

**Объединённый институт ядерных исследований
Лаборатория физики высоких энергий**

Овчаренко
Егор Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК И СБОРА ДАННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ
ДЕТЕКТОРА ЧЕРЕНКОВСКИХ КОЛЕЦ ЭКСПЕРИМЕНТА СВМ**

Специальность 01.04.01 -
Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. С.Г. Белогуров

Дубна - 2017

Содержание

Введение	4
1 Эксперимент CBM на FAIR	5
1.1 Экспериментальная установка CBM	5
1.1.1 Вершинный микродетектор MVD	5
1.1.2 Кремниевая трекингловая система STS	5
1.1.3 Детектор черенковских колец RICH	6
1.1.4 Мюонная система MUCH	6
1.1.5 Детектор переходного излучения TRD	6
1.1.6 Время-пролётный детектор TOF	6
1.1.7 Электромагнитный калориметр ECAL	6
1.1.8 Детектор PSD	6
2 Обзор существующих детекторов черенковских колец	7
3 Геометрия	8
4 Результаты	9
4.1 Время-цифровой преобразователь	9
4.2 Обработка сигнала с детектора	12
4.2.1 Бестриггерная передняя электроника	13
4.2.2	14
4.2.3 FLES	15
4.2.4 Построение события	15
4.2.5 LeadingEdgeDiff	16
4.3 Исследование спектросместителя с помощью флюориметра	18
4.4 Прямые измерения временного профиля спектросместителя	20
4.4.1 Прямые фотоны	20
4.4.2 Фитирование WLS_diff	21

Заключение	22
Список литературы	23

Введение

Глава 1

Эксперимент CBM на FAIR

1.1 Экспериментальная установка CBM

1.1.1 Вершинный микродетектор MVD

1.1.2 Кремниевая трекиговая система STS

From CBM STS TDR:

The detector system's task is to measure the trajectories and momenta of charged particles originating from the interactions of heavy-ion beams with nuclear targets. Up to 1000 charged particles are produced per interaction, at rates up to 10 MHz to enable CBM physics with rare observables. The track reconstruction has to be achieved with 95% efficiency and a momentum resolution $\Delta p/p = 1\%$. These requirements can be fulfilled with a tracking system of 8 low-mass layers of silicon microstrip sensors located at distances between 30 cm and 100 cm downstream of the target inside the magnetic dipole field. The sensors are mounted onto lightweight mechanical support ladders and read out through multi-line micro-cables with fast self-triggering electronics at the periphery of the stations where cooling lines and other infrastructure can be placed. The micro-cables will be built from sandwiched polyimide-Aluminum layers of several $10\mu m$ thickness. The microstrip sensors will be double-sided with a stereo angle of 7.5° , a strip pitch of $58\mu m$, strip lengths between 20 and 60 mm, and a thickness of $300\mu m$ of silicon. According to the CBM running scenario the maximum non-ionizing dose for the sensors closest to the beam line does not exceed $10^{14} n_{eq} cm^{-2}$. The STS is operated in a thermal enclosure that keeps the sensors at a temperature of about $-5^\circ C$. The heat dissipated in the read-out electronics is removed by a CO_2 cooling system. The mechanical structure of the detector system including the service and signal connections is designed such that single detector ladders can

be exchanged without disconnecting and removing more than one detector station.

1.1.3 Детектор черенковских колец RICH

1.1.4 Мюонная система MUCH

1.1.5 Детектор переходного излучения TRD

1.1.6 Время-пролётный детектор TOF

1.1.7 Электромагнитный калориметр ECAL

1.1.8 Детектор PSD

Глава 2

Обзор существующих детекторов черенковских колец

Глава 3

Геометрия

Глава 4

Результаты

4.1 Время-цифровой преобразователь

На рисунке 4.1 приведена условная схема функционирования одного канала ВЦП, дающая представление о причинах сдвига калибровочной таблицы и объясняющая минус в формуле расчёта полного времени.

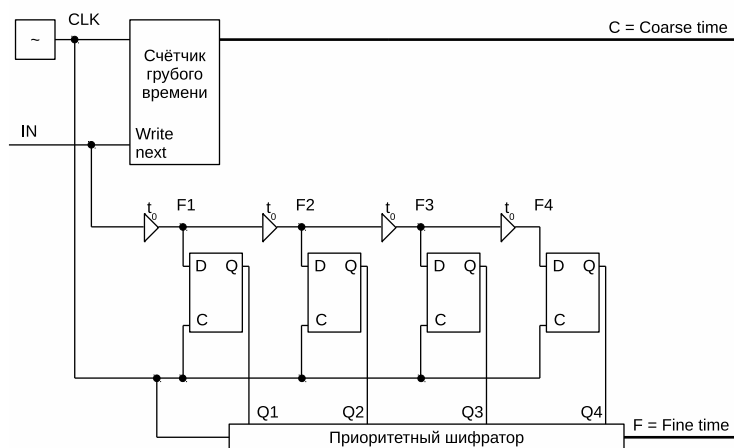


Рис. 4.1: Структурная схема одного канала ВЦП.

Имеется тактовый генератор частотой 200 МГц. Период такого генератора — 5 нс. Он управляет счётчиком грубого времени. Каждые 5 нс значение грубого времени увеличивается, но не выдаётся на выход. Счётчик точного времени выполнен по технологии Tapped delay line

Timing diagram for the proposed 5-tap FIR filter. The diagram shows the clock (CLK) and data inputs (IN, F1, F2, F3, F4) and outputs (Q1, Q2, Q3, Q4, F). The coarse time T_c is the period of the clock. The fine time T_f is the time between the rising edges of the clock. The delay t_0 is the time between the rising edges of the clock and the output signals. The output signals are labeled with their values: Q1=1, Q2=1, Q3=1, Q4=0, and F=3. The formula for the full time T_{full} is given as $T_{full} = T_c - T_f = C*5Hc - F*t_0$.

Отличительная особенность такого шифратора — индифферентность к значению на входах $j < i$ при наличии логической единицы на входе i . Иными словами имеет значение только старший бит, а младшие иг-

норируются. (У обычного шифратора только один вход должен иметь единицу на входе). Шифратор преобразует номер последнего переключившегося триггера в число, обозначающее значение точного времени. Таким образом точное время должно вычитаться из грубого времени потому что линия задержки измерила время между моментом прихода входного сигнала (start) и моментом прихода следующего отсчёта грубого времени (stop).

Приведена наиболее понятная схема, фактическая же реализация отличается. Например, в качестве элемента задержки может выступать сам триггер. Тогда выход i -го триггера напрямую соединяется со входом $(i+1)$ -го триггера. Используемые нами ВЦП в ППВМ имеют в качестве элемента задержки ячейку матрицы, запрограммированную как полный сумматор.

ВЦП разрабатывался так, чтобы интервал 5 нс между двумя отсчётами грубого счётчика разбивался на 512 элементов. Тогда было бы достаточно 9-битного шифратора для формирования значения точного времени. Из-за того, что существует также и задержка сигналов в проводниках ненулевой длины, реально таблица может быть сдвинута. Например значение точного времени 0 должно означать, что входной фронт пришёл одновременно с фронтом от тактового генератора (точнее совсем чуть-чуть раньше). Если учитывать задержку в проводниках на приведённой условной схеме, то получится, что команда считывания шифратору идёт дольше, чем до первого триггера. В таком случае никогда не будет принято нулевого значения и 9 бит для хранения точного времени будет недостаточно. По данной причине сообщение, несущее точное время, имеет длину 10 бит, а все калибровочные таблицы имеют правую границу на значении 1024.

Пример таблицы калибровки точного времени представлен в виде графика на рисунке 4.3. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах.

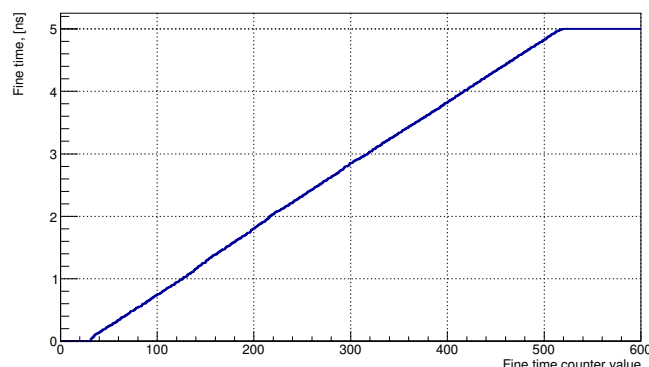


Рис. 4.3: Пример таблицы калибровки точного времени.

4.2 Обработка сигнала с детектора

Задача: дать общую картину — детектор, передняя электроника, передающая электроника, ЭВМ. Затем указать, что вот типа электроника с внешним триггером, а вот самотриггирующаяся электроника. Далее переходим к free-running DAQ.

Рассмотрим общую последовательность обработки сигнала детектора частиц. Источником является некоторое детектирующее устройство (или просто детектор). В зависимости от типа детектируемых частиц и внешних условий — радиационная среда, температура, частота регистрации — это может быть фотодиод, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), полупроводниковый детектор, микроканальная пластина, газовый электронный умножитель, и т.д. Все эти детекторы обладают таким общим свойством, что выходной сигнал, несущий информацию о зарегистрированной частице, это относительно слабый токовый импульс. Для того, чтобы выполнять дальнейшую обработку этого сигнала в ЭВМ его необходимо оцифровать. В связи с этим обрабатывающую электронику условно можно разделить на переднюю и остальную. Основная задача передней электроники — оцифровать выходной аналоговый сигнал детектирующего устройства при необходимости предварительно его усилив и отфильтровав. Передача аналогового сигнала затруднена, поэтому его обработка и оцифровка обычно выполняется как можно ближе к месту, где этот сигнал вырабатывается, т.е. непосредственно на детекторе. В простом случае последующие слои электроники концентрируют и передают оцифрованные сигналы со многих каналов передней электроники. В более сложном случае возможна какая-то аппаратная обработка

оцифрованных сигналов, например архивация или фильтрация с целью уменьшения потока данных.

Разработан целый ряд подходов к оцифровке сигналов с детекторов. Каждый из них лучше всего подходит к определённому детектору, однако возможно применение методов, разработанных для одного детектора, для оцифровки сигналов с другого детектора. Перечислим лишь некоторые из них. Если не вдаваться в подробности реализации, можно выделить следующие способы: регистрация момента времени прихода фронта, регистрация амплитуды сигнала, непрерывное семплирование (ещё?). Широко применяются комбинации перечисленных способов — регистрация амплитуды сигнала вместе с моментом времени прихода переднего фронта, регистрация моментов времени переднего и заднего фронта без захвата амплитуды.

Если необходимо предварительное усиление, то применяют один из двух типов усилителей — зарядочувствительный усилитель либо ????. В силу устройства зарядочувствительный усилитель является также формирователем (шейпером). Любая электроника подвержена шумам, поэтому для подавления шумов сигнал обычно предварительно проходит фильтр нижних частот, эффективно отрезающий частоты выше некоторого значения. (Что-то сказать про шейпирование и его неизбежность и влияние на временные характеристики) Ещё один способ борьбы с шумами — фильтрация по амплитуде, т.е. установление некоторого порога по напряжению, ниже которого сигнал игнорируется.

4.2.1 Бестриггерная передняя электроника

Рассмотрим схему, когда аналоговый импульс с детектора обрабатывается электроникой, регистрирующей момент времени прихода переднего фронта. Любой сигнал переключается за некоторое ненулевое время, поэтому необходимо определить точку, обозначающую фронт. Для этого применяют дискриминатор — прибор, вырабатывающий логический “0”, когда входной сигнал ниже установленного порога, и логическую “1”, когда входной сигнал выше установленного порога. Таким образом точка пересечения сигнала и порога — точка, условно обозначающая момент времени прихода сигнала. На выходе дискриминатора получается логический сигнал, который необходимо преобразовать в цифровой с помощью время-цифрового преобразователя. На выходе ВЦП уже будет цифровой сигнал, а не логический. Далее могут работать концентраторы данных и какие-то ещё платы, обеспечивающие приём данных в ЭВМ. Таким принимающим устройством может быть обычный сетевой интерфейс, работающий с Ethernet. В СВМ это не так, поэтому нужен

FLIB.

4.2.2

Рассмотрим систему считывания и сбора данных “традиционного” эксперимента.

Каждый канал передней электроники имеет выходной буфер, куда по принципу FIFO складываются оцифрованные входные сигналы. В экспериментальной установке присутствуют детекторы, вырабатывающие триггер — сигнал, который заводится (условно) на каждый канал считывания, и говорит о том, что произошло интересное событие, которое необходимо сохранить для последующей обработки. Данный подход имеет свои причины. Во-первых, до недавнего времени физические эксперименты не требовали высоких частот регистрации — выполнение физической программы при относительно низких частотах первичного взаимодействия было осуществимо в разумные сроки. Во-вторых, многие регистрирующие приборы имеют заметное “мёртвое время” — время, в течение которого прибор не может обрабатывать входные сигналы. Следовательно, если канал регистрирует ложный входной сигнал, велика вероятность того, что будет пропущен полезный сигнал.

С развитием электроники “мёртвое время” уменьшалось. Более того, возможность применения принципиально другой считывающей электроники, как например чисто временной канал, реализованный в ППВМ, для обработки сигналов с МА ФЭУ в СВМ RICH, исследуемая в данной работе, позволяет на порядки снизить “мёртвое время” и повысить точность регистрации временной отметки в ущерб полноте информации.

(Сюда подмешивается секция 2.2)

В СВМ планируется использование программного триггера. Это означает, что для того, чтобы принять решение, сохранять принятые данные или нет, необходимо выполнить полную реконструкцию события, включая реконструкцию треков, которая является высоко-затратной задачей. Рассматривается также возможность на определённых этапах работы установки использовать для выработки триггера частичную реконструкцию. Например исследуется возможность триггирования по результатам реконструкций треков только в MUCH, когда стоит задача поиска (такой-то частицы).

В “традиционном” эксперименте триггер может формироваться в результате логических операций над сигналами с нескольких детекторов, реализованных аппаратно. Такая логика работает за (масштаб времени). Реконструкция треков выполняется за гораздо большее время (на

столько-то порядков выше). По этой причине необходимо иметь не только буфер в электронике — его будет недостаточно.

(Сказать о том, что нужно хорошо настраивать пороги.)

Всё вместе привело к разработке FLES. Электроника бестриггерная, несколько уровней концентрации данных, многочисленные буферы, формирование срезов времени, построение интервалов и только после этого мы переходим к построению событий.

(Картинка, где показана схема для частичного триггера, вроде бы от Вальтера)

4.2.3 FLES

Для эксперимента СВМ был выполнен оценочный расчёт. Отправная точка — возможно сохранение 1 Гбайт/сек данных. Считается, что одно событие СВМ в среднем имеет объём 40 Кбайт. Отсюда следует, что максимальная частота первичного взаимодействия может быть 25 кГц. В стартовой конфигурации СВМ частота первичного взаимодействия равна 10 МГц, следовательно необходимо уменьшить поток данных в 400 раз. В полноценном режиме работы СВМ ожидается 25 МГц, т.е. $25 \cdot 10^6 \cdot 40 \text{ Кбайт} = 1 \text{ Тбайт/сек}$. Планируется разбить этот поток в 1 Тбайт/сек на 1000 входных каналов FLES, каждый по 1 Гбайт/сек, передающихся по 10-Гбитным оптическим каналам связи. Один входной канал FLES соответствует одному входному узлу (IN, input node) — ЭВМ с установленной платой FLIB.

4.2.4 Построение события

Тот факт, что физическая программа эксперимента СВМ подразумевает исследование очень редких явлений, для которых практически невозможно вырабатывать аппаратный триггер, привёл к решению разработать и использовать бестриггерную систему считывания. В бестриггерной системе считывания каждый канал передней электроники вырабатывает сообщение при преодолении входным аналоговым сигналом установленного порога. Получается, что электроника выдаёт для программного обеспечения непрерывный поток никак не сгруппированных сообщений, содержащих временную отметку. Для того, чтобы выполнять физический анализ, необходимо в этом непрерывном потоке выделять осмысленные группы, которые мы называем событиями. Строго говоря, задача построения событий — это одномерная задача кластеризации на оси времени с последующим отбором кластеров по некоторым критериям.

Задача также усложнена тем фактом, что электроника не может обеспечить непрерывный поток сообщений, упорядоченных по времени регистрации. Происходит группировка сообщений в так называемые DAQ-события, которые необходимы для обеспечения передачи информации, а сообщения внутри DAQ-событий могут быть упорядочены произвольно. Соответственно первый этап построения события — упорядочивание сообщений.

В данных с пучковых тестов 2014 г., для того, чтобы определить, является ли распознанная группа событием, можно использовать сигналы с детекторов пучка — пороговых черенковских счётчиков, годоскопов и др. В лабораторных данных, где выполнялись измерения с лазером, в качестве триггера можно использовать сигнал от генератора, управляющего лазером. В ситуации, когда нет дополнительной информации, как в случае полного детектора RICH в итоговом эксперименте, необходимо принимать решение о том, является распознанная группа событием, или нет, на основе исключительно информации, полученной из этой группы. Распознанный кластер может являться событием, но чаще всего будет состоять из одного сообщения — шумового хита. Следовательно можно использовать кол-во хитов в событии для подавления шумов, что особенно актуально для детектора CBM RICH, где выполняется реконструкция черенковских колец, требующая некоторого минимального числа хитов в плоскости реконструкции.

(Сначала общая идея, что в любом случае будет некоторое временное окно и все сообщения попадающие в окно формируют событие. Размеры окна — один из параметров построителя событий, которым можно играть с целью повышения эффективности.)

(А здесь можно описать предлагаемый алгоритм)

4.2.5 LeadingEdgeDiff

Один из этапов обработки данных — построение событий. В данной работе рассматривается два типа событий — сигналы от лазера и сигналы от черенковского кольца. В любом случае, событие — это структура данных, содержащая информацию о хитах, сгруппированных по времени. Каждый хит содержит, как минимум, временную отметку момента прихода переднего фронта сигнала и номер канала, который в случае CBM RICH указывает номер пикселя фоточувствительной камеры, т.е. говорит о геометрическом положении зарегистрированного фотона.

Данное исследование посвящено, в первую очередь, временным характеристикам системы считывания, поэтому в основном речь пойдёт о временных отметках.

Очевидно, что для каждого события можно построить несколько распределений, которые на большом массиве данных, т.е. на многих событиях, характеризуют систему считывания и могут быть использованы для калибровки электроники с целью повышения временного разрешения системы. Т.к. событие имеет максимальную ширину, определяемую размерами окна в алгоритме построения событий, распределения могут иметь “обрезанные хвосты”, которые, однако, невозможно избежать.

Пусть событие содержит N хитов. Введём внутри события нумерацию хитов от 0 до N . Пусть внутри события хиты упорядочены по времени, т.е. хит с временной отметкой t_0 был зарегистрирован раньше остальных, а хит с временной отметкой t_N — позже всех. Такой порядок может, например, обеспечиваться естественным образом алгоритмом построения событий. Внутри события все временные отметки зарегистрированы в разных каналах — множественные хиты в одном канале в одном событии являются признаком того, что порог дискриминатора установлен слишком низко и регистрируются шумы. Введём в рассмотрение распределение ω разностей временных отметок всех хитов, кроме первого, относительно первого, т.е. распределение

$$t_j - t_0, \text{ где } j \in [1..N].$$

Также введём распределение σ_1 всех пар временных отметок одного события, т.е.

$$t_j - t_i, \text{ где } i \in [0..N], j \in [0..N], i \neq j.$$

Очевидно, что в такой формулировке одна и та же пара временных отметок войдёт в распределение дважды с разными знаками — например, $t_1 - t_2$ и $t_2 - t_1 = -(t_1 - t_2)$. Это делает распределение симметричным, среднее значение строго равно 0, а ширина распределения чуть больше, чем в случае, когда нет дублирования информации. Введём непрерывную нумерацию каналов и примем, что в разности $t_j - t_i$ первая временная отметка была зарегистрирована каналом a , а вторая — каналом b . Введём распределение σ_2 , по сути очень похожее на σ_1 , но без дублирования информации, в котором будем учитывать только пары, у которых $b > a$.

В идеальной ситуации, если событие соответствует одной вспышке лазера или одному черенковскому кольцу, и отсутствуют факторы, размывающие время регистрации, все разницы были бы равны нулю. В качестве таких размывающих факторов можно привести, например, следующие: временные характеристики лазера, разброс геометрических путей черенковских фотонов, разброс времени прохождения электронной лавины в диодной системе ФЭУ, дребезг сигналов в передней электронике. Из-за перечисленных явлений распределение ω имеет следующую форму — (описание). Распределение σ_2 — (описание).

Среднее значение либо положение максимума распределения σ_2 можно

использовать для того, чтобы определить значение поправки для данной пары каналов. Если выполнить анализ с применением коррекций, то вид всех распределений изменится. ω сгруппируется ближе к нулю, σ_2 передвинется к нулю, а σ_1 сузится к нулю.

Представляется возможность анализировать различные области фоточувствительной камеры. Интересно группировать хиты в соответствии с тем, какой электроникой они обрабатываются. В данном анализе было введено 4 подмножества: 1 пара каналов, 16 каналов одной платы передней электроники, 64 канала одного МА ФЭУ, 256 каналов 4 МА ФЭУ, образующих площадку 2x2 МА ФЭУ в одном углу камеры. При том, что вся фоточувствительная камера на пучковых тестах имела размер 4x4 МА ФЭУ, рассматривать более 4 МА ФЭУ одновременно не имеет смысла, т.к. в прототипе были установлены различные модели МА ФЭУ, некоторые покрытые сместителем спектра, а некоторые нет.

4.3 Исследование спектросместителя с помощью флюориметра

Были проведены независимые флюорометрические измерения пара-терфениловой плёнки, нанесённой по той же технологии (dip-coating), что применяется для напыления сместителя спектра на поверхность МА ФЭУ в СВМ RICH. Измеренный временной профиль приведён на рисунке 4.4, а результаты фитирования — в таблице 4.1.

Таблица 4.1: Результаты фитирования флюорометрических измерений сместителя спектра.

τ , нс	амплитуда	амплитуда, нормированная по 2-й компоненте
1.4	1387	5.15613
3.8	269	1.00000
45.0	19	0.07063

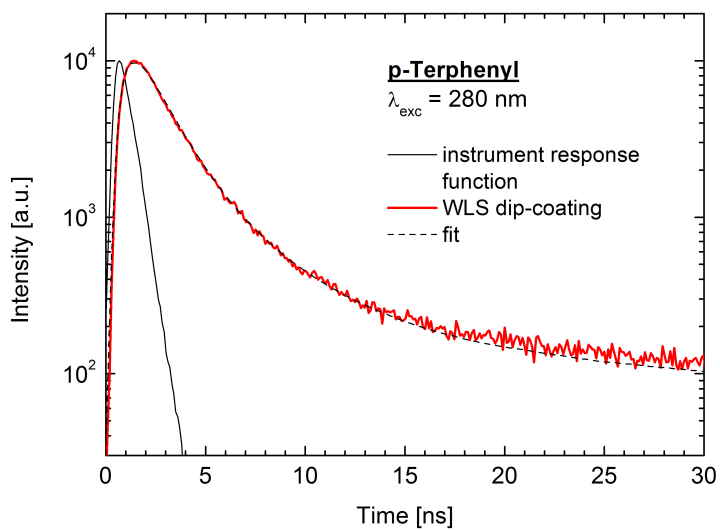


Рис. 4.4:

Данный фит неплохо воспроизводится функцией

$$f(t) = 10 \cdot (A_1 \cdot e^{-(t-1)/\tau_1} + A_2 \cdot e^{-(t-1)/\tau_2} + A_3 \cdot e^{-(t-1)/\tau_3})$$

со значениями амплитуд и времён, приведёнными в таблице 4.1. Здесь единица в скобке возле переменной t означает сдвиг графика по горизонтали на 1 нс и обусловлена разрешением измерительного прибора.

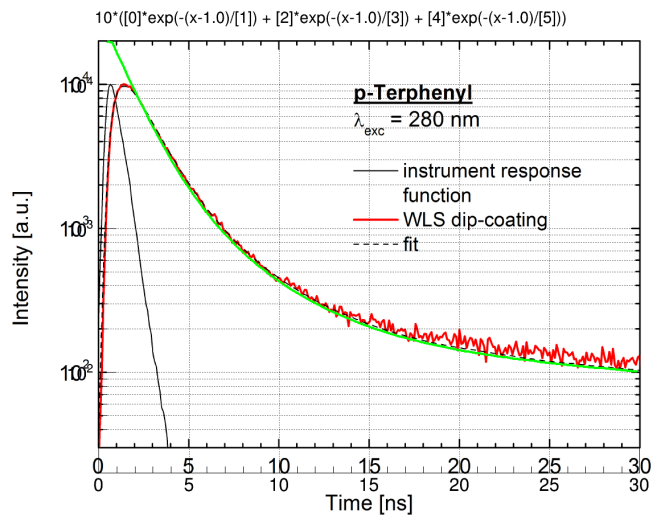


Рис. 4.5:

4.4 Прямые измерения временного профиля спектросместителя

Можно фитировать распределение WLS_on или WLS_off 4-мя компонентами, а можно фитировать их разницу WLS_diff тремя компонентами. Можно фитировать функцией с зафиксированными временами, чтобы определить амплитуды, а можно фитировать функцией, где параметрами являются и времена и амплитуды.

4.4.1 Прямые фотоны

В результате анализа экспериментальных данных были получены две гистограммы — с и без сместителя спектра. Первый этап — фитирование профиля без сместителя спектра. В результате фитирования одной экспонентой в различных диапазонах и с различными начальными условиями было получено значение временной постоянной 0.65 нс.

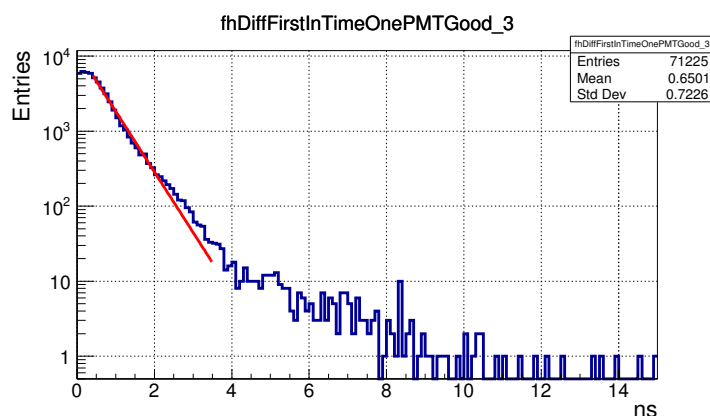


Рис. 4.6:

4.4.2 Фитирование WLS_diff

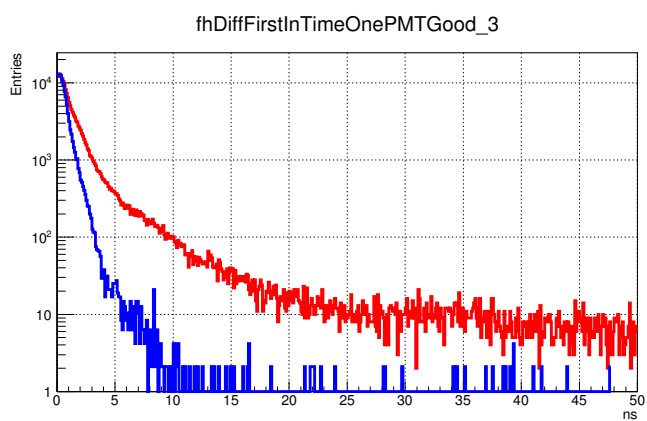


Рис. 4.7:

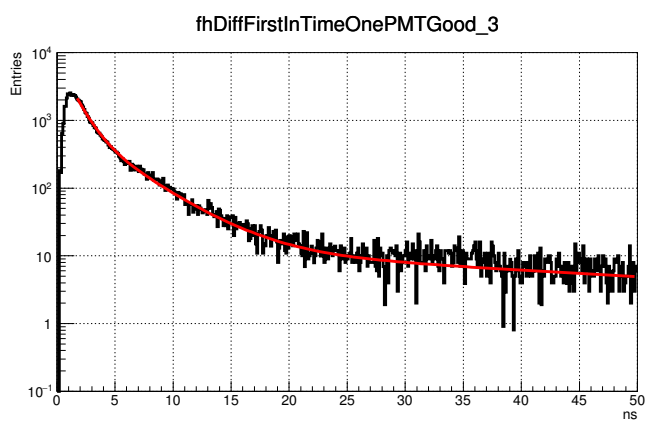


Рис. 4.8:

Заключение

Основные результаты диссертационной работы

Научная новизна результатов, полученных автором

Представление основных положений и результатов

Публикации

Список литературы

[1] bibitem1