующие моменты времени. Будем называть один такой сигнал событием. Длина

события – это количество точек в одном сигнале – величина пропорциональная временной длительности сигнала. Идея обработки заключается в том, чтобы рассмотреть большую выборку событий, получить из них некоторое усреднённое событие и аппроксимировать данное событие некоторой функцией.

Прежде чем получить усреднённое событие нужно понять, как анализировать одно отдельное событие. Для того, чтобы началась запись данного события выставляется так называемое триггерное значение, при достижении которого происходит запись. Причём можно выставлять длину события в %, которая будет предшествовать триггеру. Вдоль одной из осей (вертикальной) откладываются значения напряжения. Напряжение можно рассматривать как потенциал, а потому важны не абсолютные значения напряжения, а значения относительно некоторого выбранного нулевого уровня. Поскольку в претриггерной части события можно считать, что записывается только шум, то естественно в качестве нулевого уровня напряжения (baseline) взять среднее значение по некоторому промежутку из этой части. Например, по промежутку от начала сигнала до половины времени триггера. Так можно быть уверенным, что не затрагивается часть сигнала с ФЭУ.

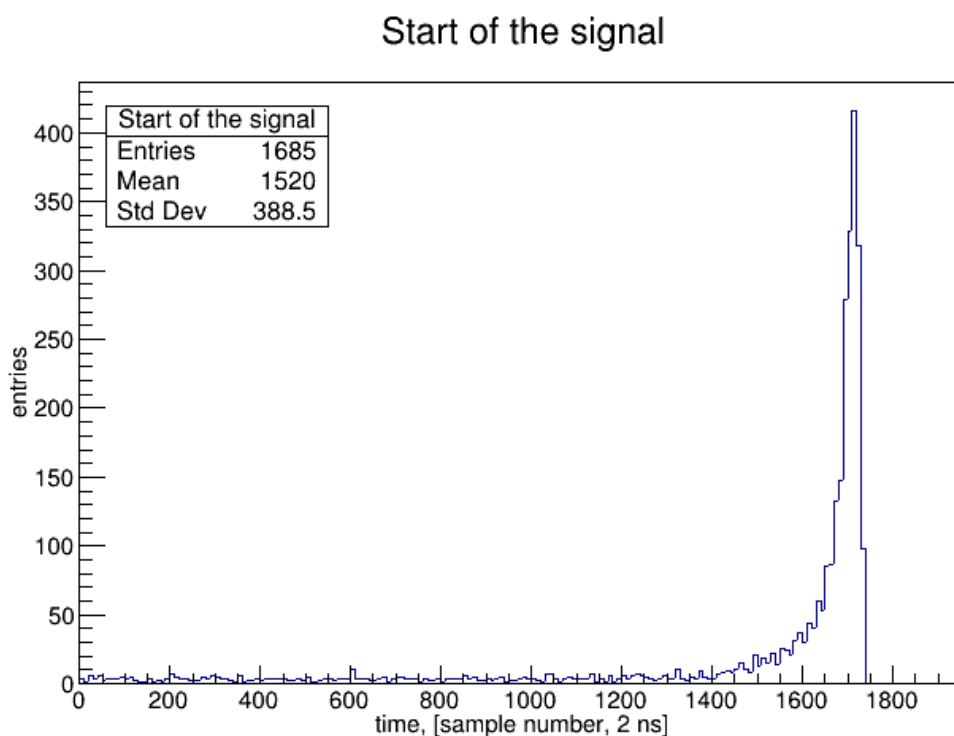
Теперь рассмотрим ещё одну характеристику события, необходимую при усреднении событий, которая называется стартом (началом) импульса. Эта величина описывает момент, когда импульс с ФЭУ достигнет определённого значения. Чтобы отличить импульс с ФЭУ от шума, поступим следующим образом. Будем считать, что отклонения значений напряжения шума от линии baseline распределены по Гауссу (Рис. 5) и в соответствии с этим получим значение среднеквадратичного отклонения шумов ( $\sigma$ ) для того же промежутка, где вычислялся baseline. Само значение, характеризующее старт импульса будем принимать равным  $k \cdot \sigma$ , где  $k$  – некоторое положительное число. При сильно низких значениях  $k$  мы вместе с импульсами с ФЭУ будем учитывать множество шумовых импульсов. При



**Рис. 5. Распределение отклонений значения напряжения от нулевого уровня**

очень высоких значениях  $k$  мы будем урезать значительную длину начала импульса, или некоторые импульсы с ФЭУ вообще не будут учитываться. В связи с этим рационально брать  $k$  в промежутке от 3 до 5. К примеру, для  $k = 3$  учитываются только 0,2 % шумовых импульсов.

Проанализировав все события из выборки, построим гистограмму распределения положения старта на временной оси (Рис. 6). Можно наблюдать, что старт импульса большинства событий находится в некотором



**Рис. 6. Распределение времён начала импульса**

диапазоне времени. Для остальных событий старт импульса расположен раньше, но триггер срабатывает в момент времени 1800 условных единиц (sample = 2 ns). С связи с этим, можно считать, что для таких событий старт импульса обусловлен случайным достаточно большим отклонением шума, и значит эти события не характеризуют импульс с ФЭУ и не могут учитываться при построении усреднённого события.

Теперь примем во внимание то, что фотоны одной и той же энергии, испускаемые источником, могут передавать разное количество энергии сцинтиллятору. Необходимо ввести ещё один параметр события – интеграл импульса. Данная величина численно равна площади фигуры ограниченной графиком события и линией baseline. Имеется прямая связь между этой величиной и энергией, передаваемой от фотона сцинтиллятору.

Построив гистограмму распределения интеграла импульса по выборке событий (Рис. 7), можно увидеть, что справа имеется пик, очень близкий к нормальному распределению. Такой пик называется фотопиком. Он

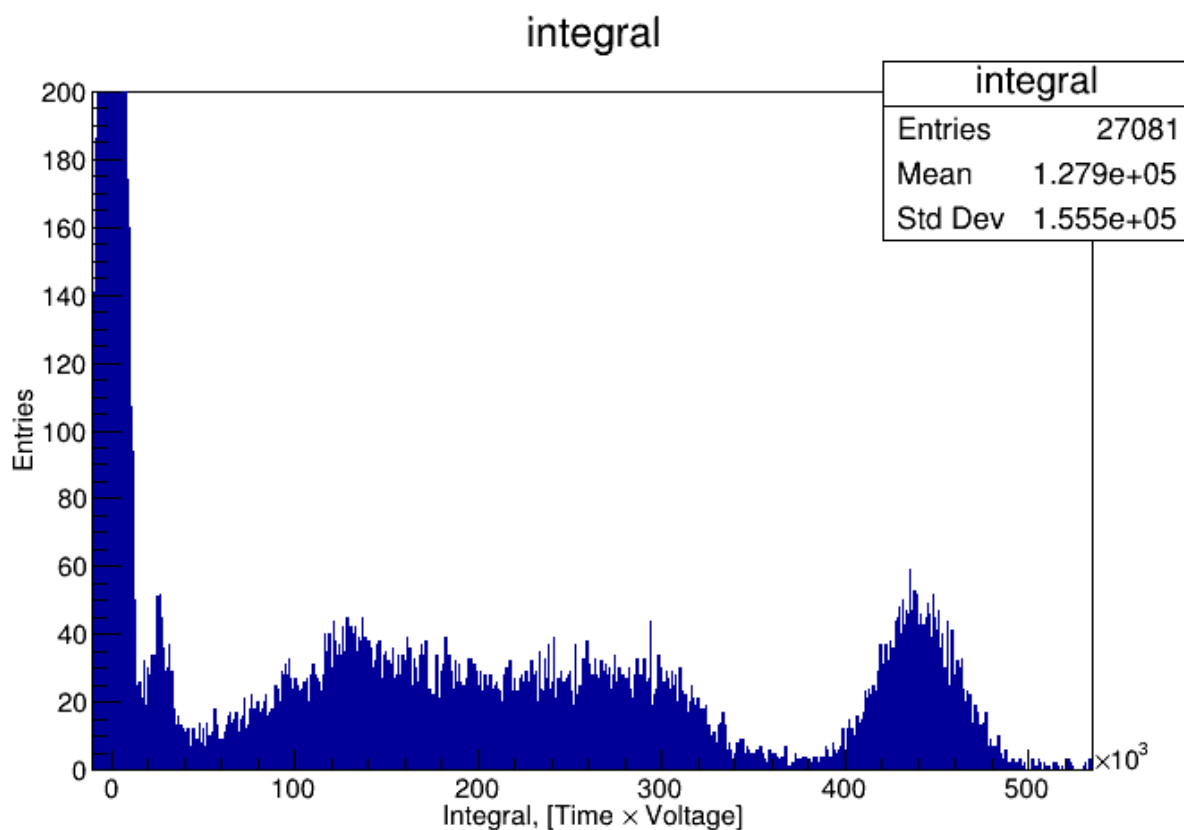
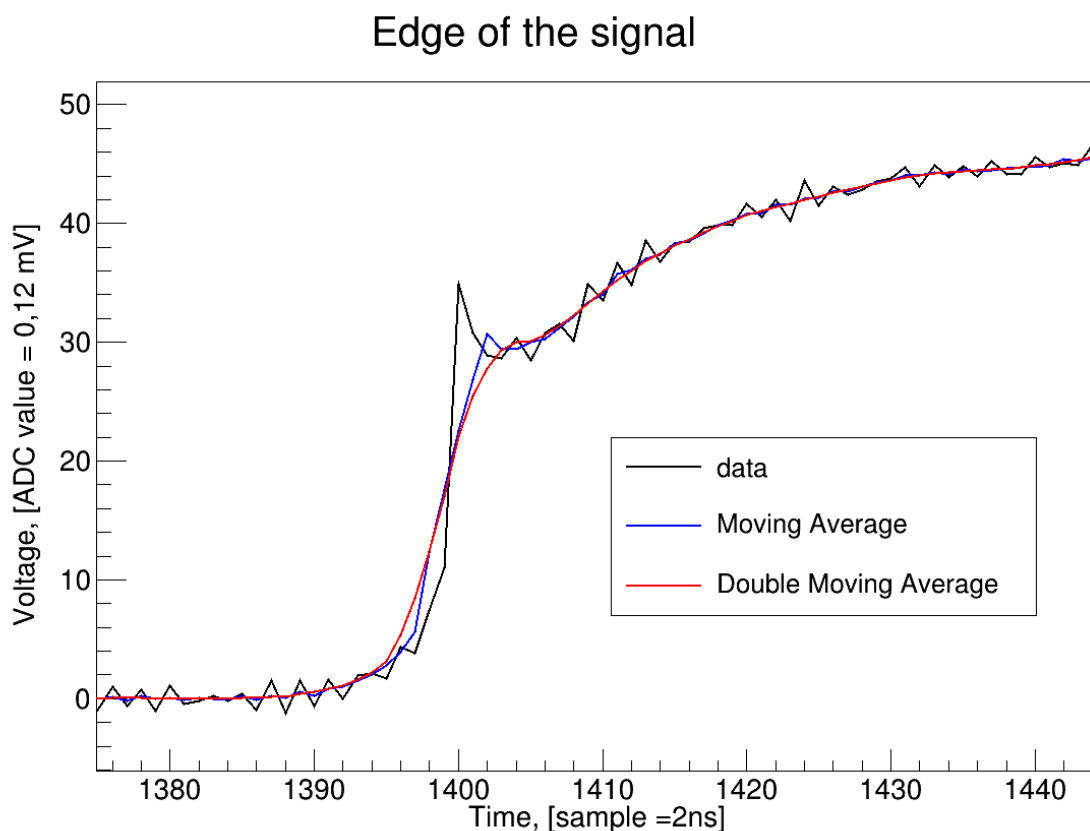


Рис. 7. Распределение значений интеграла импульса

характеризует те фотоны с источника, которые полностью отдают свою энергию сцинтилятору. Импульс, порождаемый именно такими фотонами интересен для дальнейшей обработки.

Наконец, имея условия, наложенные на старт и интеграл импульса события, построим усреднённое событие. Для этого совместим графики всех подходящих под условия событий так, чтобы старты их импульсов оказались в одной временной точке. Затем, пробегаясь вдоль временной шкалы, каждой временной точке сопоставим значение, равное среднему арифметическому значений наложенных графиков в данной точке (Рис. 8).



**Рис. 8. Граница усреднённого импульса**

Можно видеть, что данный график имеет рудимент (скачок) около момента времени 1400 условных единиц (sample = 2 ns). Он связан с неидеальностью метода усреднения. Следует применить операцию бегущего среднего.

Присутствует тенденция, что при кратном применении данной операции рудимент становится менее выраженным. Будем аппроксимировать усреднённый импульс функцией:  $\alpha \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} + (1 - \alpha) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} - \beta \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}} - (1 - \beta) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau_4}}$ . За нарастание импульса отвечают времена  $\tau_3$  и  $\tau_4$ , а за убывание –  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Далее представлены графики импульсов (Рис. 9-12), полученных для двух ФЭУ. Красной линией на графиках является функция, полученная в результате аппроксимации.

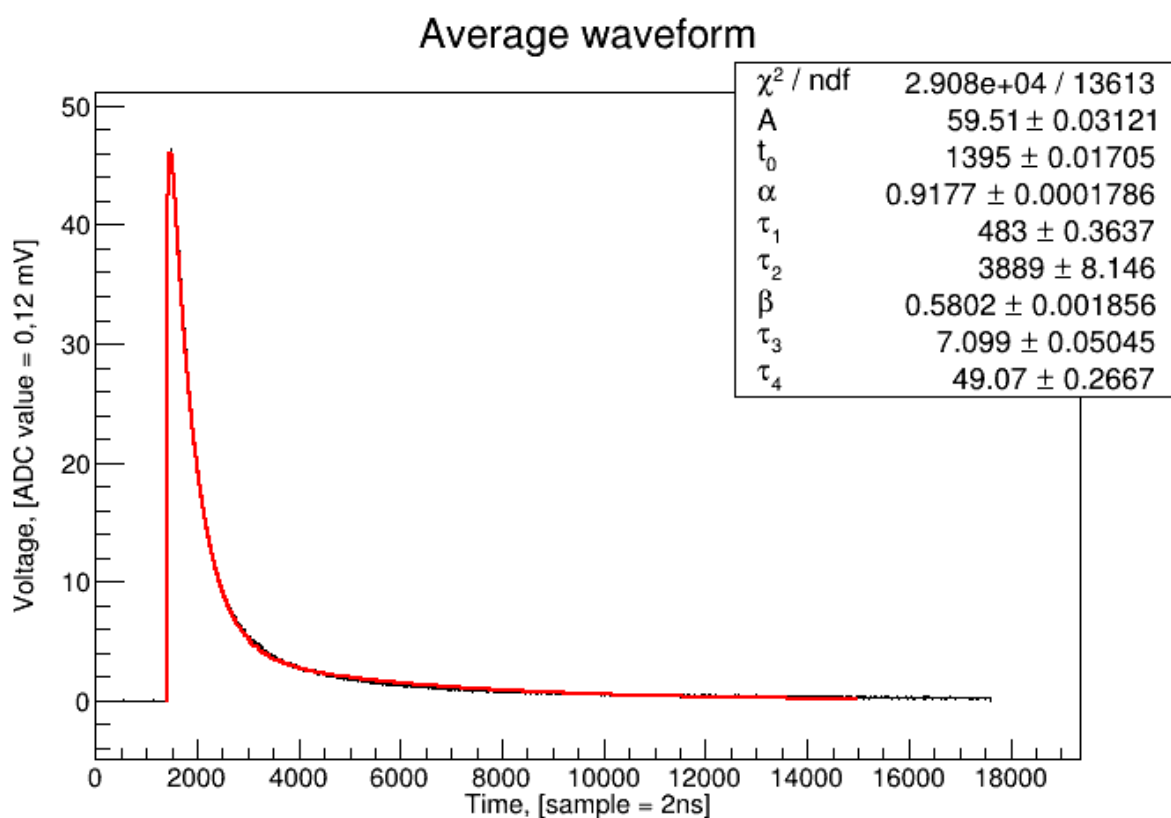


Рис. 9. Импульс с ФЭУ Hamamatsu R3256

### Average waveform

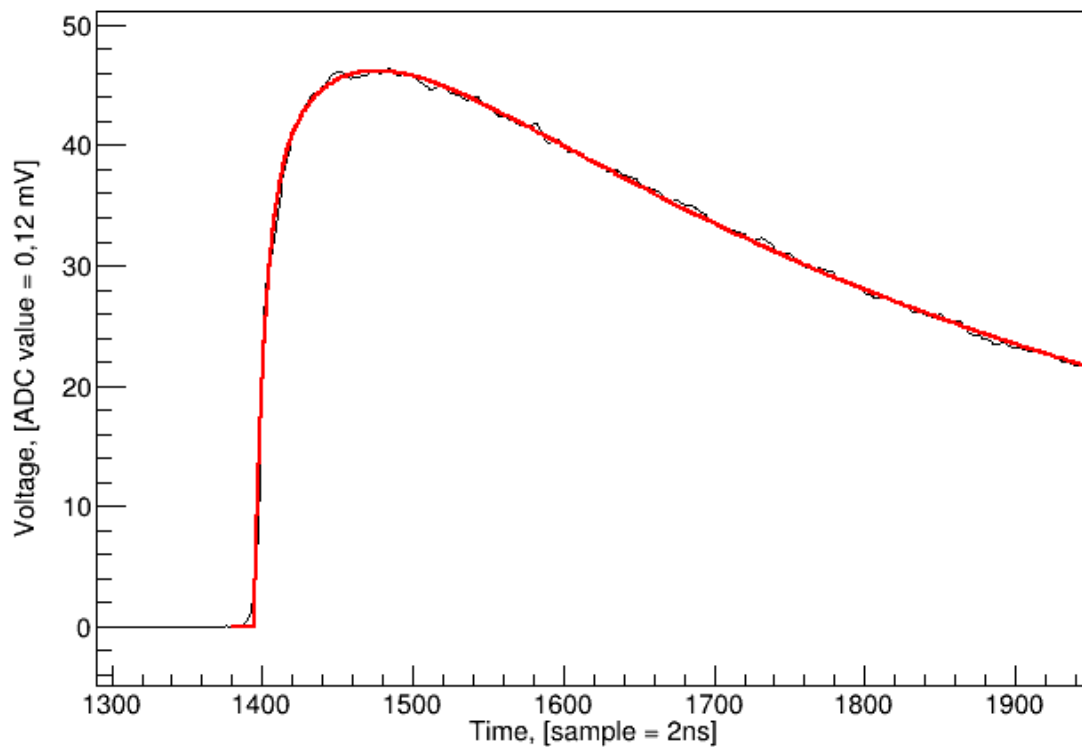


Рис. 10. Импульс с ФЭУ Hamamatsu R3256 в увеличенном масштабе

### Average waveform

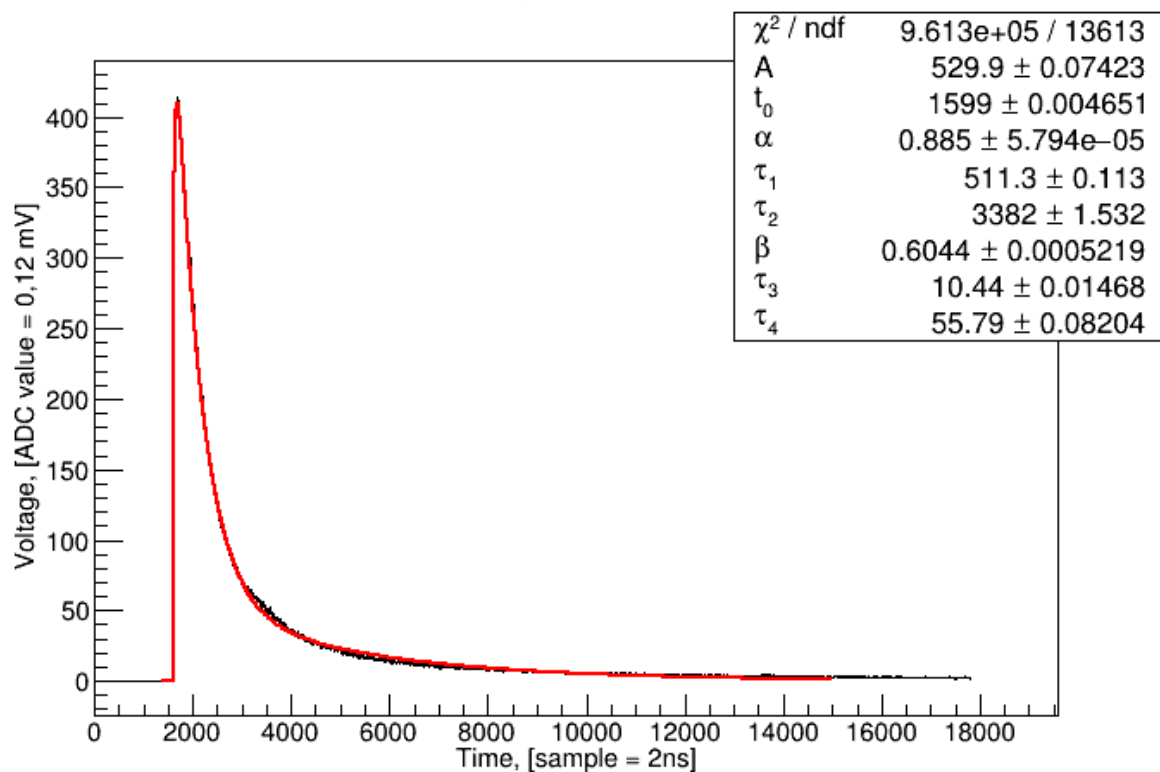
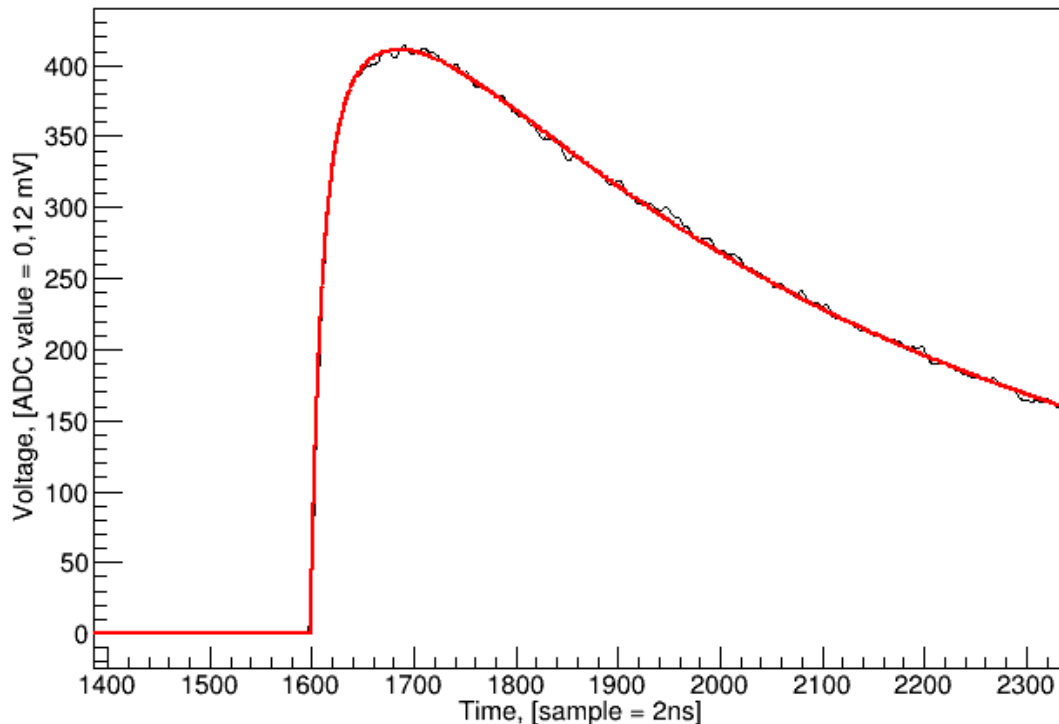


Рис. 11. Импульс с ФЭУ Hamamatsu R1847S

## Average waveform



Для обоих ФЭУ полученные зависимости довольно близки к реальности.

Однако у графика для второго ФЭУ имеется некоторое отклонение от выбранной функциональной зависимости. Это связано с необычным поведением второго ФЭУ.

### Заключение

Были выполнены все поставленные задачи. Результаты эксперимента довольно хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований по данной теме. Полное время нарастания импульса для обоих ФЭУ оказалось в районе 150 нс. Амплитуда импульса со второго ФЭУ в 9 раз больше, чем с первого, и это близко согласуется с тем, что коэффициент усиления второго ФЭУ в 10 раз больше.

Рис. 12. Импульс с ФЭУ Hamamatsu R1847S в увеличенном масштабе



## **Список использованной литературы**

1. Р. Ю. Шендрик Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Введение в физику сцинтилляторов – 1 – учеб. пособие – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 110 с.
2. Р. Ю. Шендрик, Е. А. Раджабов Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Введение в физику сцинтилляторов – 2 – учеб. пособие – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 95 с.