

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

Овчаренко  
Егор Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СВОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК 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

<b>Введение</b>	<b>4</b>
0.1 Обработка сигнала с детектора . . . . .	4
0.1.1 Система считывания и сбора данных эксперимента CBM . . . . .	6
0.1.2 FLES . . . . .	6
0.2 Обзор существующих детекторов черенковских колец . . . . .	9
<b>1 Эксперимент CBM на FAIR</b>	<b>10</b>
1.1 Физическая программа CBM . . . . .	10
1.2 Экспериментальная установка CBM . . . . .	10
1.2.1 Вершинный микродетектор MVD . . . . .	10
1.2.2 Кремниевая трекинговая система STS . . . . .	10
1.2.3 Детектор черенковских колец RICH . . . . .	10
1.2.4 Мюонная система MUCH . . . . .	10
1.2.5 Детектор переходного излучения TRD . . . . .	11
1.2.6 Время-пролётный детектор TOF . . . . .	11
1.2.7 Электромагнитный калориметр ECAL . . . . .	11
1.2.8 Детектор PSD . . . . .	11
1.3 CBM RICH поподробней . . . . .	11
<b>2 Геометрия</b>	<b>12</b>
2.1 Сравнение представления геометрии в GEANT/ROOT и САПР . . . . .	13
2.1.1 Представление геометрии в САПР . . . . .	14
2.1.2 Представление геометрии в GEANT/ROOT . . . . .	16
2.2 “CATIA-GDML geometry builder” . . . . .	16
2.2.1 Примитивы в “Builder” . . . . .	18
2.2.2 Макропрограммы для CATIA v5 . . . . .	18
2.2.3 Избранные подробности реализации “CATIA-GDML geometry builder” . . . . .	23
2.3 Применение “CATIA-GDML geometry builder” к CBM RICH . . . . .	23
2.3.1 Фоточувствительная камера . . . . .	23
2.3.2 Фокусирующая система — сферические зеркала . . . . .	26
<b>3 Развитие DAQ эксперимента CBM</b>	<b>27</b>
3.1 Фотоэлектронный умножитель . . . . .	27
3.2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH . . . . .	28
3.2.1 64-канальный модуль считывания . . . . .	28
3.2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ . . . . .	32
3.3 Время-цифровой преобразователь . . . . .	33
3.4 Экспериментальные установки . . . . .	35
3.4.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах . . . . .	35
3.4.2 Лабораторный стенд . . . . .	37
3.5 Программное обеспечение . . . . .	39
3.5.1 Распаковка . . . . .	39
3.5.2 Калибровка точного времени . . . . .	39
3.5.3 Коррекция задержек между каналами . . . . .	40
3.5.4 Построение хита . . . . .	40
3.5.5 Построение события . . . . .	41
3.5.6 Реконструкция . . . . .	42

<b>4 Результаты анализа</b>	<b>44</b>
4.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB . . . . .	44
4.2 LeadingEdgeDiff . . . . .	44
4.3 Калибровка точного времени (Fine time calibration) . . . . .	45
4.4 Определение коррекций задержек между каналами . . . . .	48
4.5 Временное разрешение . . . . .	49
4.6 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра . . . . .	51
4.6.1 Исследование спектросместителя с помощью флюориметра . . . . .	53
4.6.2 Прямые измерения временного профиля спектросместителя . . . . .	54
4.7 Время над порогом . . . . .	55
4.8 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании . . . . .	56
<b>5 Применение разработанных методов к оптимизации CBM RICH</b>	<b>60</b>
<b>Заключение</b>	<b>61</b>
<b>Список литературы</b>	<b>63</b>

# Введение

## 0.1 Обработка сигнала с детектора

Экспериментальная установка в физике высоких энергий или физике тяжёлых ионов ставит своей задачей восстанавливать события, произошедшие в области первичного взаимодействия. Такой областью будет являться точка взаимодействия пучка с мишенью в случае эксперимента с фиксированной мишенью, либо точка взаимодействия встречных пучков на коллайдерном эксперименте. Для выполнения этой задачи в некоторой области рядом с точкой взаимодействия ставят набор из нескольких детекторов, регистрирующих вторичные частицы и их продукты распада. Детекторы вырабатывают электрические сигналы, которые в случае современного крупного эксперимента необходимо доставить в ЭВМ, чтобы выполнять программную обработку, включающую в себя реконструкцию треков и частиц и анализ многочисленных распределений.

В этой главе обсуждаются решения, выбранные СВМ для организации считывания данных с детекторной установки.

**Задача: дать общую картину — детектор, передняя электроника, передающая электроника, ЭВМ. Затем указать, что вот типа электроника с внешним триггером, а вот самотrigгирующаяся 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. В любом случае, 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 сигналрабатывается, 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???) . Практически всегда требуется регистрация момента времени прихода сигнала, поэтому широко применяются комбинации перечисленных способов — регистрация амплитуды сигнала вместе с моментом времени прихода переднего фронта, регистрация моментов времени переднего и заднего фронтов без захвата амплитуды, регистрация момента времени переднего фронта и формирование ограниченного числа семплов после него.

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 низких 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.

Описанные процедуры обработки сигнала могут быть реализованы на разной аппаратной платформе. Самый примитивный вариант — это когда канал реализуется с применением “сквозного монтажа” (THT) или “поверхностного монтажа” (SMT, SMD) ??? таких-то компонентов. В принципе, это возможно, но в этом случае геометрические размеры определяют заметное время прохождения сигнала, таким образом ограничивая частоту функционирования. Также габариты ограничивают плотность каналов в пространстве и, вообще говоря, стоимость такой электроники выше современных компактных вариантов. В эксперименте СВМ ожидается огромное число каналов при очень высокой плотности в пространстве. Один только детектор RICH будет иметь более 60000 каналов при плотности каналов около  $0.5 \text{ см}^2/\text{канал}$ . Следовательно рассматриваются более продвинутые технологии — интегральные схемы, в том числе программируемые.

На данный момент существует множество разновидностей интегральных схем, однако наибольший интерес в СВМ (экспериментальной физике???) проявляется к интегральным схемам специального назначения (ASIC) и программируемым пользователем вентильным матрицам (ППВМ, FPGA). ASIC уже широко применяются в экспериментальной физике и в быту на протяжении десятилетий, в то время как ППВМ доступны сравнительно недавно. Эти два варианта принципиально отличаются тем, что ASIC невозможно изменить после изготовления, а FPGA не имеет какой-либо программы по умолчанию и программируется пользователем. Более того, программа FPGA стирается при отключении питания, поэтому рядом необходимо обеспечить постоянную память, из которой FPGA берёт программу при загрузке. Процесс проектирования FPGA фактически заключается в процессе разработки прошивки на языке описания аппаратуры (HLD, verilog), при этом в любой момент есть возможность применить прошивку к чипу чтобы выполнить отладку. Достоинство ASIC заключается в том, что чипы изготавливаются относительно дёшево при большом размере партии. Высокую стоимость имеет шаблон, на основе которого можно дёшево изготовить большую партию чипов. С другой стороны процесс проектирования ASIC осложнён тем, что если для отладки требуется физический экземпляр, а не программная модель, то требуется изготовление шаблона.

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 это точка, условно обозначающая момент времени прихода сигнала. На выходе дискриминатора получается логический сигнал, который необходимо преобразовать в цифровой с помощью время-цифрового преобразователя (ВЦП). На выходе ВЦП уже будет цифровой сигнал, а не логический.

Коллaborацией СВМ ведётся разработка нескольких чипов, на базе которых будут построены платы передней электроники. STS-XYTER — ASIC для кремниевой трековой системы, регистрирующий амплитуду сигнала и временную отметку переднего фронта. SPADIC — ASIC для детектора переходного излучения, имеющий богатый функционал, но, самое главное, выполняющий непрерывное семплирование входного сигнала. (**Наверное, нет смысла описывать подробнее — слишком сложный чип**) Группы СВМ RICH, HADES RICH и PANDA DIRC совместно занимаются разработкой программ для FPGA, выполняющих функции дискриминатора и ВЦП.

(Тут нужно обсудить и почитать ещё. Возможен ли такой сценарий, в наше время или в прошлом, когда триггер чисто аналоговый. То есть передняя электроника игнорирует сигнал до тех пор, пока не сработает схема совпадения с триггером. В той модели традиционного триггера, которую я себе сейчас представляю, входной сигнал обрабатывается непрерывно, но выпускается на выход из буфера только при наличии триггера. Вероятно, возможно и то и то, но вопрос в том, что реально используется, что более распространено.) Рассмотрим систему считывания и сбора данных “традиционного” эксперимента, имеющего аппаратный триггер. 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 после регистрации одного входного сигнала, в течение которого прибор не может обрабатывать последующие 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 считающей 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 полноты 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 МУЧН, 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.)

### 0.1.1 Система считывания и сбора данных эксперимента СВМ

Блок-схема архитектуры системы считывания и сбора данных эксперимента СВМ приведена на рис. 1.

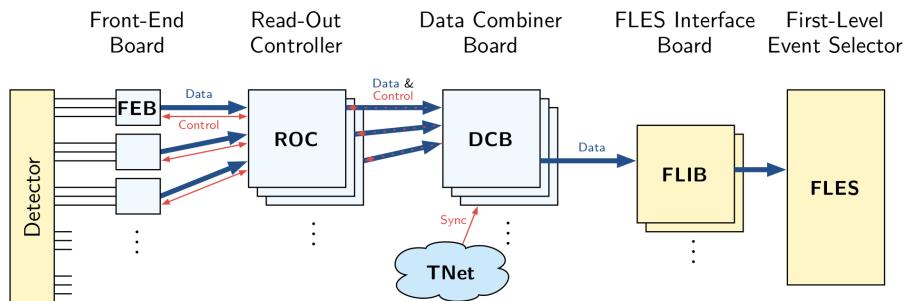


Рис. 1: Система считывания и сбора данных СВМ.

**Развёрнутое описание выше делается для понимания этой секции.**

Источником электрических сигналов являются детекторы, выполненные по разным технологиям, и требующие оцифровки различными способами. Эта оцифровка выполняется разнообразными платами передней электроники (FEB), имеющими разные принципы и основанными на различных чипах. Затем цифровые данные опрашиваются с плат передней электроники контроллерами считывания (ROC). После этого данные группируются в соответствующих платах (DCB) и поступают во FLES через платы FLIB.

### 0.1.2 FLES

переработать Всё вместе привело к разработке аппаратно-программного комплекса, называемого системой отбора первого уровня — First Level Event Selector (FLES). По сути DAQ-часть (приём данных) неотделима от FLES, поэтому иногда эту систему называют FLES/DAQ. Отличительные черты FLES — самотриггирующаяся электроника, несколько уровней концентрации данных, многочисленные буферы, формирование срезов времени, построение интервалов и только после этого мы переходим к построению событий.

Функционал FLES/DAQ можно разбить на три части. Первая — приём и объединение данных, поступающих с группы каналов, в срезы времени (timeslice). Такую группу образует некоторое множество каналов одного детектора, количество которых определяется ожидаемым потоком данных, а ограничение диктуется максимальной пропускной способностью входного канала FLES.

Один из наиболее важных и нестандартных этапов работы FLES — это построение интервалов (Interval building, IB). Построение интервалов — это получение контейнеров с данными со всех детекторов за некоторый интервал времени путём перегруппировки данных из срезов времени. Суть построения интервалов показана на рис. 2. Данные от одного “входного узла” (input node, IN) приходят от группы каналов какого-то детектора и представляет собой последовательность срезов времени. Задача заключается в том, чтобы объединить все срезы, соответствующие одному интервалу времени, чтобы дальше передать на “вычислительный узел” (processing node, computing node, CN).

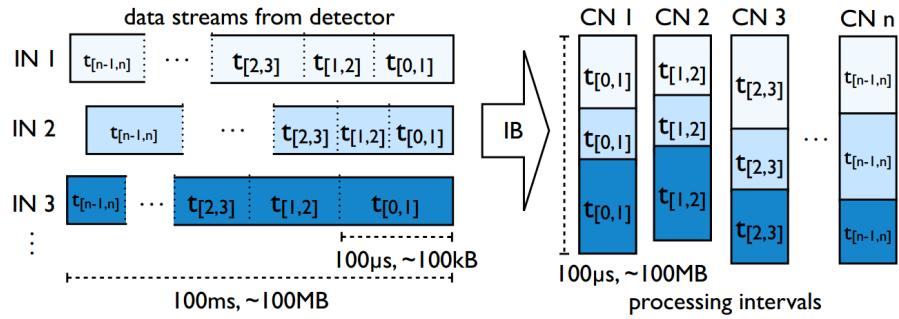


Рис. 2: Построение интервала.

Заключительный этап обработки данных во FLES — восстановление событий в интервале, реконструкция треков и частиц в восстановленных событиях и выработка сигнала о сохранении или отбрасывании интервала.

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.  $25 \cdot 10^6 \cdot 40$  Кбайт = 1 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” — ЭВМ с установленной платой FLIB. Все вычисления, необходимые для отбора данных будут осуществляться на так называемых “вычислительных узлах”. Входные и вычислительные узлы объединены в компьютерную сеть посредством InfiniBand QDR, образуя уникальную распределённую вычислительную систему, называемую FLES, см. рис. 3. Вычислительная подсеть будет иметь приблизительно 60000 ядер.

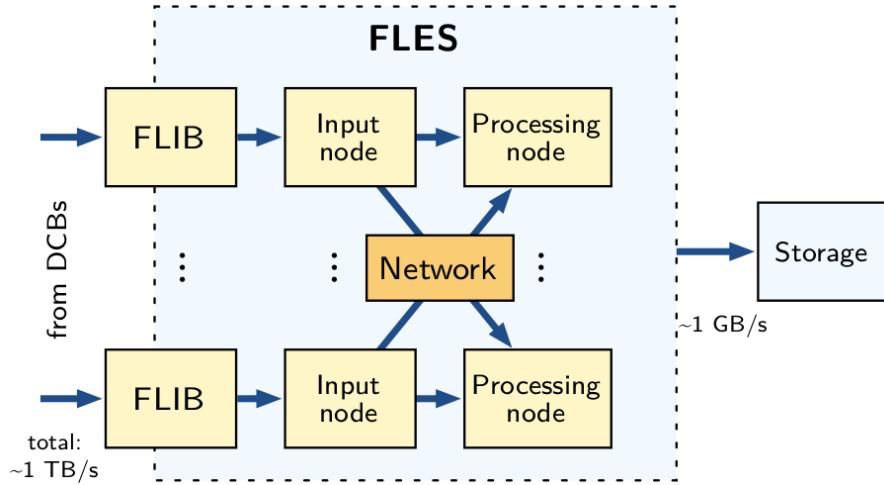


Рис. 3: Общая схема устройства FLES.

Планируется также, что FLES сможет функционировать в особом режиме, когда для выполнения реконструкции с целью отбора данных для сохранения будет использоваться только часть входного потока. На рис. 4 приведена блок-схема функционирования FLES в таком режиме. Это имеет смысл при работе эксперимента над некоторыми пунктами физической программы, но принципиальная возможность и эффективность реконструкции частиц с целью триггирования по ограниченному набору детекторов является предметом исследований. Например, можно восстанавливать ??? такую-то частицу только по трекам в MUCH. При этом система приёма данных работает в полную силу — идёт приём со всех детекторов и никакие данные не выбрасываются до тех пор, пока не будет выполнена реконструкция по данным с MUCH. Если в результате реконструкции выясняется, что принятая порция данных потенциально интересна, то она извлекается из буферов и записывается. Это позволяет ??? снизить поток сохраняемых данных в ??? раз, что особенно актуально при экстремально высоких частотах взаимодействия.

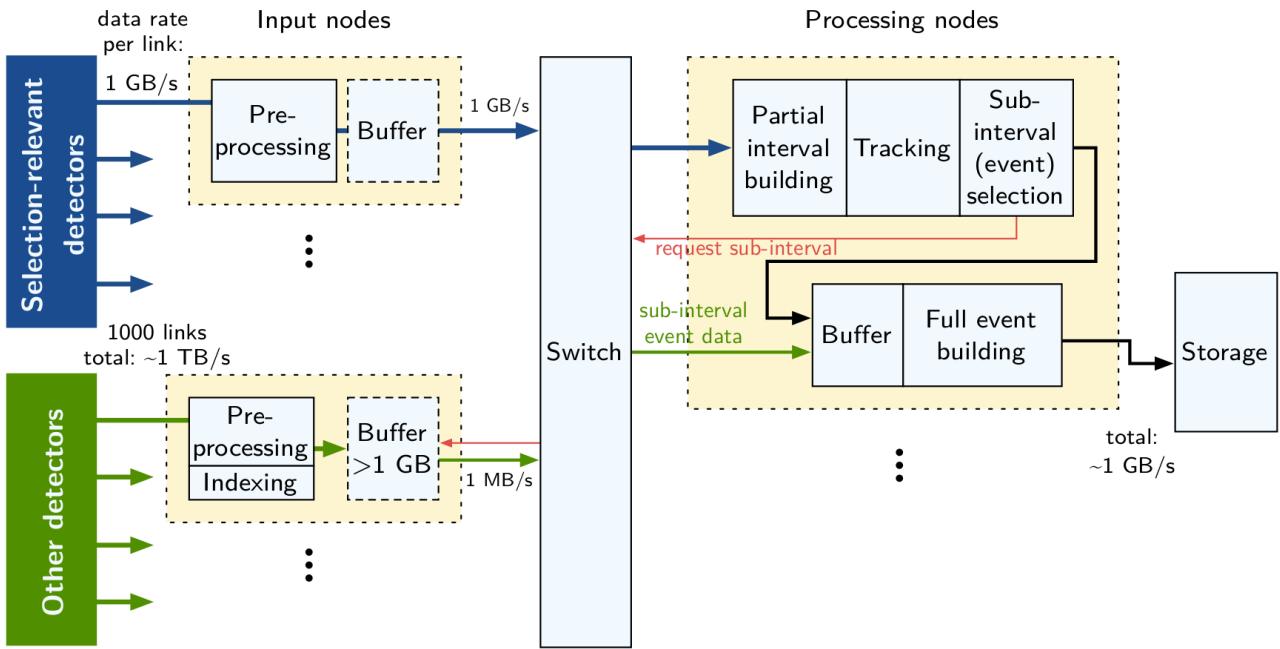


Рис. 4: Блок-схема функционирования FLES в режиме отбора по данным с части детекторов.

??? Подробное описание того, что на картинке

### FLES Interface Board

В качестве платы-интерфейса между электроникой, разрабатываемой специально для СВМ, и ЭВМ стандартной архитектуры, будет выступать плата, в общем называемая платой интерфейса FLES — FLES Interface Board, или FLIB. FLIB можно рассматривать как особый сетевой интерфейс, основной задачей которого является предоставление данных, поступающих по входным каналам, центральному процессору ЭВМ. В отличие от сетевого интерфейса Ethernet, данные поступают от разнородных плат передней электроники по разным протоколам. В качестве платформы для реализации FLIB в СВМ рассматривается коммерческая PCI-E плата HTG K-7. Архитектура FLIB показана на рис. 5. Основные компоненты FLIB — драйверы входных оптических портов, программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ, FPGA), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и драйвер шины PCI-Express.

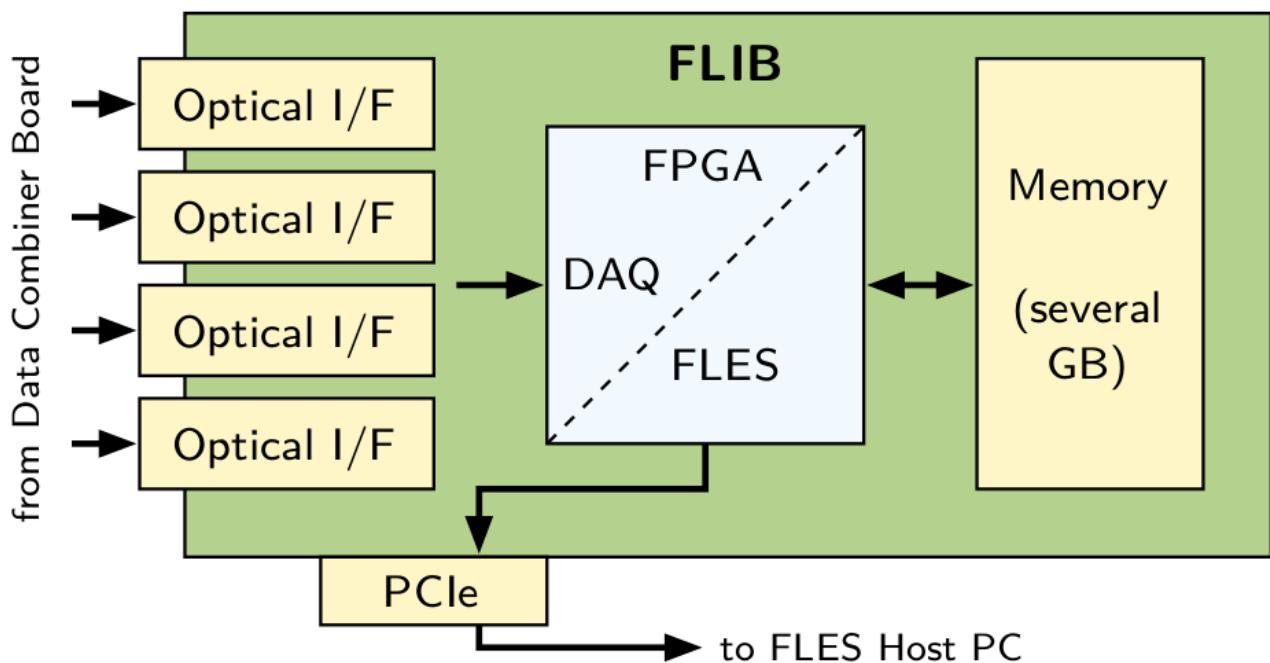


Рис. 5: Архитектура FLIB.

## **0.2 Обзор существующих детекторов черенковских колец**

**На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Разработка методологии и реализация “CATIA-GDML geometry builder”, средства построения сложной, основанной на инженерном дизайне геометрии детекторов для моделирования прохождения и взаимодействия частиц.
2. Применение “CATIA-GDML geometry builder” для построения беспрецедентно точного параметризованного описания геометрии CBM RICH в среде CbmRoot.
3. Реализация прототипа системы считывания и сбора данных CBM RICH и проведение его тестов на пучке в составе полнофункционального прототипа этого детектора а также дополнительных тестов на лабораторном стенде.
4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для приема, упаковки и передачи бестриггерного потока данных, для калибровки точного времени и относительных задержек каналов и для построения событий из потока данных с детектора CBM RICH в среде CbmRoot.
5. Результаты комплексного исследования временных свойств канала считывания и сбора данных для CBM RICH, реализованного на основе многоанодного ФЭУ H12700 с системой динодов “metal channel”, специально разработанных передней электроники типа предусилитель-дискриминатор и высокоточного ВЦП с последующим прямым вводом данных в единую среду моделирования, сбора и анализа данных CbmRoot.
6. Исследование временных свойств нанесенного на окно МА ФЭУ сместителя спектра при возбуждении черенковскими фотонами.
7. Сравнительный анализ особенностей считывания многоанодного ФЭУ временным и аналоговым трактами.
8. Исследование характеристик детектора CBM RICH с учетом неидеальности геометрии и шумов электронники.

# Глава 1

## Эксперимент CBM на FAIR

### 1.1 Физическая программа CBM

### 1.2 Экспериментальная установка CBM

#### 1.2.1 Вершинный микрорегистратор MVD

#### 1.2.2 Кремниевая трекинговая 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  $7.5^\circ$ , 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.

Задача кремниевой трековой системы — измерение траекторий и импульсов заряженных частиц, вылетающих из точки взаимодействия пучка тяжёлых ионов с мишенью. Для выполнения физической программы CBM — наблюдения редких **явлений** — необходима частота взаимодействий до 10 МГц, при том что в одном взаимодействии будет рождаться до 1000 заряженных частиц. Реконструкция треков должна выполняться с эффективностью порядка 95% и разрешением по моменту порядка  $\Delta p/p = 1\%$ . Для удовлетворения перечисленных требований STS должна состоять из 8 слоёв кремниевых микростриповых сенсоров, расположенных внутри поля от дипольного магнита на расстоянии от 30 см до 100 см от точки взаимодействия вниз по пучку с шагом 10 см. Сенсоры будут монтироваться на легкую механическую опору в виде карбоновый ферм. Считывание будет осуществляться по многоканальных микро-кабелям самотriggirующейся электроникой, расположенной по краям станций вместе с линиями охлаждения и другими инфраструктурными подсистемами. Микро-кабели будут выполнены из sandwiched polyimide-Aluminum layers толщиной несколько десятков мкм. Микростриповые сенсоры будут

#### 1.2.3 Детектор черенковских колец RICH

#### 1.2.4 Мюонная система MuCH

From CBM MuCH TDR:

The MuCh system is designed to identify muon pairs which are produced in high-energy heavy-ion collisions in the beam energy range from 4 to 40 AGeV. The measurement of lepton pairs is a central part of the CBM research program, as they are very sensitive diagnostic probes of the conditions inside the fireball. At low

invariant masses, dileptons provide information on the in-medium modification of vector mesons which is a promising observable for the restoration of chiral symmetry. At intermediate invariant masses, the dilepton spectrum is dominated by thermal radiation from the fireball reflecting its temperature. At invariant masses around  $3\text{GeV}/c^2$ , dileptons are the appropriate tool to study the anomalous charmonium suppression in the deconfined phase. In the CBM experiment both electrons and muons will be measured in order to obtain a consistent and comprehensive picture of the dilepton physics.

The experimental challenge for muon measurements in heavy-ion collisions at FAIR energies is to identify low-momentum muons in an environment of high particle densities. The CBM strategy is to track the particles through a hadron absorber system, and to perform a momentum-dependent muon identification. This concept is realized by an instrumented hadron absorber, consisting of staggered absorber plates and tracking stations. The hadron absorbers vary in material and thickness, and the tracking stations consist of detector triplets based on different technologies. The MuCh system is placed downstream of the dipole magnet hosting the Silicon Tracking System (STS) which determines the particle momentum. In order to reduce the number of muons from pion and kaon weak decays, the absorber/detector system has to be as compact as possible.

The MuCh system will be built in stages which are adapted to the beam energies available. Within the FAIR modularized start version the SIS100 ring will provide heavy ion beams with energies up to 14 AGeV, and proton beams up to 29 GeV. The first two versions of MuCh (SIS100-A and SIS100-B) will comprise of 3 and 4 stations suitable for the measurement of low-mass vector mesons in  $A+A$  collisions at 4-6 AGeV and 8-14 AGeV, respectively. The third version of the MuCh system (SIS100-C) will be equipped with an additional iron absorber of 1 m thickness in order to be able to identify charmonium at the highest SIS100 energies. The absorber slices will be built only once so that they could be rearranged properly to obtain required absorber thicknesses. Once SIS300 is operational, we will upgrade the MuCh system further by inserting additional absorbers and detector stations for the measurement of low-mass vector mesons and charmonium at beam energies above 14 AGeV (MuCh versions SIS300-A and SIS300-B).

### **1.2.5 Детектор переходного излучения TRD**

### **1.2.6 Время-пролётный детектор TOF**

### **1.2.7 Электромагнитный калориметр ECAL**

### **1.2.8 Детектор PSD**

## **1.3 CBM RICH поподробней**

## Глава 2

# Геометрия

Процесс проектирования современной экспериментальной установки подразумевает разнообразное компьютерное моделирование этой установки. В первую очередь выполняется компьютерное геометрическое моделирование в трёхмерном пространстве с целью получения конструкторской документации и анализа расположения элементов в пространстве. Геометрическая модель для этих целей обычно строится средствами систем автоматизированного проектирования (САПР), в которых стандартным способом представления геометрической информации является граничное представление (BREP).

**Далее представление геометрической информации в САПР мы будем называть просто BREP, хотя строго говоря это не совсем верно.**

Также, как и в любой другой прикладной области, необходимо выполнять многочисленные расчёты, которые нередко требуют геометрическую модель в качестве входных данных. Так, например, в инженерно-конструкторской среде широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ) для решения задач прочности и устойчивости механических конструкций, динамики жидкостей и газов и т.д. МКЭ получил своё название от способа разбиения расчётной области на элементарные блоки — конечные элементы. В простом случае расчётной областью является пространство заполненное материалом, т.е. сама деталь, а конечным элементом — тетраэдр. Такую модель, в которой деталь представлена множеством конечных элементов, называют КЭ-моделью. Существуют алгоритмы, позволяющие эффективно получить разбиение исходной геометрической модели, например представленной с помощью BREP и построенной в САПР, на конечные элементы. Многие алгоритмы основаны на триангуляции Делоне, разработанной в начале 20 века.

Отличительной особенностью сферы физики частиц является то, что в процессе проектирования установки помимо типовых расчётов требуется выполнение моделирования прохождения частиц через материал, которое чаще всего выполняется физиками, формулирующими требования к конструкции установки, но в общей массе не владеющими САПР. Такое моделирование достаточно специфично, но оно также выполняется над геометрической моделью, в идеальной ситуации — максимально подробной, совпадающей с полной детальной моделью, полученной инженерами-конструкторами с помощью САПР. Также стоит отметить, что процесс конструирования, в том числе получения инженерной геометрической модели, и процесс моделирования физики не имеют чётко определённого порядка и тесно между собой переплетены. В результате обоих процессов уточняются геометрические параметры деталей, компоновка узлов, применяемые материалы, и т.д. Это приводит к необходимости постоянного обмена геометрической информацией.

Как было сказано выше, инженеры для получения геометрической модели используют САПР. Во многих физических лабораториях, включая CERN, GSI и ОИЯИ, применяется САПР CATIA v5. Моделирование взаимодействия частиц с материалом широко применяет метод Монте-Карло (MC) и реализовано в соответствующих программных пакетах, многие из которых основаны на фреймворках GEANT4 или GEANT3, разработанных в CERN. Также часто применяют поход Virtual Monte-Carlo (VMC), в котором все процедуры, связанные с геометрией, поручены системе ROOT. Все перечисленные физические пакеты (GEANT3, GEANT4, ROOT, далее коротко GEANT/ROOT) используют представление геометрии, принципиально отличающееся от BREP. Модели для GEANT/ROOT часто называют MC-моделями. Это отличие состоит из двух пунктов, подробно описанных в 2.1, и приводит к невозможности прямого обмена геометрическими моделями между физиками и инженерами. Существует теоретическая возможность прямой конвертации из представления, принятого в GEANT/ROOT, в BREP, однако в процессе работы не было найдено существующей реализации подобного перехода. Конвертация в обратном направлении до настоящего времени не была математически описана, хотя теоретически также представляется возможной.

Алгоритмы проведения частиц, реализованные в GEANT/ROOT, оптимизированы для соответствующего описания геометрии, применяемого в этих пакетах. Подходы геометрического моделирования, при-

нятые в САПР, обеспечивают максимально эффективную работу как ЭВМ, так и инженеров, в частности за счёт того, что эти подходы интуитивно понятны человеку. Главным фактором против прямой конвертации в том или ином направлении является то, что она имеет малую практическую пользу. Одна и та же геометрическая модель с точки зрения разных задач может быть одновременно оптимальна и, наоборот, избыточна или недостаточна. Это просто понять на следующем примере. С точки зрения инженерного проекта массив болтов, вкрученных в корпус, представляет собой важную информацию. В чертежах и другой конструкторской документации ошибка в точном положении отверстий, их диаметре, типе резьбы болтов и т.д. может привести к невозможности собрать продукт после изготовления отдельных компонентов. В то же время, в САПР принято не хранить, и следовательно не визуализировать, витки резьбы с целью снижения нагрузки на графический адаптер ЭВМ. Это значит, что резьба присутствует только формально, в документации, а геометрическая модель имеет лишь условное обозначение резьбы в соответствующем месте. С точки зрения моделирования прохождения частиц через материал в зависимости от расположения в общей установке подобные подробности могут оказаться как критическими, так и наоборот излишними и вызывающими значительное увеличение времени выполнения моделирования. Так, например, резьба болта, находящегося близко к области, где проходит пучок, может оказывать влияние на функционирование всей установки, а та же резьба где-то за пределами геометрического аксептанса не даст ровно никого эффекта может быть упрощена до цилиндра. Более того, без ущерба реалистичности моделирования упрощения могут носить неожиданно масштабный характер. Например, где-то рассматриваемый массив болтов может быть вообще проигнорирован, а пространство в отверстиях заполнено материалом корпуса.

В связи с этим в GEANT/ROOT приятно иметь несколько моделей одной и той же установки, имеющих разный уровень подробностей. Чем выше уровень подробностей — тем больше времени занимает выполнение моделирования. Для оценочных расчётов удобно применять грубые модели, для точного определения каких-либо характеристик — подробные модели. В САПР же подобная проблема решается другим образом. Так, например, в САПР CATIA v5 присутствует возможность автоматического огрубления геометрической модели для снижения нагрузки на графический адаптер и повышения частоты кадров при динамической визуализации трёхмерных объектов. Это становится актуально, когда количество треугольников, которые необходимо визуализировать, составляет десятки миллионов.

Принимая во внимание развитие вычислительной техники, в особенности резкое повышение производительности графических карт, их доступность широким массам, и вообще увеличение их значимости в вычислениях общего назначения, представляется возможным разработка новых алгоритмов проведения частиц через материал, учитывающих особенности геометрического представления в САПР. Более того, возможна также некоторая корректировка подходов САПР к геометрическому моделированию с целью повышения совместимости с пакетами проведения частиц. Однако следует учитывать следующие факты, мешающие движению в данном направлении. Во-первых, САПР — это в большинстве своём коммерческое программное обеспечение с закрытым исходным кодом, а геометрическое ядро САПР — базовая составляющая, которую отлаживают десятилетиями. Внесение изменений в столь важную компоненту коммерческого продукта, вероятно, будет проблемным даже при наличии интереса со стороны фирмы-разработчика. Во-вторых, в обоих сферах накоплен огромный массив моделей, применяемых для поддержки изделий на всех этапах жизненного цикла, даже после окончания процесса проектирования. GEANT/ROOT модели могут применяться для выполнения моделирования даже после того, как физическая экспериментальная установка уже собрана.

Таким образом с целью упрощения взаимодействия физиков и инженеров было приятно решение не пытаться разработать конвертеры или какие-либо новые универсальные способы представления геометрии, а сосредоточиться на облегчении существующей процедуры за счёт плавной корректировки привычных методов и предоставления новых инструментов как физикам, так и инженерам. “CATIA-GDML geometry builder” — это как раз набор таких инструментов. Он описан в 2.2 вместе с предлагаемой организацией рабочего процесса и реальным случаем использования для проектирования детектора RICH эксперимента CBM.

## 2.1 Сравнение представления геометрии в GEANT/ROOT и САПР

Разница между двумя способами описания геометрической информации в САПР и пакетах моделирования прохождения частиц через материал GEANT/ROOT заключается в двух пунктах. Во-первых, отличается способ задания геометрических форм. В САПР применяется граничное представление (BREP), для описания которого используются понятия типа «поверхность», «грань», «ребро», «кривая», и за которыми стоят соответствующие уравнения, описывающие эти объекты в пространстве. В GEANT/ROOT применяется конструктивная твердотельная геометрия (CSG), которая оперирует понятиями «примитив» и «Булева операция». Очевидно, что и за этими объектами также стоят конкретные уравнения, описывающие кривые и поверхности, однако есть существенное различие описанное ниже. Во-вторых, отличается способ

задания взаимоотношения форм в пространстве. В САПР, по аналогии с тем, как человек воспринимает окружающий мир, присутствует некоторое бесконечное окружающее пространство без материала, а все предметы находятся в этом пространстве. Невозможна такая ситуация, чтобы один объект находился внутри другого — в таком случае подразумевается, что во втором есть соответствующая полость, освобождающая место под первый объект. В GEANT/ROOT для описания взаимоотношения форм используется иерархия объёмов. Это объясняется тем, что такой метод более удобен для описания геометрии, где главной задачей является однозначное задание материала в каждой точке пространства. Вводится понятие объёма — сущности, имеющей форму и материал. Из всех объёмов выбирается один, называемый объёмом верхнего уровня, а остальные помещены либо в него, либо в какой-то другой, формируя таким образом дерево объёмов.

### 2.1.1 Представление геометрии в САПР

В BREP есть два типа понятий — геометрические («точка», «кривая», «поверхность») и топологические («вершина», «ребро», «грань»). «Точка» — это тройка координат в некоторой системе координат. «Кривая» — это уравнение, задающее множество точек, принадлежащих данной кривой. Кривую удобно описать с помощью параметрического уравнения от одной переменной. «Поверхность» — это уравнение, задающее множество точек, принадлежащих данной поверхности. Соответственно, поверхность удобно описать с помощью параметрического уравнения от двух переменных. Топологические сущности задаются на базе геометрических. «Вершина» лежит в некоторой геометрической точке. «Ребро» лежит на некоторой геометрической кривой и ограничено двумя вершинами. Очевидно, что эти вершины должны принадлежать кривой, то есть и соответствующие геометрические точки должны принадлежать кривой. «Грань» лежит на некоторой поверхности и ограничена замкнутым циклом из рёбер. Так же очевидно, что эти рёбра должны принадлежать поверхности, как и кривые, на которых они лежат, как и вершины и точки, ограничивающие эти рёбра. Замкнутая оболочка из граней с указанием внешних сторон этих граней ограничивает некоторую область пространства, называемую «телом».

В соответствии с BREP параллелипипед (к которому эквивалентен примитив `box` в CSG) задаётся следующим образом.

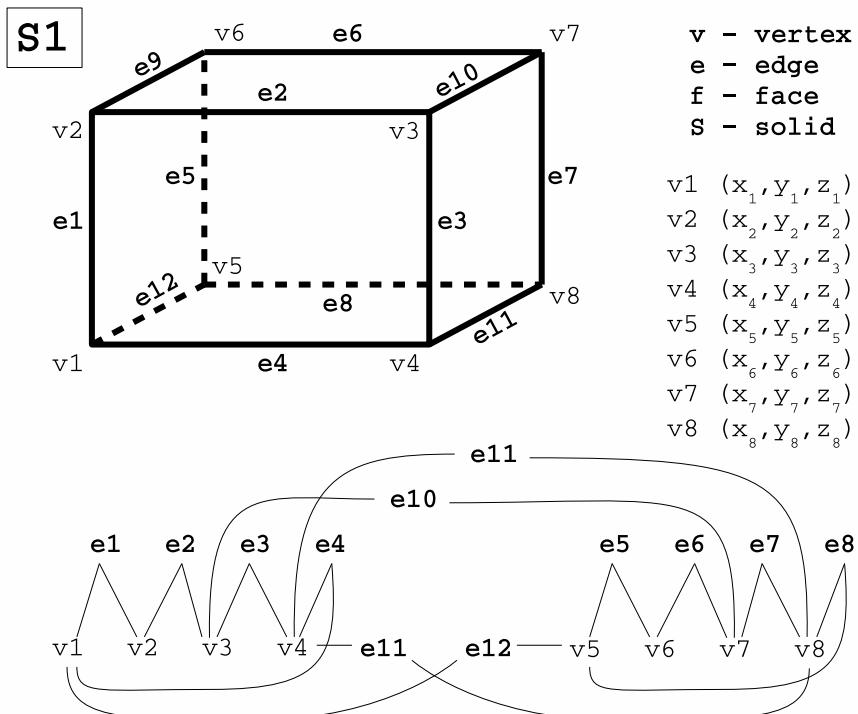


Рис. 2.1: Описание вершин и рёбер примитива `box` методами BREP.

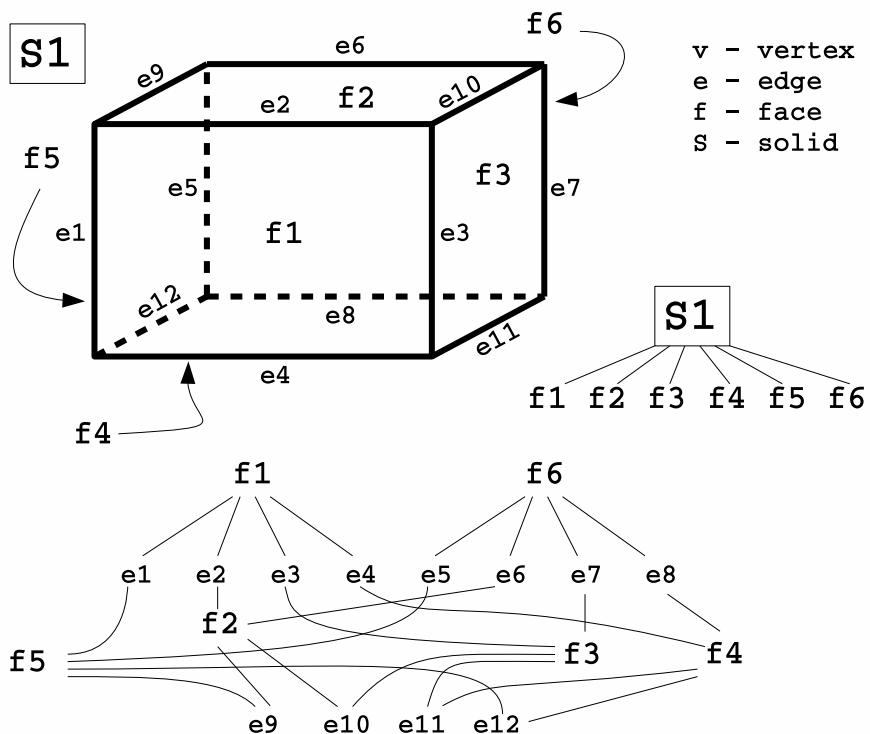


Рис. 2.2: Описание граней и тела примитива box методами BREP.

### ?? Краткое описание картинки

Стоит однако отметить, что человек, создающий геометрическую модель в САПР, хотя и может выполнять построения в соответствии с базовыми принципами BREP, чаще всего применяет интуитивно понятные формообразования, из которых система точно формирует BREP модель в памяти ЭВМ, которая также необходима для получения триангулированной геометрии для визуализации на дисплее ЭВМ. Есть 4 базовых формообразования и 4 им обратных (с вычитанием) — «выдавливание», «вращение», «протягивание» и «тело по сечениям». Многие другие формообразования, такие как фаски и скругления, разрезы, отверстия, внутри на самом деле являются лишь вариациями перечисленных. Последовательность формообразований, выполненных пользователем для получения итоговой формы, сохраняется в виде дерева построения модели, напоминающего историю построения, но позволяющего навигацию и редактирование. Дерево часто доступно пользователю в основном рабочем окне интерфейса САПР. Однако бывают случаи, когда история построения теряется, например при передаче модели из одной САПР в другую. Таким образом, в результате работы инженера получается модель, описанная с помощью BREP, и во многих случаях имеющая также и дерево построения.

В инженерной практике принято проектировать и соответственно строить 3d-модели, объединяя в сборки детали и другие сборки. Отсюда вытекает, что во многих САПР, в том числе в CATIA v5, существуют стандартные объекты, обозначающие детали и сборки. Например в САПР CATIA v5 существует отдельный тип документа CATPart для детали и отдельный тип документа CATProduct для сборки. Внутри документа типа CATPart есть минимальный набор обязательных элементов — 3 стандартные взаимно перпендикулярные плоскости в начале системы координат детали и главное тело детали, по умолчанию называемое PartBody. В документе типа CATProduct присутствует возможность добавлять в качестве дочерних компонентов либо документы CATPart либо другие документы CATProduct. В 2.2 описывается, как соотносятся перечисленные сущности CATIA v5 с понятиями геометрической подсистемы GEANT/ROOT.

Во многих САПР, в том числе и CATIA v5 присутствует возможность так называемого контекстного редактирования компонентов. Это означает, что пользователь во время работы над сборкой в документе типа CATProduct, имеющей в качестве дочерних компонентов детали в файлах типа CATPart, может также редактировать детали, не переключая активный документ. Эта возможность широко используется в “CATIA-GDML geometry builder” — большая часть работы выполняется в контексте единственного продукта, что с точки зрения пользователя аналогично работе над всей экспериментальной установкой.

### 2.1.2 Представление геометрии в GEANT/ROOT

Для описания геометрических форм в пакетах GEANT/ROOT применяется CSG. В качестве строительных блоков в CSG используются примитивы из списка реализованных в системе. Список примитивов включает в себя как относительно простые примитивы типа параллелепипеда (box), сегмента цилиндра (tubs), сегмента конуса (cons), так и достаточно сложные, типа эллипсоида, параболоида, скрученных (twisted) примитивов. Принимая во внимание тот факт, что геометрия в GEANT/ROOT нужна для выполнения моделирования взаимодействия частиц с материалом, можно сказать, что примитив — это объект, имеющий геометрическое представление и для которого реализовано решение геометрических задач, возникающих при моделировании. Среди таких геометрических задач можно отметить задачу нахождения расстояния до ближайшей границы примитива от некоторой точки внутри объёма, в одном заданном направлении или в любом возможном направлении. Эту задачу необходимо решать многократно в процессе проведения частицы для того, чтобы определить так называемый максимальный допустимый геометрический шаг. В результате моделирования физических процессов получается максимальный допустимый шаг из соображений физики. Для того чтобы собственно изменить координату частицы из этих двух шагов выбирается минимальный.

Форма может быть описана как результат Булевой операции над примитивами или другими Булевыми операциями. Есть три Булевые операции — объединение (union), вычитание (subtraction) и пересечение (intersection). Булевые операции позволяют задать практически любую геометрическую форму, имеющую границы из тех, что применяются в примитивах. При этом не требуется дополнительной реализации решения геометрических задач, т.к. удаётся комбинировать то, что реализовано в примитивах.

Таким образом наблюдается некоторая аналогия между BREP и CSG, заключающаяся в том, что в любом случае сложное тело или базовый примитив имеет некоторые границы, заданные аналитическими выражениями. Корни этой аналогии лежат в фундаментальной математике. Однако решающая разница заключается в том, что для примитива эти границы чётко определены и имеется лишь ограниченное число параметров, позволяющих изменять форму примитива.

Вторая составляющая геометрического представления в GEANT/ROOT это иерархия объёмов. Введём понятия логического и физического объёмов, формы и материала. Логический объём, или просто объём это базовый элемент для построения иерархии объёмов. Объём описывает непозиционированный объект и всё, что находится внутри него. Объём характеризуется формой и материалом. Форма — это заданные с помощью CSG границы пространства, по методу, описанному выше. Материал включает в себя описание химического состава, плотности, и т.д. При помещение одного логического объёма в другой, например объёма  $A$  в объём  $B$ , образуется так называемый физический объём, или узел,  $B_1$ , который обозначается взаимоотношение  $A$  и  $B$  как материнский-дочерний и характеризуется неоторой матрицей позиционирования  $B$  внутри  $A$ .

## 2.2 “CATIA-GDML geometry builder”

“CATIA-GDML geometry builder” (далее просто “Builder”) представляет собой набор документов-шаблонов и макропрограмм для САПР CATIA v5 вместе с настройками окружения и инструкциями к применению стандартных средств CATIA v5. “Builder” ставит своей задачей упростить процесс создания CSG моделей с иерархией объёмов, напрямую совместимых с GEANT/ROOT.

Центральная идея “Builder” заключается в правилах соответствия сущностей CATIA v5 и сущностей геометрии в GEANT/ROOT. Это соответствие делает возможным конвертацию МС-модели в CATIA v5 в любой внешний файл с целью дальнейшего импорта в ROOT/GEANT. В качестве формата для обмена был выбран XML-подобный формат GDML (geometry description markup language), разработанный в CERN, для которого в GEANT4 и ROOT реализованы методы импорта и экспорта.

Вся геометрия установки создаётся в одном документе типа CATProduct. Объёму соответствует деталь, хранящаяся в файле типа CATPart. Форме соответствует главное тело детали, по умолчанию называемое PartBody. В CATIA не записывается описание материала так, как это принято в GEANT/ROOT, а сохраняется только имя материала в пользовательском параметре Material. Это возможно по той причине, что существует практика хранить описание материалов во внешнем файле или базе данных, считывать его перед выполнением моделирования и приписывать объёмам в соответствии с именами. Для обозначения физического объёма  $B$  внутри  $A$  в структуре документа, описывающего объём  $A$ , создаются тела Body. $A.*$ , где \* по умолчанию обозначает номер вхождения, но допускается запись любой идентифицирующей строки.

**Может быть частично перенести в описание методов описания геометрии в GEANT/ROOT.** Также в “Builder” предусмотрена возможность задания геометрии некоторыми продвинутыми методами, специфичными для GEANT/ROOT. В GEANT/ROOT существует тип объёвов, называемый Assembly, который характеризуется тем, что он не имеет формы и материала. Практически объём типа Assembly является контейнером без границ, который объединяет свои дочерние объёмы, что особенно удобно как

минимум в двух случаях. Во-первых, если необходимо многократно позиционировать группу объёмов, которую невозможно охватить простой формой. Во-вторых, если преобразование координат при позиционировании одного или группы объёмов имеет сложную структуру и удобно представить его как суперпозицию двух преобразований. Как частный случай можно упомянуть ситуацию, когда какой-либо параметр преобразования является параметром модели (см. секцию 2.2.2)

Один из плюсов “Builder” заключается в том, что пользователю предоставляется возможность работать с полноценной инженерной моделью и МС-моделью в одной и той же среде, имеющей широкие возможности для анализа и редактирования геометрии. “Builder” не ставит своей задачей перевод модели из одного геометрического представления в другой, но значительно ускоряет процесс создания одной геометрии, на основе другой. Также важно отметить, что подходы к геометрическому моделированию в САПР подразумевают широкое использование параметров — практически все размеры, значения поворотов и сдвигов, количество вхождений в массивы и прочие числа, определяющие форму и структуру модели, могут подвергаться изменению на любом этапе. Если в процессе построения модели этот принцип параметризированного моделирования нарушается, САПР предупреждает пользователя перед выполнением операции, которая приведёт к разрыву связи с параметром. В CATIA v5 при изменении каких-либо параметров геометрическая модель перестраивается интерактивно — от долей секунды до нескольких секунд в зависимости от сложности модели. Эта стандартная черта САПР очень удобна при работе с МС-моделями и отсутствует, например, в GEANT и ROOT.

“Builder” включает в себя файлы, в которых специальным образом построены примитивы GEANT/ROOT, позволяющие пользователю при построении МС-модели не вникать в подробности реализации, а использовать их практически как и в процессе создания геометрии средствами ROOT или GEANT. “Builder” также включает в себя макропрограммы для CATIA v5, которые также ставят своей задачей сделать процесс построения геометрии в “Builder” максимально похожим на процесс построения геометрии в GEANT или ROOT. Основной макрос — это конвертер “CATIA2GDML”, который проектирует дерево построения модели в CATIA в GDML файл. Также разработан обратный конвертер “GDML2CATIA” для импорта GDML файлов.

Целевая аудитория “CATIA-GDML geometry builder” — физики, владеющие CATIA v5 на базовом уровне, и инженеры, продвинутые пользователи САПР, изучившие способ представления геометрии в GEANT/ROOT хотя бы на теоретическом уровне.

**Есть опыт, который показывает, что для достижения такого уровня как физикам, так и инженерам, достаточно прохождения двухнедельного курса.**

Предлагается новый алгоритм работы, в котором “Builder” используется как многофункциональный инструмент. Описанный ниже алгоритм сформулирован на успешном опыте разработки CBM RICH на протяжении 3 (4) лет.

Задача создания и поддержания актуальной МС-модели поручается ответственному человеку, владеющему CATIA, GEANT/ROOT и “CATIA-GDML geometry builder”.

В зависимости от того, какая информация и в каких файлах имеется к началу работы, алгоритм немногого различается. Если разработка ведётся в нуля и нет никаких данных в ЭВМ, что возможно, например, когда проект находится на таком этапе, когда нужно выполнить грубое моделирование, показывающее принципиальную возможность реализации, то наиболее оптимальный способ — сразу строить МС-модель в CATIA средствами “Builder”. Если, скажем, проект находится на раннем этапе разработки и уже имеется какая-то приблизительная САПР модель, то рекомендуется импортировать её стандартными средствами CATIA, чтобы затем на её основе построить МС-модель в CATIA в автоматизированном режиме с помощью средств “Builder”. Инженерную геометрию можно импортировать практически из любой САПР, например с помощью широко распространённого формата STEP. Третий распространённый случай это когда уже имеется некоторая МС-модель в конечной системе моделирования. Как в GEANT4, так и в ROOT имеется стандартная возможность экспортierenовать геометрию в GDML файл без потери информации. Этую возможность могут наследовать все дочерние пакеты (как FairRoot и далее CbmRoot), но для этого необходимо явно активировать функциональность GDML. В этом случае можно импортировать модель в CATIA в МС-формате, однако иногда требуются некоторые дополнительные ручные операции после импорта. Они выполняются однократно и лишь делают структуру документа более оптимальной, но не изменяют геометрию.

Во всех этих алгоритмах, независимо от типа и количества исходных данных, получаются файлы CATIA в формате “Builder”, которые в дальнейшем будут являться основными (первичными) файлами для получения рабочей МС-модели в экспериментальном пакете, которым в случае CBM RICH является CbmRoot. Модель из CATIA экспортируется в GDML файл, который не требует каких-либо последующих изменений в структуре. Для достижения этого условия была проведена огромная работа по мере разработки МС-модели CBM RICH. Допускается и даже рекомендуется текстовое редактирование GDML файла, но только для изменения значений параметров в define секции у параметризованных моделей. Затем, по желанию коллaborации, GDML файл может быть конвертирован в бинарный ROOT-файл, который содержит геометрию, которую невозможно редактировать. Это защищает модель от случайных

изменений, что особенно актуально в случае параметризованных моделей. Соответственно, если требуется изменить значения параметров, пользователь может отредактировать GDML файл и экспортировать в новый ROOT файл. Практика показывает, что в случае, если требуется множество файлов с МС-геометрией, то обязательно нужно писать комментарии — либо в самом GDML файле, либо в текстовом файле рядом с GDML/ROOT файлом. Обычно в коллaborации вводят правила именования файлов.

### 2.2.1 Примитивы в “Builder”

Примитив можно построить стандартными средствами САПР, используя эскизы и формообразования, но в таком случае конвертер не сможет автоматически определить, является ли построенная форма примитивом и, если да, определить параметры примитива. По этой причине был разработан принцип хранения формы примитива в МС-модели с помощью средства CATIA v5, называемого User-Defined Feature (UDF), и средства для автоматизации создания примитивов — макросы «AddShape» и «Poly». Каждый примитив реализован в своём файле типа CATPart, в котором создаётся описание UDF, превращая этот файл в шаблон. Некоторые объекты модели, в случае примитивов — некоторые стандартные плоскости, и параметры модели объявляются «внешними». Далее в другом документе возможно создать вхождение формы, определённой в файле-шаблоне, вызвав соответствующее формообразование. При этом в текущем документе потребуется лишь выбрать необходимые элементы, с которыми будут совпадать «внешние» объекты шаблона, и задать значения параметрам создаваемого вхождения.

### 2.2.2 Макропрограммы для CATIA v5

Макропрограммы для CATIA v5 написаны на VBA с применением CATIA API. Все макропрограммы, кроме «AddShape» и «Poly», доступны пользователю в режиме работы над сборкой. В CATIA различают открытый документ (верхний в дереве в текущем окне), активный документ (синий), выделенный объект (оранжевый) и рабочий объект (подчёркнутый). Пользователь может выполнить все операции, необходимые для получения МС-модели, самостоятельно без применения макропрограмм, но в этом случае велика вероятность упустить какой-либо шаг, что приведёт к ошибке, которую сложно диагностировать.

В МС-модели в CATIA есть строгие правила именования. Применение макросов избавляет пользователя от необходимости контролировать имена объектов в документах. Все имена, генерированные при использовании “Builder” не конфликтуют между собой и позволяют получить корректный GDML файл на выходе. Практически везде пользователь имеет право изменять суффиксы, не изменяя основного названия, несущего информацию о типе объекта — формообразования, тела, и т.д. Однако в редких случаях суффикс имеет решающее значение, как например в именах поворотах (напр, “Rotate.X”) суффикс несёт информацию о оси поворота.

В процессе разработки “Builder” был выработан стандартный алгоритм создания геометрии. Первый шаг — создание нового документа типа CATProduct, который в дальнейшем будет единственным продуктом, и его сохранение на диск. Этот продукт будет представлять модель всей экспериментальной установки. Второй этап — наполнение продукта описанием объёмов без описания взаимосвязей между ними. Для этого используется макрос «AddNewPart», который автоматически открывает в отдельном окне новый документ типа CATPart, сформированный из специального шаблона и соответствующий создаваемому объёму. Система переходит в режим редактирования детали, где доступны только два макроса «AddShape» и «Poly» для создания формы объёма. Здесь же можно и задать имя материала объёма. По окончании редактирования нового объёма в отдельном окне пользователь должен сохранить активный документ и закрыть это окно. CATIA при этом возвращается к редактированию продукта. После того, как созданы объёмы, заданы формы и, возможно, имена материалов, алгоритм подразумевает задание иерархии объёмов, то есть позиционирование одних объёмов в других. Для этого в “Builder” существует целый ряд макропрограмм для создания различных типов взаимосвязей — «Inserter», «ArrayMaker», «Replica». После того, как выполнено размещение дочернего объёма *A* в материнском объёме *B*, пользователь может указать поворот и сдвиг, задающие матрицу позиционирования *A* в *B*. Для упрощения расчётов в некоторых случаях очень удобно применять макропрограммы «PointToPointAligner» («Pt2PtAligner»), «Mover» и «Measure». Для удобного редактирования материалов всех объёмов был разработан менеджер материалов «MaterialsManager», который обычно имеет смысл вызывать перед экспортом для проверки ранее заданных имён материалов, либо назначения новых. Также перед экспортом рекомендуется проверить модель на наличие ошибок с помощью макроса «Checker». В конце выполняется экспорт макросом «CATIA2GDML». Отдельно стоят макропрограммы «Duplicator» для создания множественных идентичных, но не связанных, параметризованных подсборок и обратный конвертер «GDML2CATIA» для импорта GDML файла.

Для комфортной работы с “Builder” в поставке также имеются файлы для настройки окружения CATIA. Использования окружения в принципе не обязательно, но часть функционала зависит от путей к файлам, которые прописаны в переменных окружения, поэтому настоятельно рекомендуется перед

использованием “Builder” выполнить настройку, следуя инструкции, поставляемой в пакете.

### AddNewPart

Данная макропрограмма автоматизирует создание нового документа типа CATPart на основе шаблона, содержащего необходимые элементы — публикация главного тела детали, называемая PartBody, пользовательский параметр под названием Material со значением по умолчанию ??? . Также для удобства погашены стандартные плоскости.

### AddShape

«AddShape» используется для создания примитивов, в случае необходимости вместе с поворотами и сдвигом. Макропрограмма играет роль интерфейса между пользователем и файлами примитивов. При запуске макроса выводится окно со списком доступных примитивов, по нажатии на кнопку “создать” в рабочее тело детали вставляется выбранный примитив со значениями параметров по умолчанию. Если на форме графического интерфейса выбраны флаги создания поворотов и сдвига, то создаются соответствующие формообразования.

### Poly

В силу ограничений CATIA нет возможности представить полипримитивы (polycone и polyhedra) с помощью тех же средств, что и остальные примитивы, поэтому для них была разработана специальная структура дерева и правила именования. Для автоматизации построения полипримитивов в соответствии с этой структурой предоставляется макрос «Poly». Секции поликонуса представлены стандартными конусами. В случае polyhedra для представления секции используется hedra — специальный примитив, не поддерживаемый GEANT/ROOT.

### Inserter

Макрос «Inserter» — это инструмент для помещения одного выбранного объёма в другой. Также можно сказать, что «Inserter» создаёт физический объём, задающий связь материнский-дочерний между двумя существующими логическими объёмами. «Inserter» — возможно, самый используемый макрос, в результате работы которого в документе типа CATPart, представляющем материнский объём, создаётся тело с именем “Body.B.\*”, где  $B$  — имя дочернего объёма. Внутри этого тела имеется ссылка на публикацию PartBody документа типа CATPart, представляющего объём  $B$ , и элементы преобразования типа Rotate и Translate — три поворота и сдвиг, задающие матрицу позиционирования  $B$  внутри  $A$ .

### ArrayMaker

Макрос «ArrayMaker» схож с «Inserter» по идеи и реализации. После выполнения вставки дочернего объёма в материнский, к созданному телу добавляется формообразование pattern вдоль указанной оси и с указанными шагом и количеством вхождений.

### Replica

Одна из продвинутых возможностей геометрической подсистемы GEANT/ROOT — это деление объёмов. В GEANT4 эта возможность называется replica, а в ROOT — division. Суть заключается в том, что допускается деление некоторого объёма путём разрезания через равные промежутки вдоль одной из четырёх осей —  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $\phi$ , где  $\phi$  — круговое направление. В результате деления получается набор одинаковых под-объёмов — долек, которые можно рассматривать как независимые вхождения одного объёма и позиционировать внутри другие объёмы. Отличие дольки от обычного объёма заключается в том, что для долек оптимизирована реализация проведения частиц. (??? сформулировать лучше) Деление возможно только для ограниченного числа форм, таких, что все доли имеют одинаковую форму. Box — в любом из трёх линейных направлений  $X$ ,  $Y$  или  $Z$ . Tubs — вдоль оси цилиндра, то есть вдоль линейной оси  $Z$ , или вдоль круговой оси  $\phi$ . Дальше продолжать???

За счёт того ограничения, что формы долек должны быть одинаковы, для описания разделённых объёмов в CATIA решено использовать тот же принцип, что и для описания массивов с тем отличием, что имя формообразования pattern должно соответствовать шаблону “Replica.Axis”, где Axis — ось реплицирования. За счёт этого ограничения, что долики должны заполнять всё пространство материнского объёма возможен автоматический расчёт геометрических размеров долек по двум входным параметрам — направлению деления и количеству.

## **PointToPointAligner**

«PointToPointAligner» автоматизирует процесс позиционирования дочернего объёма внутри материнского. При вложении одного объёма в другой необходимо задать положение дочернего объёма в материнском. В “Builder” для этого используется три формообразования типа Rotate — последовательные повороты вокруг трёх фиксированных стандартных осей Z, Y и X — и одно типа Translate — параллельный сдвиг. Пользователь должен каким-то образом рассчитать значения углов и координаты сдвига. Типовая процедура определения этих значений заключается в том, что пользователь использует стандартные средства CATIA для измерения углов и расстояний и затем вручную записывает эти значения в соответствующие параметры. В случае сложного поворота практически невозможно получить углы поворота прямым измерением, требуется активное интеллектуальное участие пользователя. Определение смещения, которое выполняется после всех поворотов, прямолинейно, но требует выполнения достаточно большого количества механических операций, которые автоматизированы в «PointToPointAligner».

Этот макрос предоставляет пользователю возможность выбрать две точки, которые совместятся при движении первой ко второй. Первая точка должна быть вершиной, принадлежащей телу, обозначающему дочерний объём — только в этом случае в макропрограмме представляется возможным определить, к кому телу принадлежит выбранная вершина, чтобы выбрать формообразования, описывающие матрицу позиционирования, которую необходимо изменить. Вторая точка может быть полученной в результате любой операции — это может быть как вершина тела, так и каркасный элемент. Для неё определяются только координаты, чтобы рассчитать сдвиг как разность координат двух точек.

## **Mover**

Нередко возникает такая ситуация, что требуется подвинуть группу дочерних объёмов внутри одного материнского на одинаковое расстояние. Если использовать существующие средства CATIA, то нет никакого способа выполнить этот сдвиг для нескольких объёмов сразу. В ручном режиме пользователю требуется осуществлять сдвиг для каждого объёма отдельно путём изменения значений параметров формообразования Translate, отвечающего за позиционирование дочернего объёма в материнском. Чтобы автоматизировать этот процесс был разработан «Mover». При использовании «Mover» пользователь выбирает какие дочерние объёмы он хочет подвинуть и на какое расстояние в графическом интерфейсе.

## **Measure**

Макропрограмма «Measure» автоматизирует процесс измерения и записи результата измерения в какой-либо параметр модели. Необходимость выполнения подобной операции особенно часто возникает при работе одновременно с исходной САПР моделью и разрабатываемой МС-моделью. Если требуется измерить какое-либо расстояние между объектами или размер какого-либо геометрического элемента, то пользователь может воспользоваться стандартными средствами CATIA “Measure between” и “Measure item” соответственно. В результате появляется окно с результатами измерения, обычно включая компоненты по координатам. Чтобы перенести эти результаты измерения куда-либо необходимо выделить и скопировать значение из поля, закрыть окно измерения, найти параметр в МС-модели, открыть его для редактирования и вставить в качестве значения содержимое буфера обмена. При использовании «Measure» список параметров модели отображается в окне графического интерфейса. Пользователь сначала выбирает тип измерения, затем выбирает измеряемые объекты в области геометрии. Результаты измерения выводятся в окне графического интерфейса и для того, чтобы записать выбранный результат в какой-либо параметр МС-модели, достаточно выбрать его в списке параметров.

## **MaterialsManager**

Приложение «MaterialsManager» предоставляет пользователю возможность изменять материалы отдельных объёмов, находясь на уровне верхнего продукта. Это избавляет от необходимости часто переключаться между документами либо режимами работы в случае контекстного редактирования. Также заметным преимуществом использования «MaterialsManager» является наглядность — информация о материалах всех объемов представляется в компактном списке, присутствует возможность быстро изменять значения в нескольких элементах списка. Помимо этого, наличие «MaterialsManager» позволяет отложить работу с материалами на последний этап. Использование шаблона файла детали предотвращает от того, что пользователь вообще не укажет материал объема — по умолчанию указан ??? .

## **Checker**

Чтобы ускорить процесс моделирования необходимо отлавливать ошибки на как можно более раннем этапе. Макрос «Checker» позволяет выполнять проверку правильности построенной пользователем МС-

модели в CATIA до экспорта в GDML, таким образом сокращая время отладки, которое ушло бы на экспорт геометрии в GDML, импорт в GEANT/ROOT и запуск проверки в конечной системе. Необходимость проверки возникает в силу того, что в разработанной структуре документов CATIA для МС-модели введено множество правил и ограничений, нетипичных для ??? conventional использования системы. «Checker» выполняет 2 типа проверок. Первый — корректность с точки зрения конвертера, т.е. соблюдение структуры документов, правильность именования, второй — корректность с точки зрения правил построения геометрии в GEANT/ROOT.

Использование разработанных интерактивных приложений ограждает пользователя от ошибок именования в итоговой МС-модели. Есть только одно место, где необходимо вручную указывать имя — формообразование-вращение при позиционировании операнда на уровне формы (??? уточнить). В любом случае, пользователь вправе редактировать модель не применяя макросы — это ускоряет процесс в некоторых случаях, но повышает вероятность нарушения правил именования. Принципиальные ошибки в структуре документов МС-модели с большой долей вероятности приведут к некорректному завершению «Checker», потому что практически невозможно автоматически их проверять.

Корректность геометрии определяется по двум критериям:

1. любые два объёма, находящиеся на одном уровне, не должны пересекаться;
2. любой дочерний объём не должен выходить за пределы материнского объёма.

Чтобы организовать проверку указанных условий, разработан специальный алгоритм и реализован в виде отдельной макропрограммы «Checker» САПР CATIA. В цикле перебираются все пары объёмов, лежащих на одном уровне, и проверяется, не пусто ли множество пересечения текущей пары. В том случае, если не пусто, то возникает событие, оповещающее, что текущая пара объёмов расположена недопустимым образом.

Более детально описанный процесс выглядит следующим образом. В силу того, что физические объёмы описываются телами детали, перебор объёмов, лежащих на одном уровне, сводится к перебору всех тел детали, кроме PartBody. Чтобы исследовать множество пересечения пары тел, создаётся новое пустое тело и копии исходных. Затем применяется Булева операция Intersect над копиями, и результат заносится в ранее созданное пустое тело. На этапе выполнения формообразования булевой операции выдаётся возможность отследить корректность результата. С точки зрения CATIA пустое пересечение является ошибочным результатом и возникает внутренняя ошибка. Именно программный отлов и обработка этой ошибки говорит о корректности расположения объёмов. После выполнения булевой операции результирующее тело удаляется, не оставляя таким образом никаких следов промежуточных преобразований.

Для того чтобы отследить, не выходит ли объём за пределы материнского объёма, применяется схожий подход. Отличие заключается в последовательности булевых операций — вместо пересечения  $A * B$  двух объёмов  $A$  и  $B$  проверяется объём, полученный последовательностью двух операций  $(A + B) - A$ , где  $A$  — материнский объём, а  $B$  — дочерний. Присутствие результата операции  $(A + B) - A$  говорит о том, что какая-либо часть дочернего объёма расположена за пределами материнского.

## CATIA2GDML

Конвертер «CATIA2GDML» проецирует дерево построения МС-модели из CATIA v5 в GDML файл. За счёт того, что правила построения МС-модели в CATIA формулировались с ориентиром на структуру, принятую в GEANT/ROOT, базовый функционал прямого конвертера заключается в том, что он создаёт в выходном GDML файле сущности, соответствующие найденным объектам в дереве построения в CATIA. Важной особенностью является то, что конвертер не обращается к самой геометрии, вся необходимая информацию содержится в дереве построение модели.

Помимо прямолинейного отображения дерева модели в GDML, в «CATIA2GDML» осуществляется преобразование некоторых особенностей, введённых в CATIA для упрощения процесса моделирования. Так, например, для отображения массива (см. ?? ???), которого нет в возможностях GDML, макрос рассчитывает повороты и положения каждого вхождения и создаёт независимые дочерние объёмы в GDML. В случае линейный массивов задача проста. Описание ??? В случае круговых массивов расчёт выполняется с применением матричных преобразований, обсуждаемых в 2.2.3.

В дереве CATIA нет обособленного списка используемых в модели материалов, поэтому для создания такого в GDML выполняется нехитрый алгоритм, который при проходе в цикле по объёмам добавляет в выходной список имя материала, если такого ещё нет.

В “Builder” реализована возможность переноса цвета объёма с помощью вспомогательного тега auxilliary в GDML файле, который позволяет добавлять произвольное поле данных к описанию логического объёма. Цвет тела в CATIA никак не отображается в дереве, поэтому для формирования тега при экспорте модели опрашиваются параметры визуализации главного тела PartBody детали, содержащие в том числе и цвет.

## GDML2CATIA

«GDML2CATIA» выполняет процедуру, обратную «CATIA2GDML» — проецирует GDML файл на дерево модели CATIA v5. В “Builder” есть возможность задавать линейные и круговые массивы — многократные вхождения дочернего объёма в материнский, позиционированные с некоторым шагом вдоль линейной или круговой оси соответственно. В МС-модели в CATIA для массивов применяется соответствующее стандартное формообразование pattern. Такая возможность отсутствует в GDML, поэтому при экспорте из CATIA в GDML выполняется расчёт поворотов и сдвигов для каждого элемента массива и они представляются как отдельные, независимые дочерние объёмы. Таким образом при конвертации в обратном направлении, из GDML в CATIA, невозможно восстановить массив. Следовательно, одна из немногих (единственная ???) операций, которые необходимо совершать после импорта геометрии из GDML в CATIA — ручной перевод множества дочерних объёмов в массив. Обычно это очень простая процедура, и заключается она в том, что удаляются все вхождения, кроме первого, и в список формообразований первого тела добавляется pattern, которому задаются необходимые параметры и имя.

Аналогично прямому конвертеру, для передачи цвета автоматически выполняется дополнительная операция присвоения параметров визуализации тела если в GDML встречается тэг auxilliary.

## Параметризация

Одна из наиболее важных возможностей “CATIA-GDML geometry builder” — это возможность создания параметризованных геометрических МС-моделей. У параметризованной модели имеются входные параметры и формулы, задающие зависимость между этими входными параметрами и внутренними переменными, такими как параметры примитивов, значения поворотов и смещений. Данная концепция хорошо ложится на методы работы с геометрией в САПР, особенно CATIA v5. Также параметризация поддерживается форматом GDML и импортёрами GEANT4(???) и ROOT.

В модели CATIA v5 можно вводить пользовательские параметры как в документах типа CATProduct, так и в документах типа CATPart. Причём сборка в CATProduct файле может иметь свои пользовательские параметры и формулы, а дочерние компоненты в CATPart файлах — свои. Обязательное требование “Builder” таково, что все параметры и формулы должны находиться в верхнем продукте. CATIA v5 позволяет задавать зависимости между любыми параметрами, в том числе внутренними, не являющимися пользовательскими, однако для успешного экспорта в GDML файл формула должна в левой части иметь параметр примитива или угол поворота или значение сдвига, а в правой части — формулу только над пользовательскими параметрами. Пользовательский параметр CATIA v5, экспортируемый в переменную в GDML должен обязательно иметь безразмерный тип Real. В связи с этим имеются правила оформления формул и приведения единиц измерения. Также имеется стандартная переменная DEGtoRAD для перевода значения углов из градусов в радианы.

На выходе получается GDML файл, у которого в define секции есть тэги variable, обозначающие входные параметры модели со значениями. При импорте параметризованной геометрии из GDML в ROOT все значения внутренних переменных рассчитываются в соответствии с формулами по значениям входных параметров и параметризация теряется. Следовательно значения входных параметров должны задаваться пользователем непосредственно в GDML файле перед импортом в конечную систему.

## Duplicator

Создание МС-модели более-менее сложной экспериментальной установки обычно требует создания нескольких вхождений параметризованных подборок с разными значениями параметров. Можно привести следующий пример. Рассмотрим детектор, состоящий из однотипных модулей, содержащих массив чувствительных объёмов (сенсоров), и какие-то другие элементы, например, платы передней электроники. Предположим, что существует несколько типоразмеров модулей, отличающихся количеством и размером сенсоров. Таким детектором может быть, например, калориметр, построенный из нескольких типов модулей, отличающихся гранулярностью — размер чувствительного объёма увеличивается по мере удаления от пучка. Очевидно, что если типы модулей отличаются лишь значениями каких-либо переменных, то представляется возможным построить одну параметризованную модель модуля, чтобы дальше использовать её многократно для построения всего детектора. К сожалению в GEANT/ROOT нет возможности так сделать — нужно для каждого типа иметь отдельное определение геометрии. Также это невозможно и в GDML и в CATIA.

В модели для каждой комбинации параметров, то есть для каждого модуля в нашем примере, должна существовать отдельная параметризованная подсборка. При этом имена всех объёмов должны отличаться, а наборы параметров для каждого модуля должны быть независимы. В CATIA нет возможности быстро создать копию подсборки вместе со всеми параметрами и зависимостями.

Для того, чтобы автоматизировать процесс создания такой копии используется «Duplicator». Работа с «Duplicator» выполняется в 2 этапа.

???

### 2.2.3 Избранные подробности реализации “CATIA-GDML geometry builder”

Каждый макрос “Builder” — это VBA проект, который хранится в отдельном catvba файле. Проект состоит из трёх разделов — элементы графического интерфейса (формы), модули и модули классов. Большинство макросов “Builder” написано в соответствии с идеологией структурного программирования, без применения классов, и разделение на модули выполнено из соображений читаемости кода. Обычно в отдельный модуль выносился функционал, объединённый некоторой задачей. Так, например, во многих макросах имеется модуль ??? (имя) для продвинутой работы со строками, модуль ??? (имя) для ??? (задача). В некоторых случаях естественным образом требовалось использовать классы. Так, например, был реализован класс матрицы с методами нахождения углов поворота, который использовался в ??? и более подробно описан в 2.2.3.

**Работа с матрицами позиционирования в “CATIA-GDML geometry builder”**

## 2.3 Применение “CATIA-GDML geometry builder” к CBM RICH

Значительная часть работы над “Builder” выполнялась при поддержке группы CBM RICH, поэтому самая сложная МС-модель построенная с помощью “Builder” это CBM RICH. Построенная за несколько итераций модель имеет достаточно сложную иерархию и характеризуется высокой степенью подробностей.

Для того, чтобы GDML без проблем импортировался в CbmRoot было написано дополнение.

Геометрическая МС-модель детектора RICH эксперимента CBM имеет многоуровневую структуру, в основном обоснованную физической структурой сборки, но иногда и ??? бывает неочевидной и неестественной с целью повышения эффективности проведения частиц.

На момент написания данной работы инженерный проект не был завершён — некоторые узлы были проработаны достаточно подробно и прошли несколько этапов уточнения, в которых модель менялась принципиально. В то же время некоторые узлы существуют лишь на концептуальном уровне. В первую очередь к ним относится форма и конструкция корпуса детектора, проектирование которой не составляет особого труда и может быть отложена на более поздний этап. Большая часть корпуса не оказывает влияния на эффективность детектора, т.к. лежит за пределами геометрического аксептанса, поэтому допускается моделирование физики детектора с упрощённой моделью корпуса, либо вообще без него.

В детекторе RICH можно выделить несколько подсистем — фоточувствительная камера, магнитный экран вокруг камеры, зеркала, система опор зеркал, часть ионопровода в RICH, корпус детектора. Рассмотрим реализацию каждой подсистемы в МС-модели, построенной с помощью “CATIA-GDML geometry builder”.

### 2.3.1 Фоточувствительная камера

Планируется, что фоточувствительная камера CBM RICH будет составлена из модулей, содержащих  $2 \times 3$  МА ФЭУ Hamamatsu H12700, см. рис. 2.3. Один такой МА ФЭУ имеет габариты  $52 \times 52 \text{ мм}^2$ , между МА ФЭУ оставляется зазор 1 мм для запаса по точности, таким образом размер модуля составляет  $158\text{мм} \times 105\text{мм}$ .

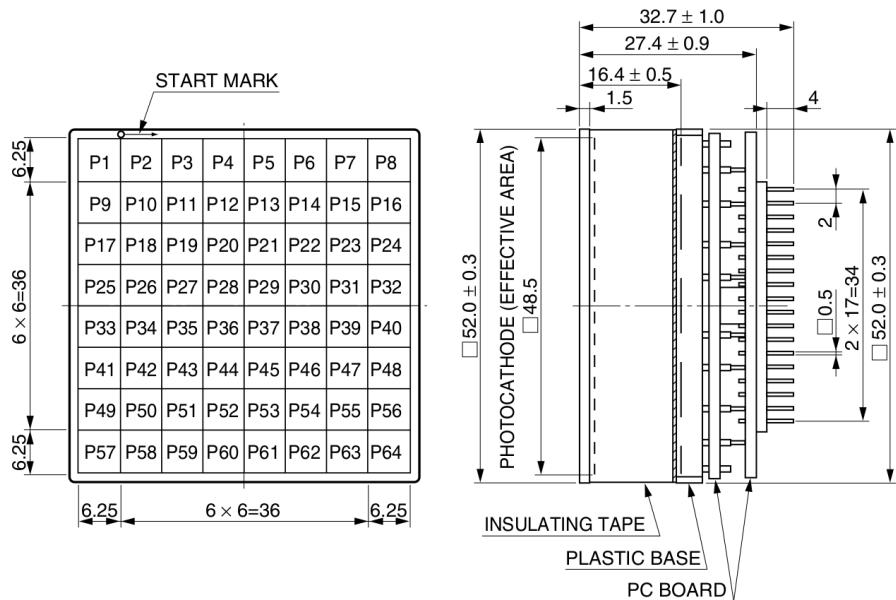


Рис. 2.3: Чертёж МА ФЭУ H12700 из документации.

В момент написания данной работы ведётся работа по проектированию модуля, разработке программ для FPGA, но имеются изготовленный прототип. Помимо МА ФЭУ в модуль входят 12 плат передней электроники DIRICH, одна плата, обеспечивающая питание, и одна плата концентрации данных. В основе модуля лежит плата-адаптер, к которой с одной стороны подсоединяются МА ФЭУ, а с другой — все платы. CAD-модель и MC-модель модуля показаны на рис. 2.4.

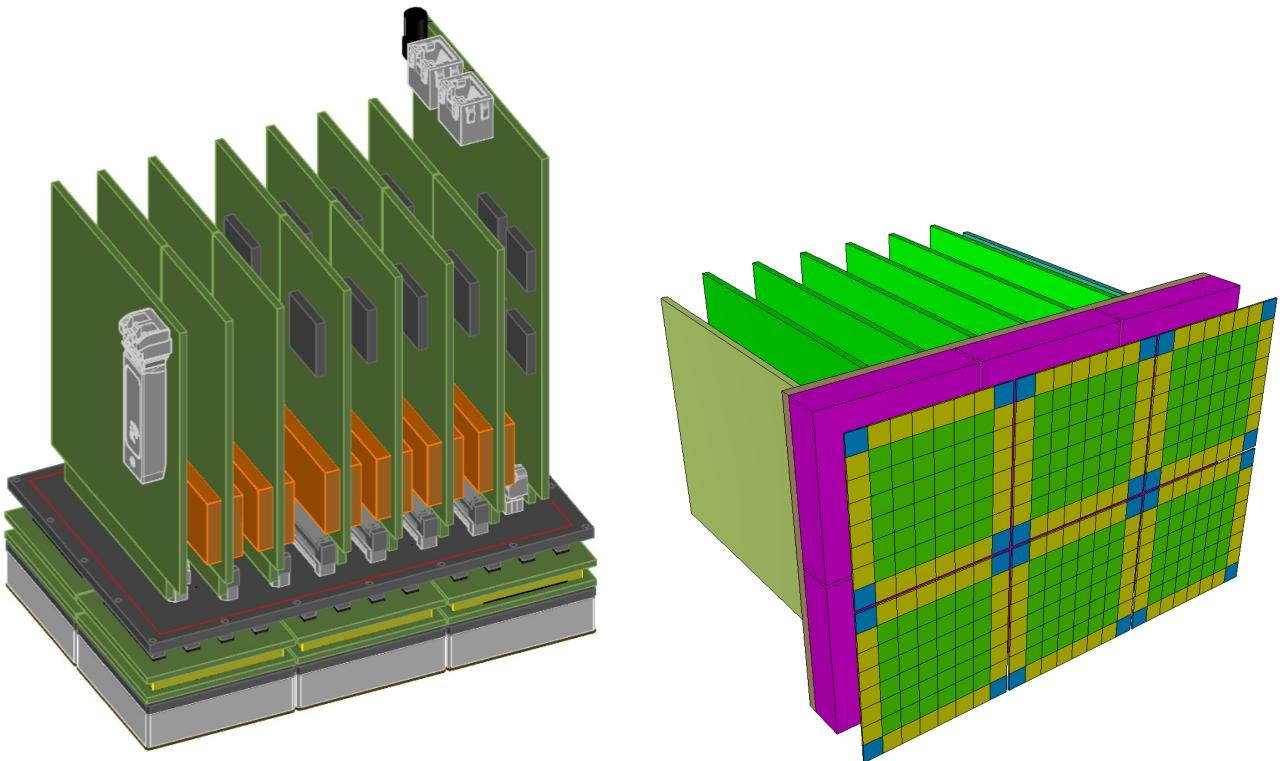


Рис. 2.4: CAD-модель (слева) и MC-модель (справа) модуля фоточувствительной камеры CBM RICH.

Иерархия объёмов, моделирующих модуль фоточувствительной камеры CBM RICH приведена на рис. 2.5.

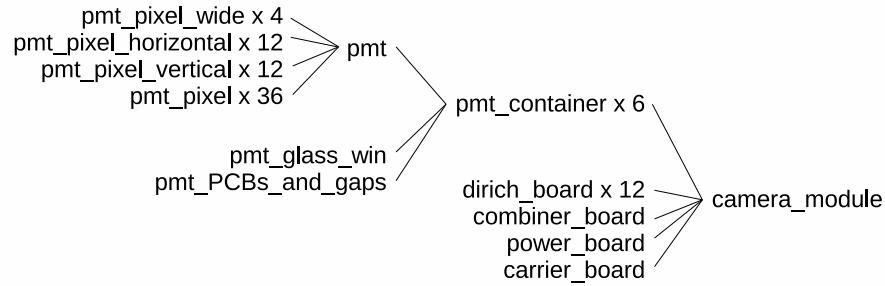


Рис. 2.5: Иерархия объёмов, моделирующих модуль фоточувствительной камеры CBM RICH.

МА ФЭУ моделируется до уровня пикселей. Это позволяет максимально приблизить моделирование прохождения частиц в CbmRoot и обработку реальных данных. В соответствии с документацией, у МА ФЭУ H12700 пиксели имеют разные размеры (см. рис. 2.3): угловые пиксели (№№ 1, 8, 57, 64)  $6.25\text{мм} \times 6.25\text{мм}$ , пиксели по краям, кроме угловых, —  $6.25\text{мм} \times 6\text{мм}$ , остальные, центральные пиксели —  $6\text{мм} \times 6\text{мм}$ . Для того, чтобы представить три типа пикселей в MC-модели, необходимо три отдельных объёма, имеющих разную форму. Чтобы сделать модель максимально понятной и гибкой принято решение отделить пиксели из крайних горизонтальных рядов от пикселей из крайних вертикальных рядов и моделировать их с помощью двух разных объёмов размером  $6\text{мм} \times 6.25\text{мм}$  и  $6.25\text{мм} \times 6\text{мм}$  соответственно. Это позволит позиционировать все пиксели без поворотов.

Таким образом вводится три объёма: *pmt\_pixel\_wide* для угловых пикселей, *pmt\_pixel\_horizontal* для пикселей в крайних горизонтальных рядах, *pmt\_pixel\_vertical* для пикселей в крайних вертикальных рядах и *pmt\_pixel* для всех остальных пикселей, расположенных в центральной зоне. Все 4 объёма имеют форму примитива box с толщиной вдоль оси Z, равной 0.5мм, материал CsI, который в данный момент используется в моделировании как активный материал для фоточувствительных элементов. Толщина выбрана произвольно, она не имеет значения, т.к. из-за того, что материал объёма активный, т.е. объём объявлен чувствительным, система проведения частиц будет вырабатывать сигнал о пересечении треком границы объёма и передавать управление методу *ProcessHits* класса детектора *CbmRich*. В реализации этого метода вырабатывается Point, причём физика не оказывает никакого влияния. Даже если толщина объёма слишком маленькая, чтобы произошло какое-либо взаимодействие, флаг активности обязывает систему вызывать *ProcessHits*.

Объём *pmt* соответствует части МА ФЭУ, включающей в себя фотокатод (пиксели) и динодную систему, и имеет толщину  $16.4 - 1.5 = 14.9\text{мм}$ . Входное стеклянное окно МА ФЭУ моделируется отдельным объёмом *pmt\_glass\_win*, имеющим толщину 1.5мм. Пространство за динодной системой, включающее в себя печатные платы и ножки в воздушном пространстве, моделируется объёмом *pmt\_PCBs\_and\_gaps*. Все части МА ФЭУ, моделируемые перечисленными объёмами, вставляются в контейнер *pmt\_container*.

Платы передней электроники, питания, концентрации данных и палата-адаптер моделируются объёмами, имеющими форму box и одинаковый материал, — *dirih\_board*, *power\_board*, *combiner\_board*, и *carrier\_board* соответственно. Объём *camera\_module* выполняет роль контейнера, в который помещаются МА ФЭУ и платы. Далее составляется вертикальный массив из ??? 7 модулей, называемый *camera\_strip*.

В процессе разработки детектора сначала рассматривался вариант фоточувствительной камеры, состоящей из 4 плоскостей, расположенных симметрично относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей, проходящих через ось пучка. Исследовались разные варианты комбинаций размера, поворотов и положения четверти с целью нахождения оптимальных значений с точки зрения эффективность всего детектора. ??? ссылка на несуществующую секцию, где обсуждается эта оптимизация. Одна итерации такой оптимизации заключается в запуске полного моделирования и анализа и является достаточно времязатратной процедурой.

В настоящее время прорабатывается вариант, в котором верхняя и нижняя половины фоточувствительной камеры составлены из сегментов шириной в один модуль и аппроксимирующих поверхность цилиндра. Радиус, повороты и положение цилиндра также получены в результате оптимизации.

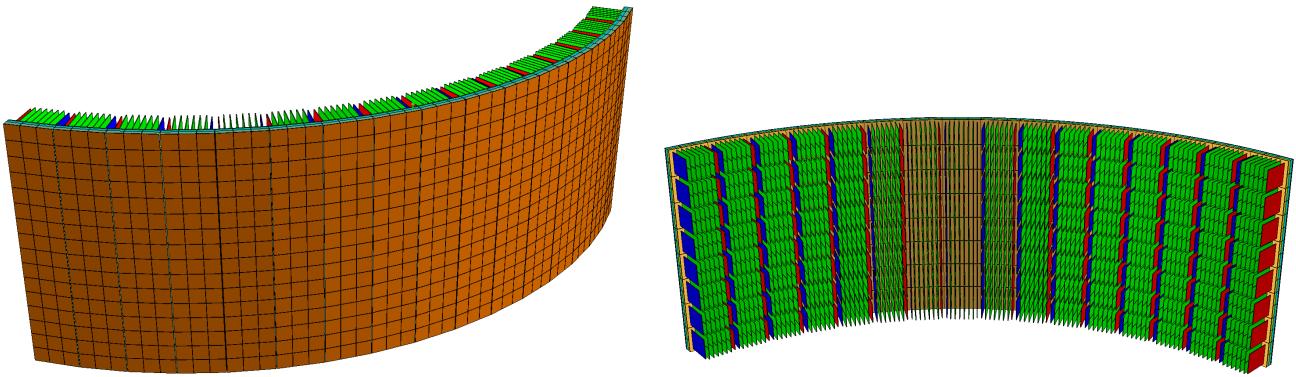


Рис. 2.6: МС-модель фоточувствительной камеры СВМ RICH. На рисунке показаны платы электроники, но не показаны отдельные пиксели МА ФЭУ.

### 2.3.2 Фокусирующая система — сферические зеркала

На раннем этапе проектирования СВМ RICH исходя из доступного пространства в общей экспериментальной установке было рассчитано, что фокусирующая система СВМ RICH должна иметь одно сферическое зеркало радиусом 3 метра, разделённое на две половины. Технологически возможно изготовить такое зеркало из сегментов. Рассматривались варианты изготовления различными компаниями, прототипы исследовались на ???, в итоге остановились на ??? . Сегмент зеркала будет иметь размер около 40см×40см. (точное значение указать невозможно, это же не прямоугольник)

Основная задача зеркал — отвести черенковские фотоны в область, где они могут быть зарегистрированы фоточувствительной камерой, которую невозможно расположить напрямую на пути этих фотонов, т.е. в геометрической аксептансе. Это сделать работу последующих детекторов невозможным из-за вторичных частиц. Вообще есть целое направление, в котором люди занимаются тем, что оценивают и обычно стараются минимизировать material budget.

В СВМ RICH каждый сегмент зеркал будет крепиться на раме с помощью трёх ??? моторизированных актуаторов с удалённым управлением. Это позволяет корректировать положение отдельных сегментов, корректируя отклонения от правильного положения, связанные с перемещениями точек механической опоры, находящейся в напряжённо-деформированном состоянии под собственным весом и весом зеркал. Также возможны перемещения в связи с термическим расширением рамы при изменении параметров окружающей среды в экспериментальном зале.

Коллаборациями LHCb и COMPASS разработаны методы ??? , позволяющие выполнять... Для анализа в моделировании необходимо обеспечить возможность поворота отдельных долей зеркал вокруг заданных осей. В связи с этим была построена версия МС-модели, отличающаяся структурой объёмов и обеспечивающая возможность поворота отдельных долей зеркал вокруг заданных осей. Эта модель обсуждается в 2.3.2.

#### МС-геометрия фокусирующей системы с возможностью задания индивидуальных отклонений

## Глава 3

# Развитие DAQ эксперимента СВМ

### 3.1 Фотоэлектронный умножитель

Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фирмы Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризован в работах [17, 18]. Он обладает следующими достоинствами: большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочувствительные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время прохождения однофотоэлектронного сигнала через динодную систему, малый разброс этого времени от события к событию, низкие перекрёстные помехи и низкая скорость счета тепловых электронов. Некоторые свойства данного прибора показаны в табл. 3.1, по большинству параметров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ H8500 [19].

Таблица 3.1: Свойства МА ФЭУ H12700B-03.

Темновой счёт на канал, Гц	Темновой счёт на весь МА ФЭУ, кГц	Время нарастания сигнала, нс	Разброс времени развития электронной лавины, нс
≈ 10	<1.0	0.64	0.28

Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чувствительность МА ФЭУ в версии H12700B-03, используемой в настоящей работе, соответствует конфигурации с входным стеклом, прозрачным в ультрафиолетовой области.

Коротковолновая граница спектра чувствительности  $\lambda_{min}=185$  нм, а максимум квантовой эффективности составляет 33% и достигается при длине волны  $\lambda=380$  нм. Такие спектральные характеристики хорошо подходят для регистрации черенковского излучения, лежащего в ультрафиолетовой области. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов усиления в каналах от среднего значения не превышает 16% [16]. Разброс квантовой эффективности между пикселями по нашим данным составляет  $\pm 10\%$ .

Имеются исследования [20, 21, 22], показывающие, что радиационная стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте СВМ. Также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном поле до 2.5 мТл [17] без значительного падения характеристик. Использование магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетектора в пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использования в эксперименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют интерес и другие эксперименты, например, он рассматривается и для обновления LHCb [17].

Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ H12700B-03 имеет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных ФЭУ и требующие особого внимания при реализации канала считывания. Размножение электронов в динодной системе происходит в одном и том же вакуумном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный объем динодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 3.1, отличается тем, что она довольно компактна, едина для всех каналов и позволяет добиться отличных временных свойств. Электронные лавины, соответствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через динодную систему. Имеют место такие эффекты как выбивание электронов из динодов фотонами, прошедшими сквозь фотокатод, и отклонение электронов от идеальной траектории за счет разброса энергий. Последняя особенность приводит к попаданию электронов на последующие стадии динодной системы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или части электронной лавины в соседний канал. Перетекание части лавины в соседний канал имеет место в более чем 25% случаев при равномерном освещении всего фотокатода. Величина перетекающего заряда составляет от 3% до 7% в зависимости от взаимного расположения пикселей [17]. Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьётся в соседнем канале зависит от взаимного расположения каналов и составляет при равномерном

освещении от 0.1% до 2% [23]. Кроме того, при наличии относительно большого сигнала в одном из каналов, наблюдается биполярная наводка в каналах, расположенных в том же ряду. При интегрировании этой наводки возможно формирование низкоамплитудных импульсов в нескольких каналах. В классическом ФЭУ такие эффекты отсутствуют из-за отсутствия связи с соседними каналами, наличия развитой системы фокусировки и такой конструкции динодной системы, что диноды имеют большую площадь и последующие стадии полностью экранируются предыдущими.

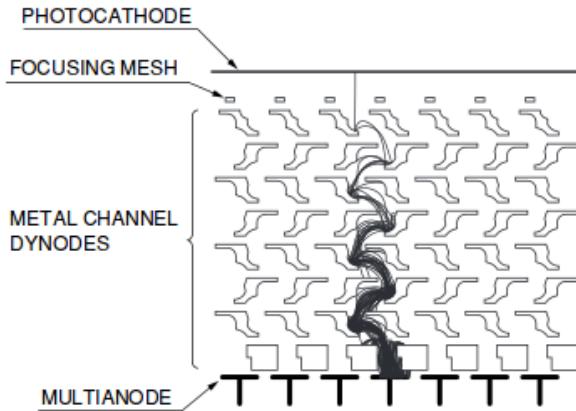


Рис. 3.1: Схема динодной системы типа “Metal Channel”.

Описанные особенности приводят к формированию в одноэлектронном спектре низкоамплитудной части, сливающейся с шумами и отделенной от основного пика довольно глубокой ложбинкой. Проявления этого эффекта в наших измерениях обсуждаются в секции 4.8.

## 3.2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH

### 3.2.1 64-канальный модуль считывания

Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифровки данных CBM RICH может быть сгруппирована в 64-канальные модули, каждый из которых соответствует одному многоанодному фотоэлектронному умножителю (МА ФЭУ). Схема 64-канального модуля показана на рис. 3.2. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату TRB v3.

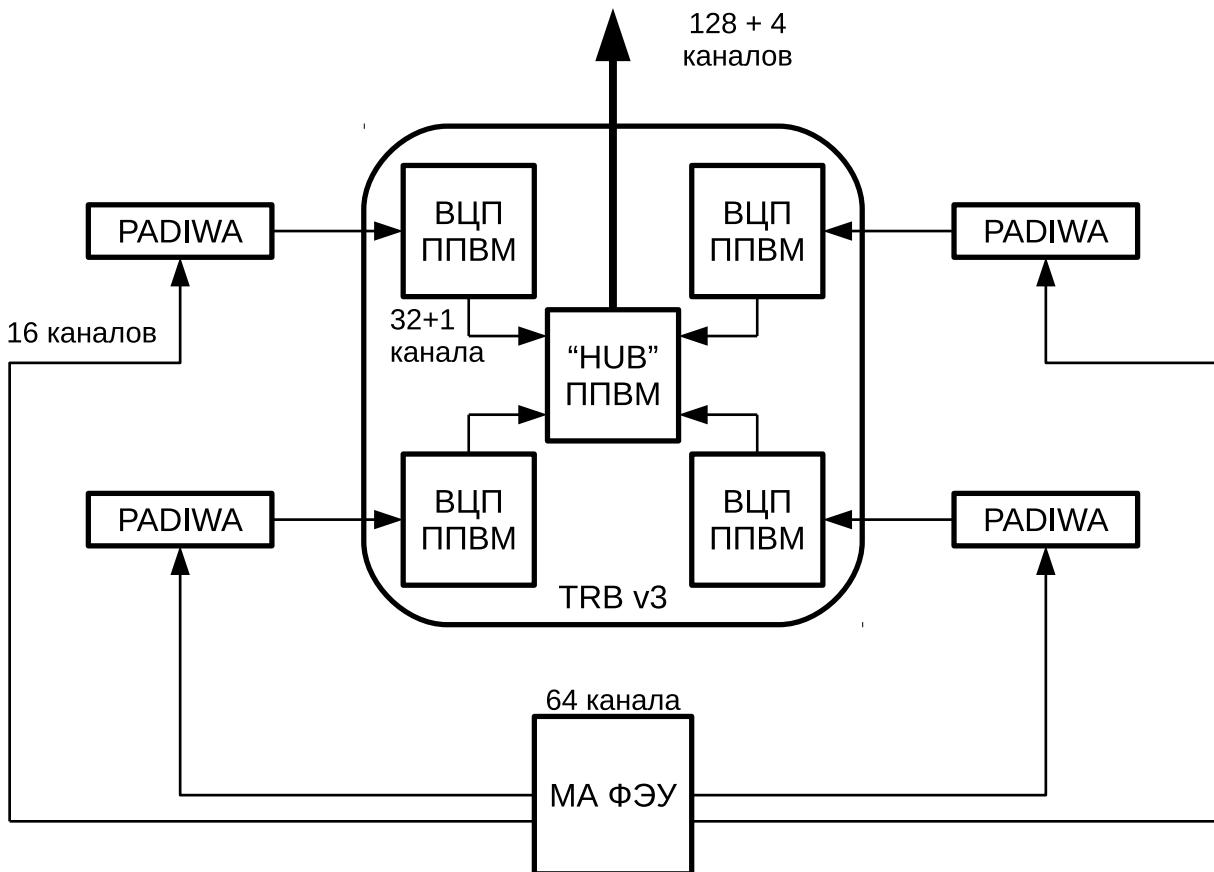


Рис. 3.2: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [24]. Общий вид платы PADIWA показан на рис. 3.3. Плата устанавливается на МА ФЭУ через плату-адаптер, единственным назначением которой является соединение анодов МА ФЭУ с соответствующими входами PADIWA. С одной стороны печатной платы PADIWA расположены 16 сигнальных входов с импедансом 100 кОм. На каждый вход приходится два контакта — земля и сигнал. Они чередуются таким образом, чтобы можно было подключить PADIWA к плате-адаптеру любой стороной. Каждый канал PADIWA имеет собственный фильтр низких частот с полосой пропускания около 100 МГц и предусилитель, которые образуют аналоговую часть канала. После усиления сигнал поступает в программируемую пользователем вентильную матрицу (ППВМ). Обычно ППВМ применяются для обработки цифровых (логических) сигналов, однако, в нашем случае на входные цифровые линии подаётся аналоговый сигнал. В ППВМ для каждой входной линии можно задать свой порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким образом, настраиваемые входы ППВМ могут использоваться как дискриминаторы. На выходе каждого канала формируется логический ноль, когда входной сигнал в этом канале ниже установленного порога, и логическая единица, когда входной сигнал выше этого порога, см. рис. 3.4. Далее расположены выходные порты и порты настройки ППВМ, объединённые в разъём, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для управления платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS линий — выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен стандартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого имеется датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика могут использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев, если такая возможность заложена в программе ППВМ.

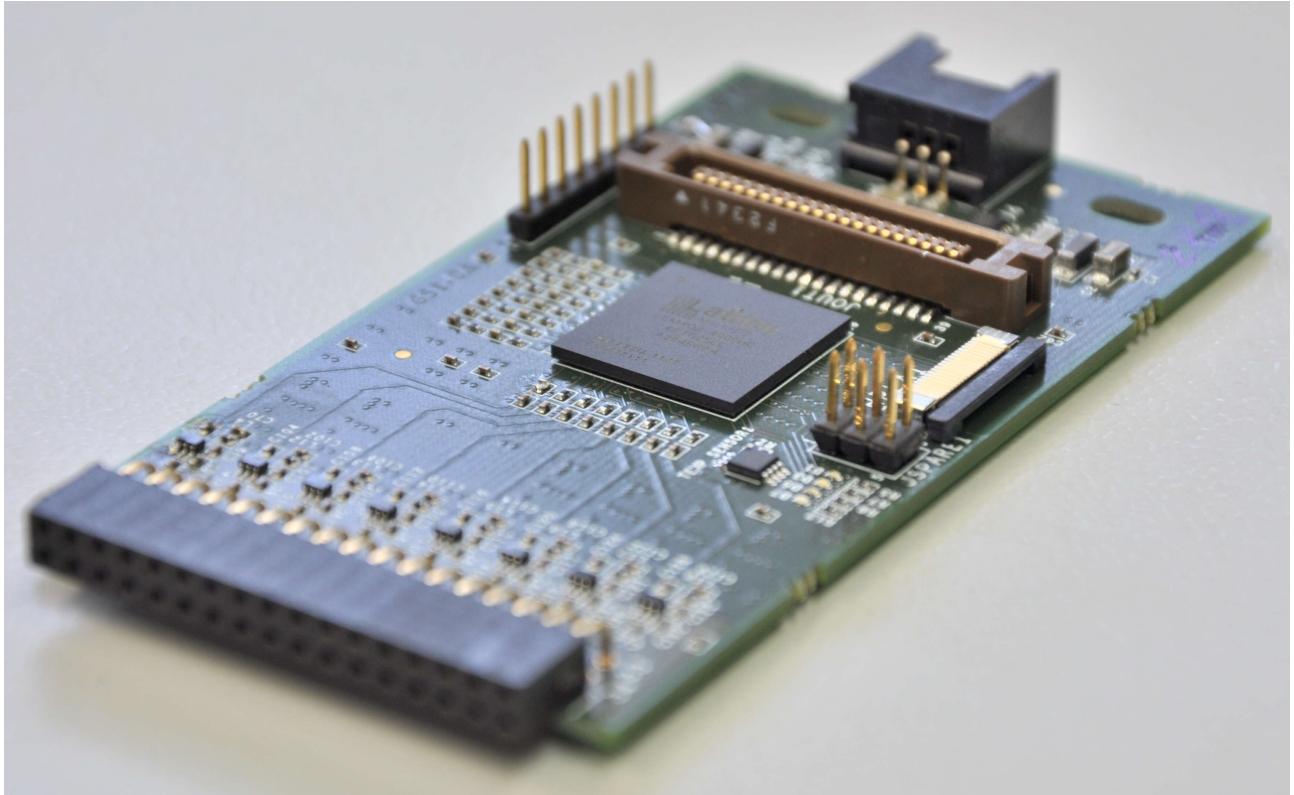


Рис. 3.3: Общий вид платы PADIWA.

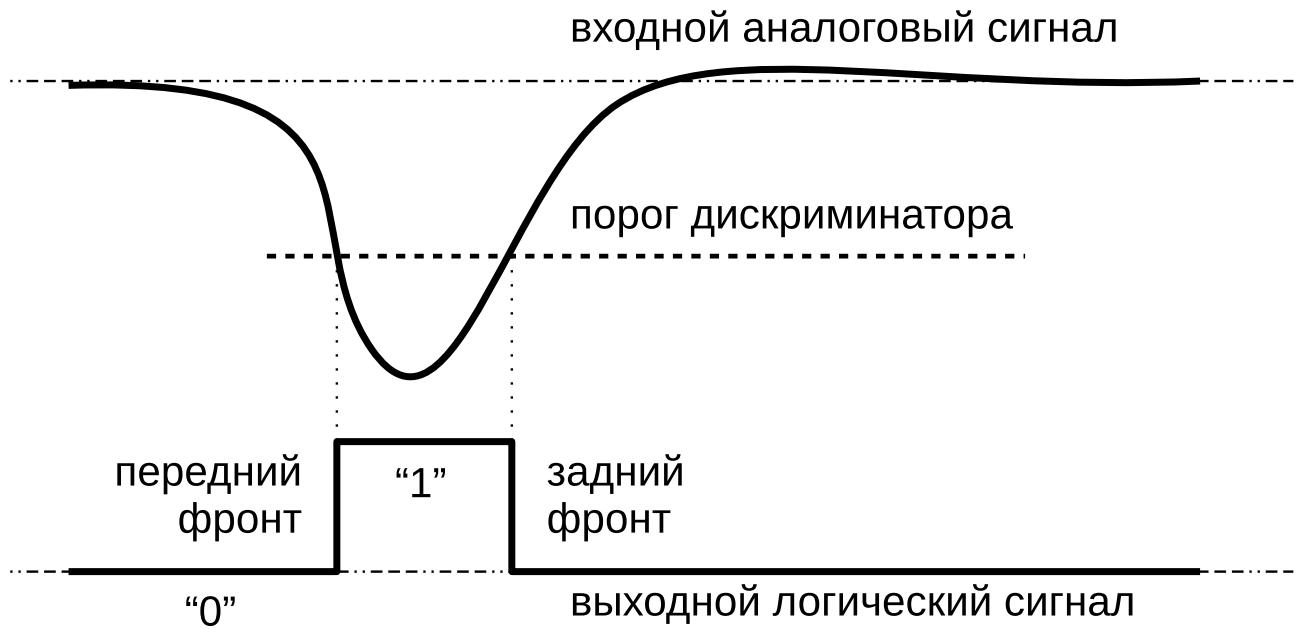


Рис. 3.4: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППВМ, каждую из которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 центральную ППВМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППВМ запрограммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а центральная ППВМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию платы будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

Выходные логические LVDS сигналы со всех 16 каналов платы PADIWA поступают в одну из периферийных ППВМ платы TRB v3, где каждый входной канал разветвляется на два канала ВЦП — первый чувствителен к переднему фронту, второй — к заднему. К получившимся 32 каналам в каждой перифе-

рийной ППВМ добавляется канал синхронизации. Таким образом, на выходе всей платы TRB v3 имеются 132 канала.

Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 3.5. Рядом с каждой периферийной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоединить платы расширения. В частности, существует специальная плата расширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате TRB v3 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые используются для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с компьютером.

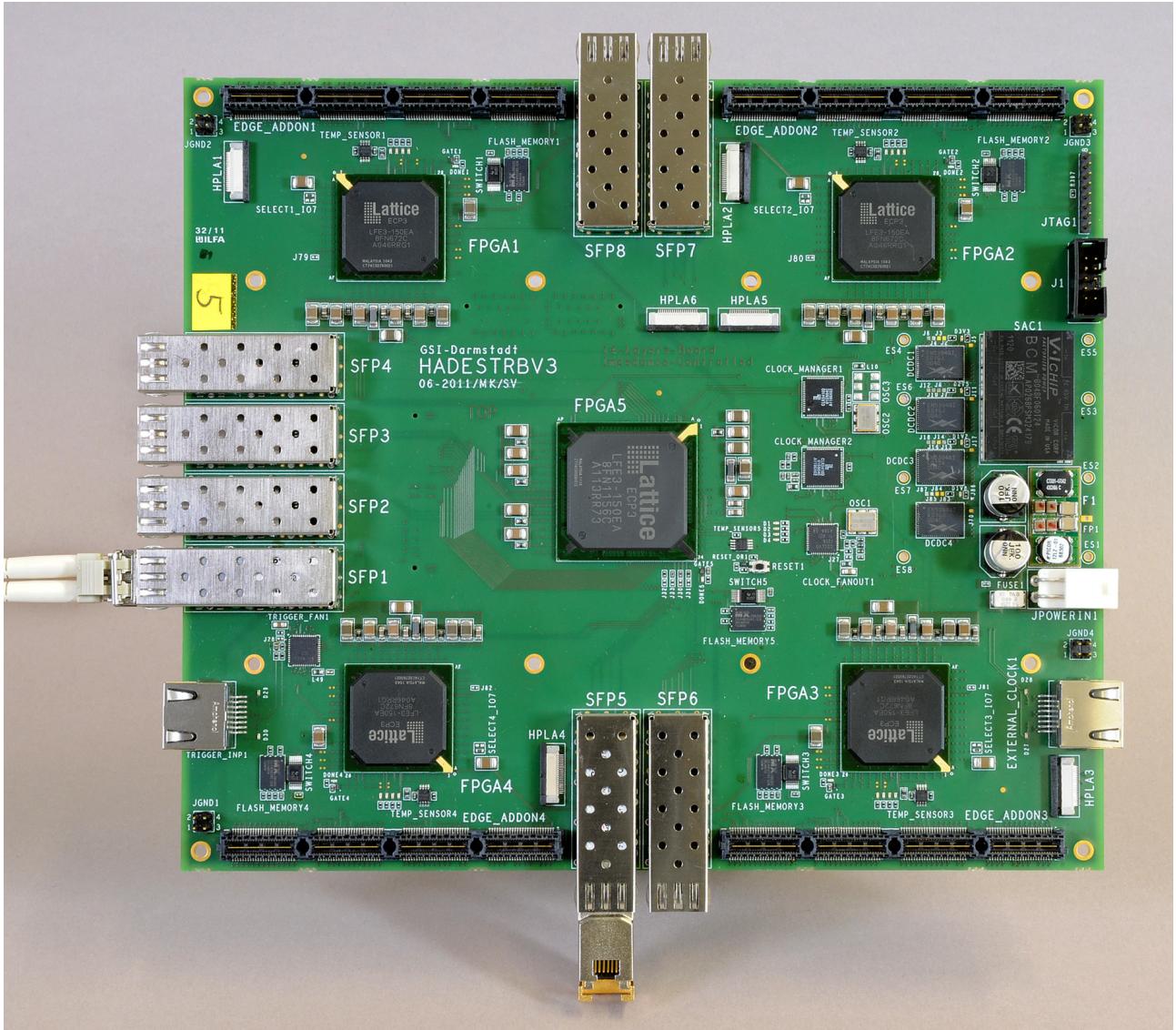


Рис. 3.5: Общий вид платы TRB v3.

Каждая периферийная ППВМ, разбивается на 32 области, в каждой из которых программируется одна и та же схема канала ВЦП. Каналы расположены в разных областях матрицы, поэтому каждый канал ВЦП имеет свою величину пути, проходимого сигналом внутри ППВМ. Нечетные каналы настроены на положительный перепад напряжения, т.е. на передний фронт, а четные каналы — на отрицательный перепад напряжения, т.е. на задний фронт. Обработка импульса из одного входного канала выполняется двумя каналами ВЦП, относительная задержка между которыми должна быть прокалибрована с помощью точного генератора прямоугольных импульсов. Особенности такой калибровки обсуждаются в 4.3. Отметим, что в ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик количества зарегистрированных временных отметок, значение которого может быть опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик может быть использован, например, для получения зависимости скорости счёта от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа. Грубое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счетчика называются эпохой (epoch), а 11 младших разрядов называются грубым временем (coarse) [25].

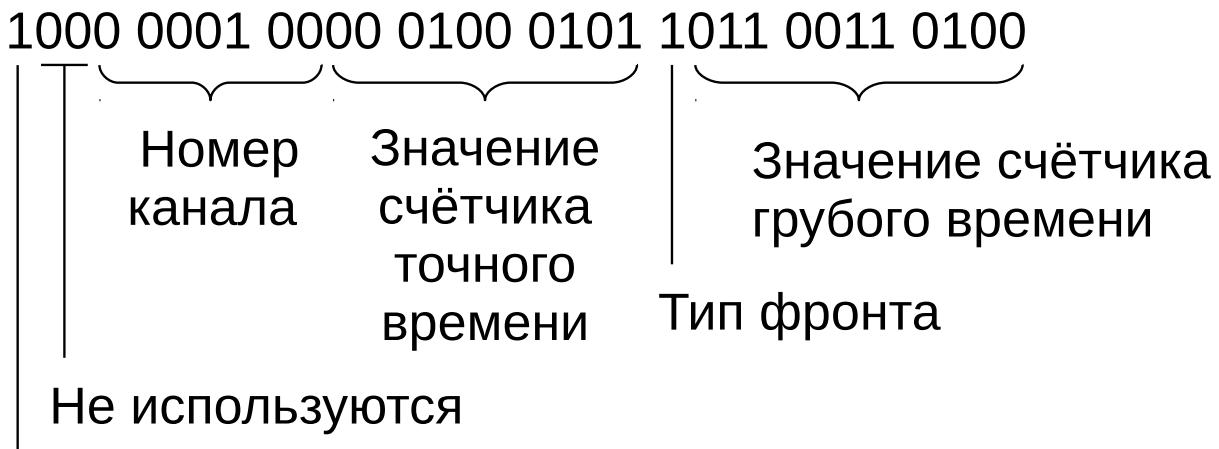
При регистрации момента времени входного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой и собственно так называемой временной отметкой (timestamp). Чтобы уменьшить поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивается каждые 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных отметок, принадлежащих данной эпохе.

Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный регистр точного времени (fine). В регистр пишется значение счётчика точного времени, реализованного с помощью технологии Tapped delay line (TDL) на 512-ти элементах. Теоретически, если все элементы задержки идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный 5 нс, можно разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной временной отметки была бы равна 9.9 пс, а полное время рассчитывалось бы как  $T = (\text{epoch} \cdot 2048 + \text{coarse} - (\text{fine}/512)) \cdot 5\text{ нс}$ .

Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс параметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калибровка результатов измерения точного времени относительно диапазона значений регистра. Процедура калибровки и анализ ее качества обсуждаются в секциях 3.5 и 4.3 соответственно.

Находящиеся на TRB v3 ППВМ формируют 4-байтовые сообщения одного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER, TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика формирования сообщений подробно описана в документации [26].

Рассмотрим для примера структуру сообщения типа TIMESTAMP, наиболее информативного для нашего анализа. В зависимости от номера канала это сообщение может нести информацию о фронте синхронизации SYNC, о переднем фронте хита LEAD или о заднем фронте хита TRAIL.



## Тип сообщения – временная отметка

Рис. 3.6: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

Старший бит (левый) указывает на то, что данное сообщение является временной отметкой. Следующие два бита не используются. Следующие 7 бит указывают номер канала 4. Затем 10 бит указывают значение счётчика точного времени 0x45. Далее вспомогательный бит edge, который на данный момент не используется. Последние 11 бит кодируют значение счётчика грубого времени 0x334. Далее отсюда вычисляется полное значение времени в наносекундах (2681319745539.841309).

Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризуется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения фотоэлектрона и значением отметки времени переднего фронта. Эта задержка определяется временем развития электронной лавины в динодной системе, временем распространения сигнала по проводникам и временем переключения логических элементов. Процедура коррекции задержек и ее особенности описаны далее в секциях 3.5 и 4.4.

### 3.2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

**Это, видимо, нужно удалить в связи с более подробным описанием FLES** В концепции системы сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответствующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата передней электроники (FEB – front-end board), где осуществляются аналоговые преобразования и оцифровка сигналов. Далее, данные в виде электрических цифровых сигналов поступают в плату считывания (ROB – readout board),

где происходит концентрация данных и их пересылка по оптическому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки данных (DPB — data processing board). DPB уплотняют данные с различных детекторов за счет удаления избыточной информации специфическим для каждого детектора способом и группируют эти данные в пакеты, называемые срезами времени (time slice). В каждый срез времени попадают сообщения со всех детекторов, имеющие временную отметку в заданном интервале. Далее они передаются по меньшему числу оптических каналов с более высокой пропускной способностью [27]. После этого данные поступают в память, доступную центральному процессору ЭВМ по высокоскоростной шине через платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface Board, а FLES [28], в свою очередь, обозначает First Level Event Selector, т.е. специализированный аппаратно-программный комплекс для построения событий “на лету” и их отбора по заданным критериям. Плата FLIB может быть реализована, например, путем программирования коммерческой PCI-E платы HTG K-7.

В случае пучковых тестов RICH плата передней электроники реализована как пара PADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [29]. В качестве ROB используется плата TRB v3, сконфигурированная как концентратор. Плата DPB находится в стадии разработки прототипа, а плата FLIB была впервые применена в одном из протестированных вариантов системы сбора данных. При этом значительная часть измерений была выполнена с использованием стабильной системы сбора данных на основе DABC [30] и обычной сетевой карты.

### 3.3 Время-цифровой преобразователь

На рисунке 3.7 приведена условная схема функционирования одного канала ВЦП, дающая представление о причинах сдвига калибровочной таблицы и объясняющая минус в формуле расчёта полного времени.

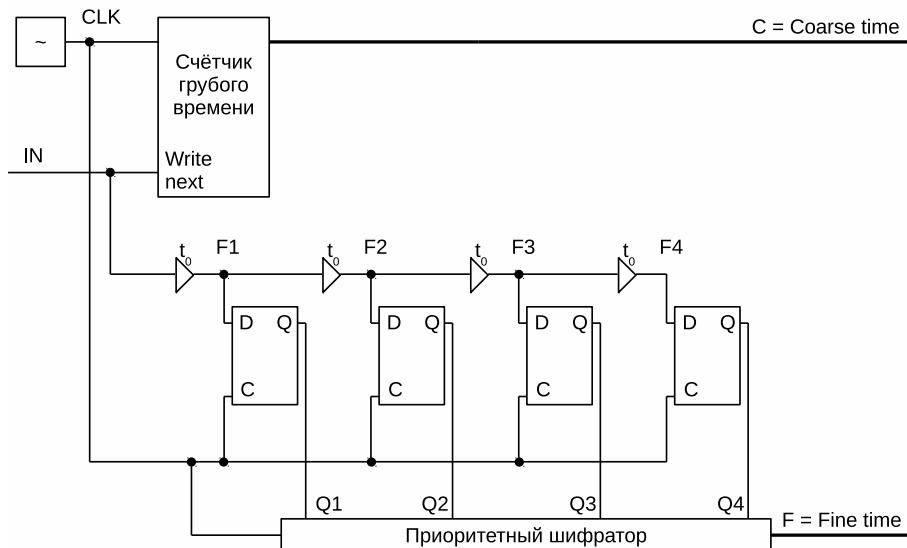


Рис. 3.7: Структурная схема одного канала ВЦП.

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 (TDL) — цифровая линия задержки (DDL) с промежуточными выходами. Используются элементы задержки  $t_0$ , имеющие одинаковые характеристики в пределах некоторой точности. Количество элементов должно быть таким, чтобы полностью заполнить период между двумя отсчётами грубого времени. Регистрируемый фронт, поступающий на вход IN, проходит линию задержки, состоящую из нескольких элементов задержки. По мере прохождения линии фронтом триггеры переключаются из 0 в 1, каждый следующий через промежуток времени, равный  $t_0$ . При поступлении следующего фронта от тактового генератора происходит считывание грубого времени и перенос значений выходов триггеров в приоритетный шифратор.

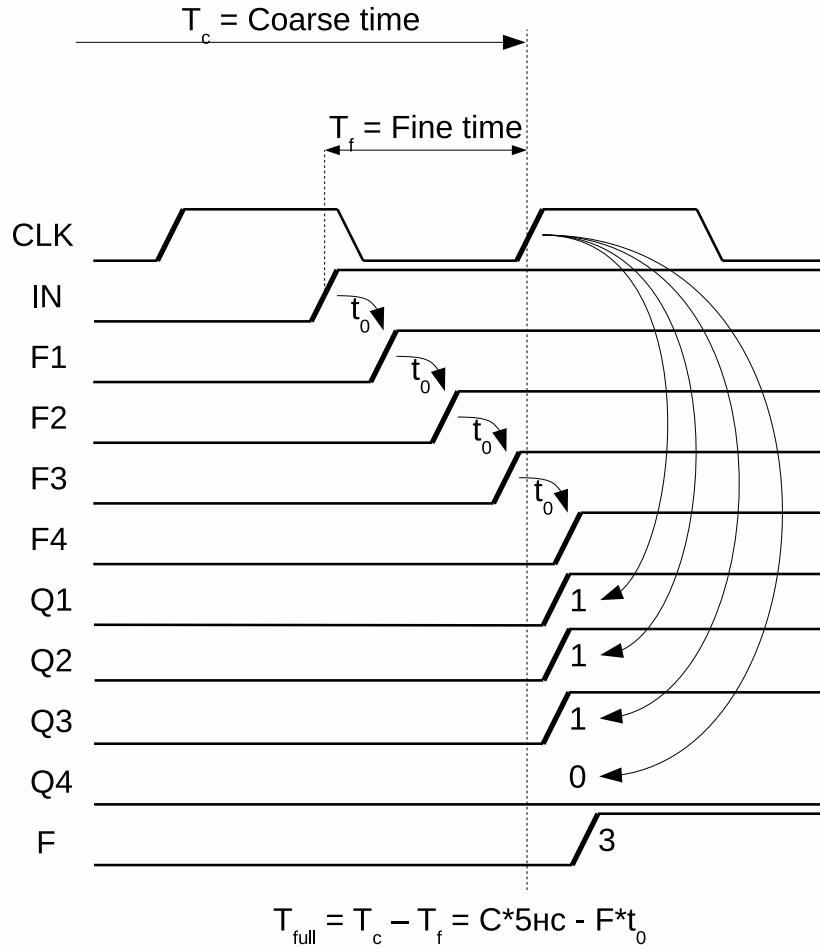


Рис. 3.8: Пример временных диаграмм при регистрации входного фронта.

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 игнорируются. (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 дальше, 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 3.9. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах.

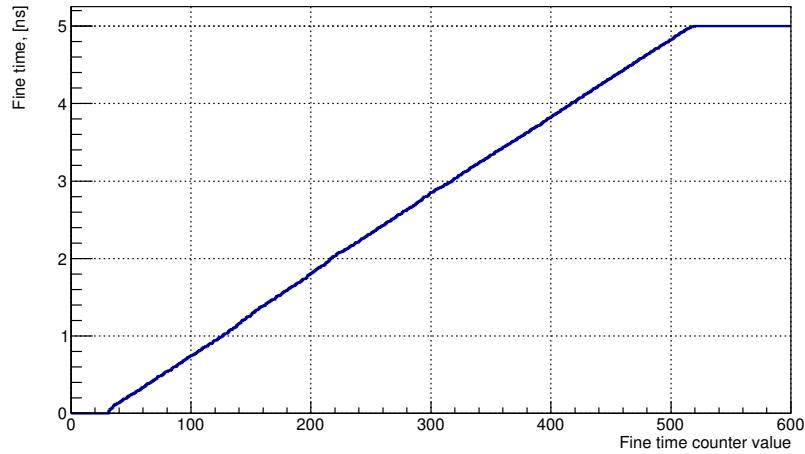


Рис. 3.9: Пример таблицы калибровки точного времени.

## 3.4 Экспериментальные установки

### 3.4.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах

Исследование системы считывания и сбора данных проводилось в составе полнофункционального прототипа детектора RICH эксперимента СВМ в ходе комплексных пучковых испытаний прототипов нескольких детекторов того же эксперимента [31]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [32] и [33] соответственно. Схема установки представлена на рис. 3.10.

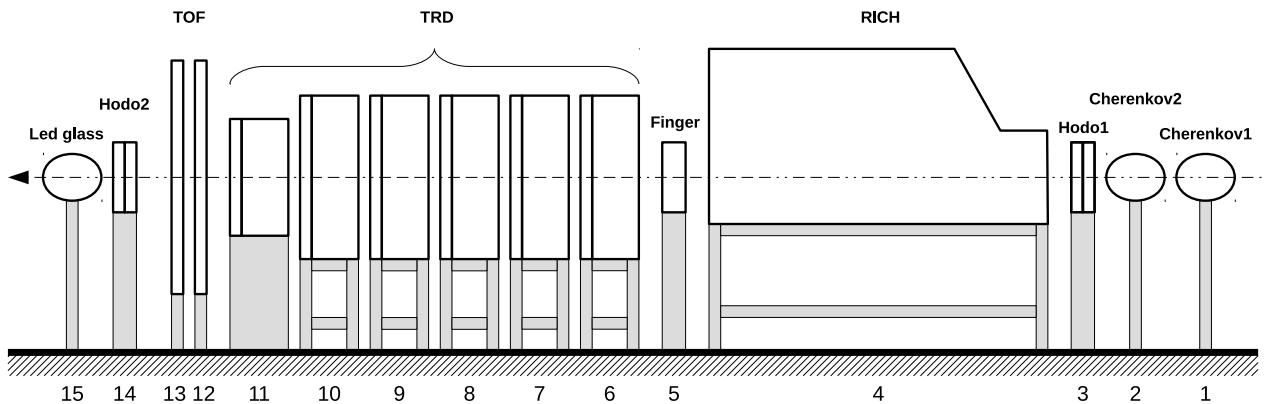


Рис. 3.10: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции прототипа детектора переходного излучения; 12-13 — станции прототипа времени-пролётного детектора; 15 — электромагнитный калориметр из свинцового стекла.

Выход пучка Т9 ускорителя PS [34] в ЦЕРНе представляет собой смешанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов импульсом, настраиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрировалось в среднем 500 электронов.

Схема прототипа детектора RICH эксперимента СВМ представлена на рис. 3.11.

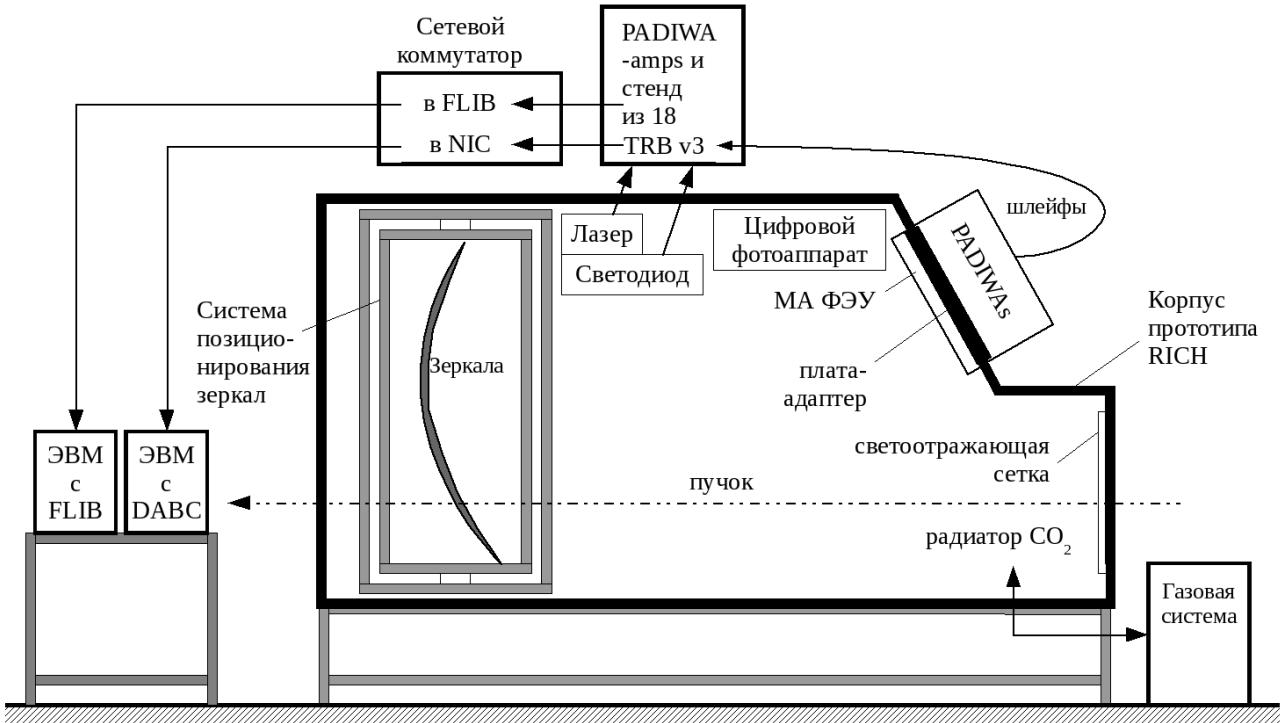


Рис. 3.11: Схема прототипа детектора RICH.

Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину, 1.2 м в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в радиаторе до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ под избыточным давлением 2 мбар при комнатной температуре. Показатель преломления газа для ближнего ультрафиолета составляет при этом  $n=1.00045$ . Стабилизация избыточного давления газа с точностью 0.1 мбар и его чистота обеспечивались газовой системой, описанной в [35]. Абсолютное давление газовой смеси и температура мониторируются системой медленного управления. Актуальное значение показателя преломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхнего уровня, вставляющуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соединённую с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг вертикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложенной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг горизонтальной оси. Сферическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит из 4 долей 40 см на 40 см. Каждая из долей крепится к внутренней раме через три моторизированных актуатора. Перечисленные двигатели позволяют удалённо, после установки детектора на пучке, позиционировать зеркала. Более подробно система позиционирования зеркал описана в [36].

Система диагностики положения зеркал [37] состоит из светоотражающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светодиода Roithner UVTOP240 [38] с длиной волны 245 нм и фотоаппарата, считываемого удаленно. Сетка сделана из полос ретрорефлектора шириной 10 мм и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизонтали и 110 мм по вертикали. Эта система позволяет контролировать точность поворота зеркал и, при наличии удалённого управления зеркалами, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным позиционированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распознавания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, можно определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций координат хитов.

Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувствительную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 МА ФЭУ, шесть из которых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спектра толщиной 150-200 нм. В качестве сместителя спектра использовался паратерфенил ( $\approx 40\%$  по массе) в полимерной матрице Paraloid B72. Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компонентов покрытия в дихлорметане, см. [39]. В определённый момент во время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принадлежащих одному кольцу. Для мониторирования системы считывания и калибровки относительных

задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphalas Picopower LD405 [40] с длиной волны 405 нм и длительностью импульса по паспорту менее 40 пс. Частота срабатывания лазера, так же как и светодиода, составляла 100 Гц. Интенсивность лазера была подобрана так, чтобы частота срабатывания каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

Считывание с каждого МА ФЭУ осуществлялось модулем, описанным в разделе 3.2.1. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предустановленных-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпусе прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Данные с 16 плат TRB v3 поступали на ещё одну, 17-ю плату TRB v3 особой конфигурации, которая также являлась генератором и распределителем триггера считывания для всех плат TRB v3. Импульсы с генераторов, управляющих лазером и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая измерять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число каналов [24]) и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3 также нестандартной конфигурации, совмещающей ВЦП и концентратор данных. Параллельно функционировало две системы сбора данных — одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с каждой платы TBR v3 по медному носителю, а другая через FLIB с одной (18-й) платы TBR v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рис. 3.12. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

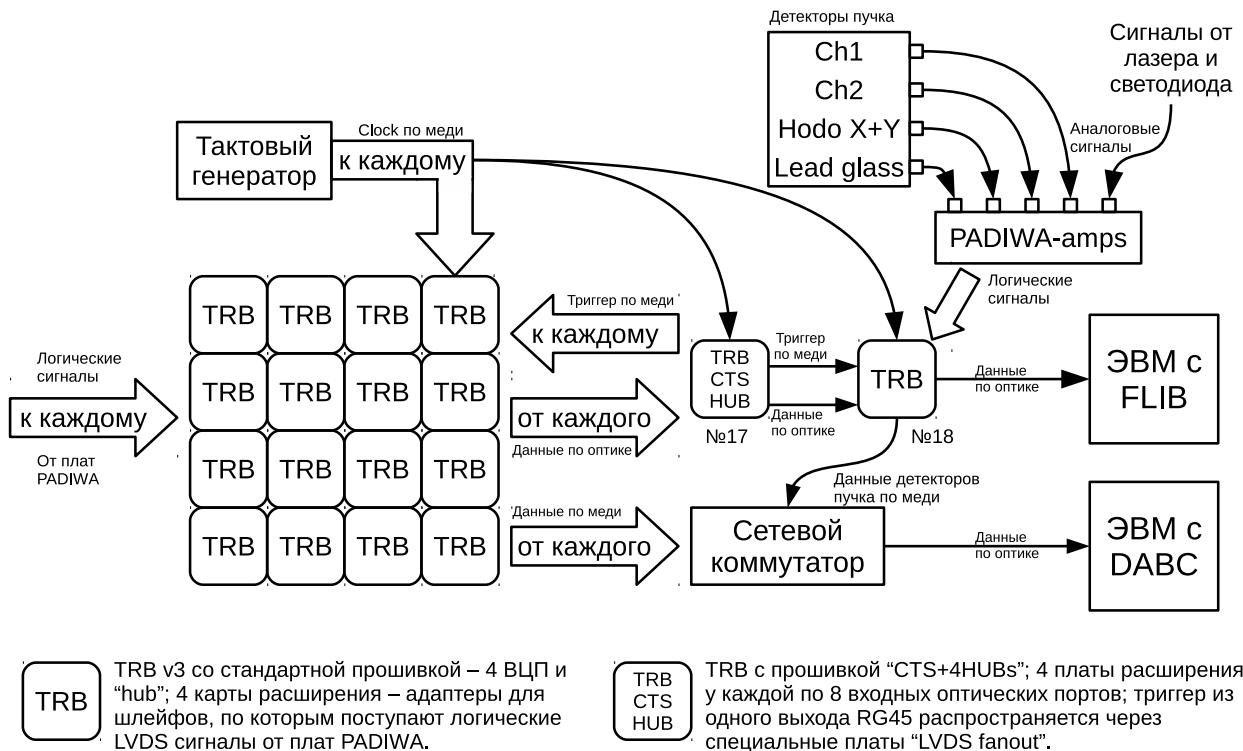


Рис. 3.12: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

### 3.4.2 Лабораторный стенд

Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась на пучковых тестах СВМ в ноябре 2014 г. Простейший анализ набранных данных показал, что некоторые распределения временных отмечено не поддаются очевидному объяснению. В связи с этим потребовалось собрать лабораторный стенд, позволяющий более подробно исследовать особенности работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в разделе 3.2.1. В некоторых измерениях выходной LVDS сигнал с PADIWA не оцифровывался ВПЦ, а считывался осциллографом с помощью активного зонда. Для лучшего понимания особенностей работы исследуемой системы считывания и сбора данных в том же лабораторном стенде был реализован более информативный, но медленный вариант системы считывания и сбора данных на основе 128-канальной микросхемы n-XYTER, каждый канал которой измеряет момент времени прихода переднего фронта и амплитуду входного сигнала. Эта система состоит из платы передней электроники, под-

ключаемой через печатную плату-адаптер к МА ФЭУ и через контроллер считывания SysCore ROC [41] к ЭВМ. Для считывания одного МА ФЭУ достаточно 64 каналов, то есть половины каналов одной платы передней электроники.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 3.13.

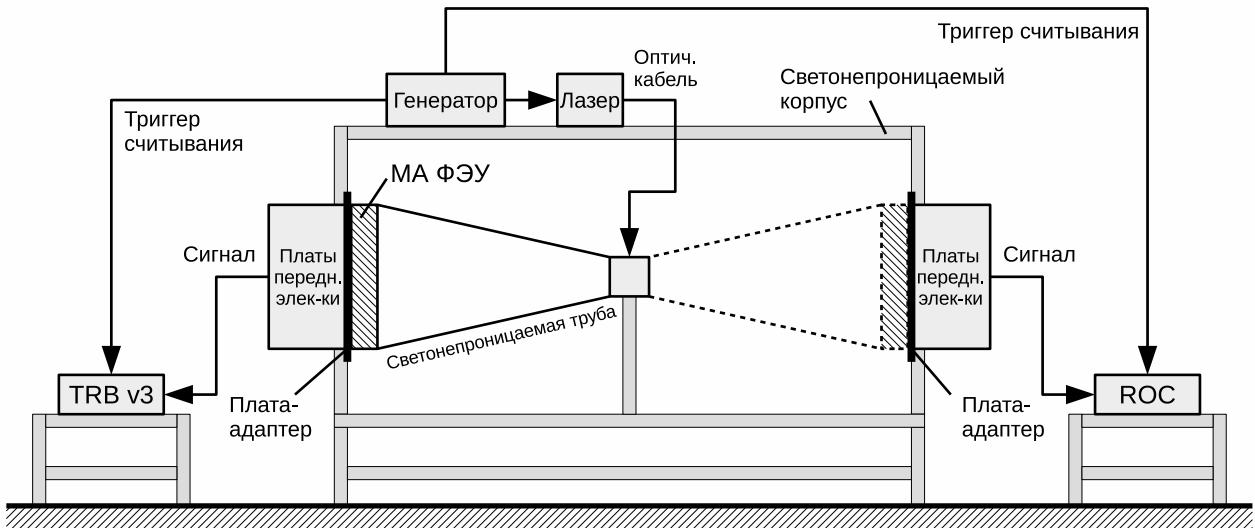


Рис. 3.13: Схема лабораторной установки.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picopower LD405 [40] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [40], как и в пучковых тестах. Свет от лазера поступал внутрь корпуса по оптоволокну. Для того чтобы обеспечить равномерное освещение поверхности МА ФЭУ свет лазера проходил через рассеивающее матовое стекло. Интенсивность лазера подобрана так, чтобы каналы МА ФЭУ работали в одноэлектронном режиме. Частота регистрации фотоэлектронов в каждом канале составляет около 10% от частоты вспышек лазера.

На расстоянии приблизительно 30 см от рассеивающего стекла расположен МА ФЭУ H12700. Для того чтобы обеспечить максимально чистые измерения, выполнена тщательная изоляция МА ФЭУ от внешнего света. Рассеивающее стекло и МА ФЭУ были помещены в черную, специально изготовленную на 3D принтере, пластиковую трубу, которая, в свою очередь, была помещена в светоизолированный корпус.

Известно, что требуется некоторое время, чтобы МА ФЭУ, находившийся на свету, высветился, поэтому перед началом измерений после закрытия корпуса обязательно выдерживался интервал не менее одного часа. В любой момент была возможность удаленно выключить лазер и исследовать темновой шум МА ФЭУ. Для снижения наводок от люминесцентных ламп на время измерений свет в помещении выключался.

Две системы считывания и сбора данных были установлены одновременно, каждая на своей стороне корпуса. Упомянутая выше пластиковая труба, рассеивающее стекло и МА ФЭУ поворачиваются как единое целое, обеспечивая одинаковые условия засветки МА ФЭУ в положениях, соответствующих работе с обеими системами считывания.

Опорные печатные платы-адаптеры необходимы для того, чтобы на них с одной стороны крепились МА ФЭУ, а с другой — платы передней электроники. Плата-адаптер вмонтирована стенку коробки и выполняет роль каркаса и светоизолятора. Также по ней разведено питание МА ФЭУ. Вся считающая электроника питалась низким напряжением, а МА ФЭУ высоким напряжением от высоковольтного источника.

Обе системы считывания и сбора данных являются самозапускающимися в том смысле, что каждый импульс на входе, при преодолении установленного порога, регистрируется и заносится в выходной буфер. Однако для того, чтобы данные из выходного буфера были отправлены в ЭВМ, необходимо периодически посыпать во вспомогательный вход контроллера считывания специальный импульс, называемый триггером считывания. В нашей установке импульсы генератора, управляющего лазером, одновременно играют роль триггера считывания выходного буфера. В используемых системах считывания и сбора данных триггер считывания автоматически поступает во входной поток данных. Это позволяет анализировать зарегистрированные временные отметки, сопоставляя их с моментом вспышки лазера. Съем данных с обеих систем считывания и сбора данных осуществлялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой

интерфейс ЭВМ.

### 3.5 Программное обеспечение

Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа СВМ RICH представляет собой набор модулей приема, первичной обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса CbmRoot [42]. CbmRoot вместе в FLESnet [43] образуют инфраструктуру, позволяющую выполнять приём данных, моделирование, реконструкцию и анализ данных эксперимента СВМ.

Соответствующим образом сконфигурированное приложение, написанное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный случай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считывания до анализа могут быть выполнены “на лету”, без записи промежуточных результатов на диск. В ходе описываемых в данной статье тестов использовалась последовательность обработки данных, изображённая на рис. 3.14. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков описаны ниже.

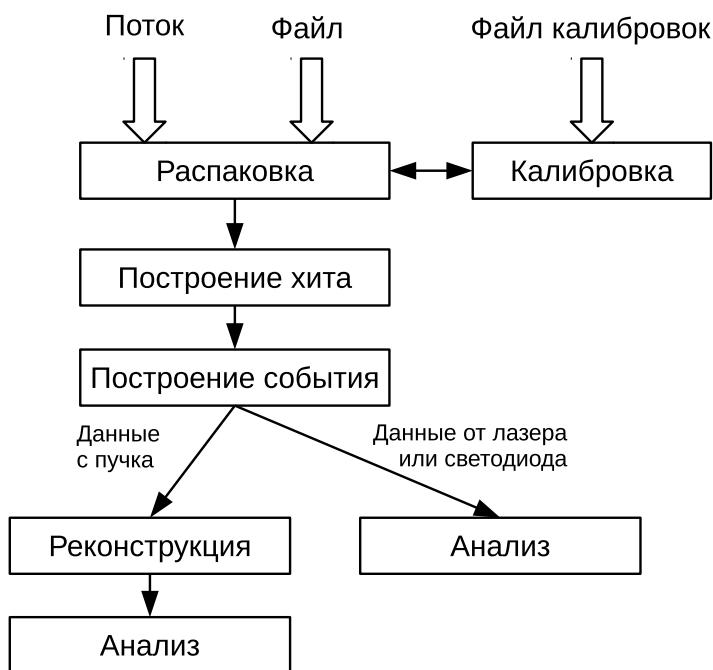


Рис. 3.14: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

### 3.5.1 Распаковка

Распаковка — это первый этап обработки данных, поступающих с электроники. В *CbmRoot* есть возможность обрабатывать данные как поступающие напрямую с детекторов, так и сохранённые в файле (с помощью DABC в формате HLD — HADES list mode data format [44]). При использовании FLIB распаковке предшествует запуск небольшого интерфейстного модуля, который выделяет из поступающего от FLESnet потока данных в формате временных интервалов (TSA — Time Slice Archive), сообщения, относящиеся к детектору RICH. Распаковка реализована как task-класс *CbmRichTrbUnpack* и в результате выполнения каждой итерации на выходе формируется *TClonesArray* с объектами класса *CbmTrbRawMessage*.

### 3.5.2 Калибровка точного времени

В процедуре калибровки точного времени воплощена известная техника калибровки счётчика цифровой линии задержки, реализованного с помощью технологии Tapped delay line [45], основанная на том, что распределение времен прихода сигналов должно быть равномерным по временному интервалу, занимаемому всеми элементами задержки. В результате анализа набранной порции данных для каждого канала строится дискретная функция  $f_{calib}(Fine)$ , называемая таблицей перехода от значения счётчика к значению точного времени в наносекундах. При использовании таблицы калибровки точного времени полное время вычисляется как  $T = Epoch \cdot 2048 \cdot 5 + Coarse \cdot 5 - f_{calib}(Fine)$  нс.

Процедура калибровки точного времени реализована в singleton-классе *CbmTrbCalibrator*, который не является частью конвейера обработки данных — обращение к объекту данного класса может производиться из любого места в программе. Присутствует возможность сохранения таблиц калибровки в отдельном файле, что ускоряет многократные расчёты за счёт повторного использования однократно рассчитанных таблиц.

### 3.5.3 Коррекция задержек между каналами

Для коррекции задержек между каналами в классе *CbmTrbCalibrator* реализована возможность импорта таблицы коррекций, построенной предварительно с помощью CmbRoot-макросов “ExtractDelays” и “BuildDeltaTable” на основе результатов первого прогона анализа. Первый макрос извлекает параметры гистограмм в текстовом виде из многочисленных файлов результатов анализа, полученных с помощью CmbRoot, возможно, с применением параллельных расчётов. Второй макрос стоит таблицу коррекций по данным параметрам.

Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введём сплошную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоящей из множества МА ФЭУ. Полное число пикселей  $M = 64 \cdot N$ , где  $N$  — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты, имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение окна зависят от экспериментальной установки (например, разницы длин кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и подбираются в соответствии с распределением, построенным по конкретному набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных данных строятся гистограммы разности временных отметок  $i$ -го и  $j$ -го каналов, где  $i$  и  $j$  пробегают значения от 1 до  $M$ . В качестве меры разности задержек между каналами можно взять по выбору пользователя либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полученные значения заполняют кососимметричную матрицу  $A$  размерности  $M \times M$ . В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, относительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по сути, столбцом матрицы  $A$ .

### 3.5.4 Построение хита

Сигнал от каждого зарегистрированного фотона, называемый хитом, состоит из двух сообщений, содержащих временные отметки переднего и заднего фронтов. Т.к. разные каналы имеют разные задержки и вероятность регистрации отдельных фронтов не равна 100%, необходимо было в анализе данных реализовать алгоритм подбора пар фронтов. Данная процедура реализована в task-классе *CbmTrbEdgeMatcher*, который стоит в конвейере после распаковки и фактически выполняется после применения всех калибровок.

Для каждого внешнего канала был реализован буфер сообщений, который наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее, как только приходил задний фронт, из буфера выбирался наиболее близкий по временной отметке передний фронт внутри заданного допустимого временного окна. На рис. 3.15 приведён пример буфера передних фронтов для заданной пары внутренних каналов в момент прихода одного заднего фронта. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок заднего и переднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как положительные, так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны накладывается ограничение.

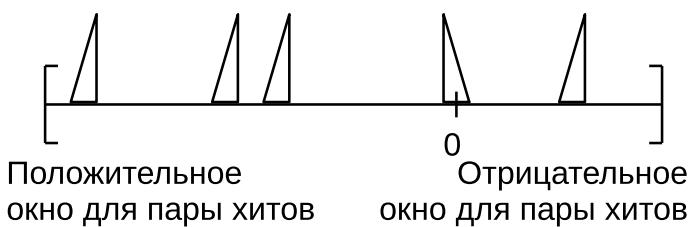


Рис. 3.15: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный (передний либо задний) фронт, буфер постепенно наполняется и его необходимо очищать, чтобы избежать переполнения. Если для поступившего заднего фронта нет кандидата переднего фронта в буфере это означает, что передний фронт не был зарегистрирован. В таком случае этот задний фронт отбрасывается. Количество ненайденных фронтов сильно зависит от загруженности входного канала ВЦП, которая в свою очередь зависит от порога дискриминатора.

При низком пороге регистрируется высокочастотный шум электроники, что приводит к формированию огромного потока выходных сообщений, которые не могут быть переданы из-за ограниченной пропускной способности выходного тракта системы считывания.

Предусмотрена возможность допускать одиночные передние фронты в качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла, т.к. в нормальном режиме ненайденные пары в основном обусловлены ошибками ВПЦ и доля таких сообщений пренебрежимо мала — менее  $2 \cdot 10^{-4}$ .

### 3.5.5 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, гodosкопов 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 СВМ 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 ниже описывается предлагаемый алгоритм)

В силу того, что электроника бестриггерная и приём данных осуществляется порциями, называемыми DAQ-событиями, никак не связанными с реальными событиями, для формирования корректной входной информации для реконструкции и дальнейшего анализа данных необходимо выполнять процедуру построения события.

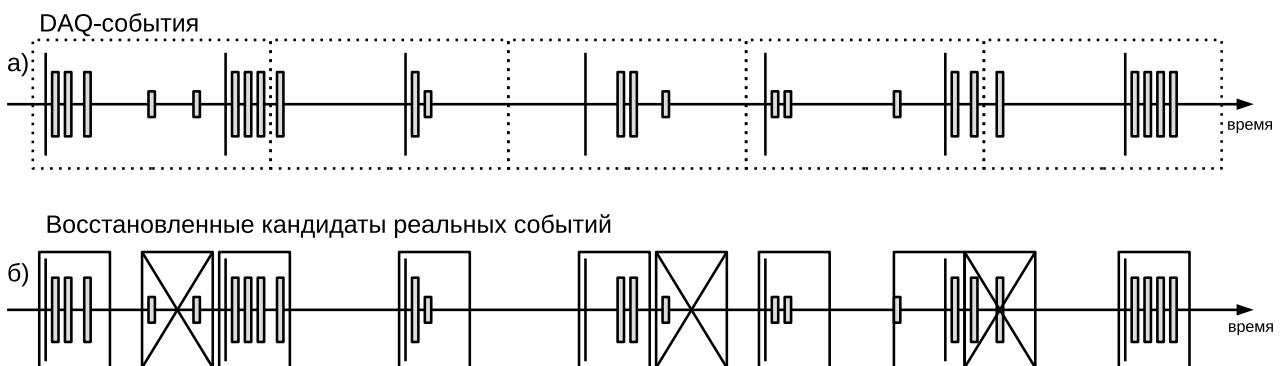


Рис. 3.16: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 3.16, в течение которого поступают:

- Триггерные сигналы — импульсы с генератора, питающего лазер, либо сигналы с детекторов пучка;
- Сигналы, скоррелированные с импульсами с генератора или детекторами пучка, т.е. связанные со светом;
- Шумовые сигналы, распределённые равномерно во времени.

Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-событий, следовательно, необходимо при построении реальных событий смотреть на несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей электроники не гарантируется, что входная информация поступает упорядоченной во времени. Поэтому периодически случается, что хиты реального события, пришедшего по большей части в  $i$ -м DAQ-событии, обнаруживаются в  $i+1$ , реже  $i+2$ , и даже  $i+3$  и последующих DAQ-событиях. Следовательно, требуется сначала распознать кластеры хитов в достаточно широком интервале времени — потенциальные события, а затем по наличию заданного типа триггера выбрать реальные события, содержащие либо черенковские кольца, либо вспышки лазера.

Реализован данный алгоритм с помощью буфера хитов. По мере распаковки входных сообщений, построенные хиты заносятся в буфер. На каждой итерации осуществляется распознавание кандидатов событий в буфере и определяется их количество  $N$ . Когда  $N$  достигает заданного минимального уровня, на каждой итерации, помимо приёма одного входного DAQ-события, осуществляется выброс выходного кандидата реального события. Так как одно DAQ-событие может содержать несколько кандидатов, буфер будет расти. Для того, чтобы избежать переполнения, устанавливается верхний предел. Когда  $N$  достигает этого предела, осуществляется сброс событий на выход по принципу FIFO до заданного минимального уровня. На рис. 3.17 приведён отрывок диаграммы наполненности буфера по мере обработки входного потока. В данном примере были установлены следующие параметры: минимальное кол-во событий в буфере 200, максимальное — 500. Отметим, что кол-во событий в буфере может превышать заданное максимальное значение, если в одном DAQ-событии содержится более одного реального события. По окончании входного потока содержимое буфера обрабатывается полностью и все распознанные события подаются на выход.

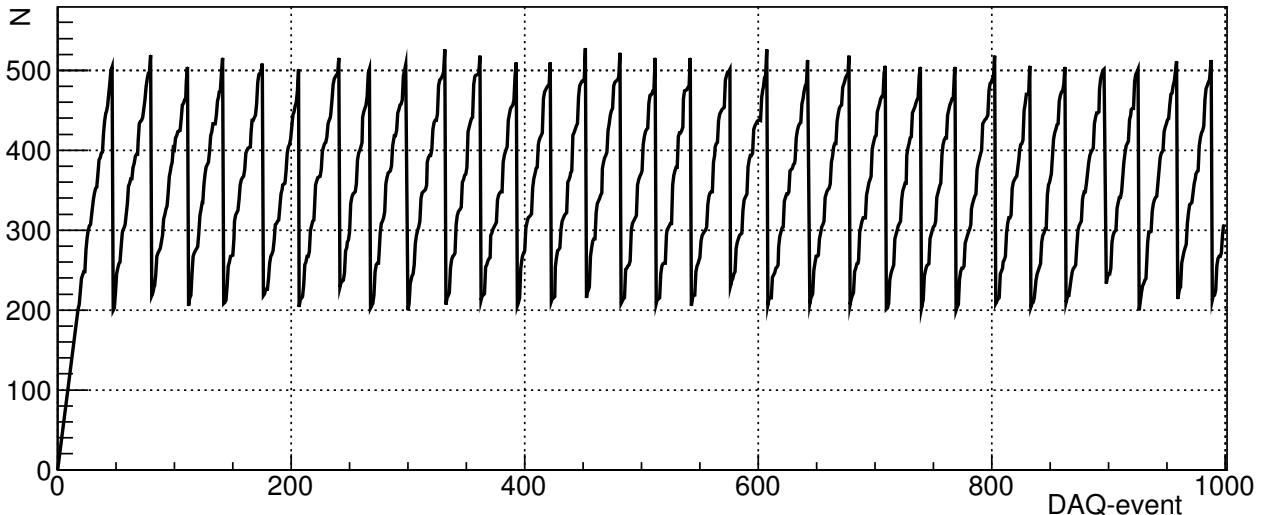


Рис. 3.17: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

### 3.5.6 Реконструкция

Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит как загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, после фокусировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствительной камеры, которая в общем случае может состоять из нескольких плоскостей. Первый этап реконструкции — перевод хитов из плоскостей камеры в плоскость реконструкции. Затем выполняется поиск колец по хитам. В CbmRoot есть реализации нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практический интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского излучения, основанный на проеобразовании Хафа, описанный в работах [46, 47]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована для данных пучковых тестов, в которых ожидается одно кольцо на событие. Данный алгоритм реализован в

классе *CbmRichProtRingFinderHoughImpl*, унаследованном от *CbmRichProtRingFinderHough* и далее от *CbmRichRingFinder*. После этого определяются параметры кольца и далее реконструкция с применением информации с других детекторов.

## Глава 4

# Результаты анализа

### 4.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB

Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов распаковки обоих потоков. На массиве составляющем примерно  $10^7$  сообщений расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована работоспособность концепции формирования временных интервалов и ввода данных в компьютер с использованием FLIB. Приведённые в следующих разделах результаты получены на основе данных, принятых через стандартный сетевой интерфейс с применением DAQ ПО на основе DABC [30].

### 4.2 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  $\omega$  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  $\sigma_1$  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  $\sigma_2$ , по сути очень похожее на  $\sigma_1$ , 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 размытающих факторов можно привести, например, следующие: временные характеристики лазера, разброс геометрических путей черенковских фотонов, разброс времени прохождения электронной лавины в динодной системе ФЭУ, дребезг сигналов в передней электронике. Из-за перечисленных явлений распределение  $\omega$  имеет следующую форму — (описание). Распределение  $\sigma_2$  — (описание).

Среднее значение либо положение максимума распределения  $\sigma_2$  можно использовать для того, чтобы определить значение поправки для данной пары каналов. Если выполнить анализ с применением коррекций, то вид всех распределений изменится.  $\omega$  сгруппируется ближе к нулю,  $\sigma_2$  передвинется к нулю, а  $\sigma_1$  сужится 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 покрыты сместителем спектра, а некоторые нет.

### 4.3 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных лабораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 4.1. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах. Вид графика не зависит от того, по каким данным он был построен, так как он определяется архитектурой время-цифрового преобразователя. Обратим внимание, что в показанном примере в диапазоне значений десятибитного счетчика точного времени интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс, соответствуют отсчеты от 30 до 520. Точные границы интервала определяются значениями задержек на элементах цифровой линии задержки. Эти величины индивидуальны и зависят от флюктуаций технологического процесса.

С целью понимания особенностей работы счётчиков точного времени, каждая таблица калибровки точного времени была аппроксимирована кусочно-линейной функцией. На рис. 4.2 показан пример разности значений функции калибровки точного времени и линейной функции. Видно, что отклонения не превышают 60 пс.

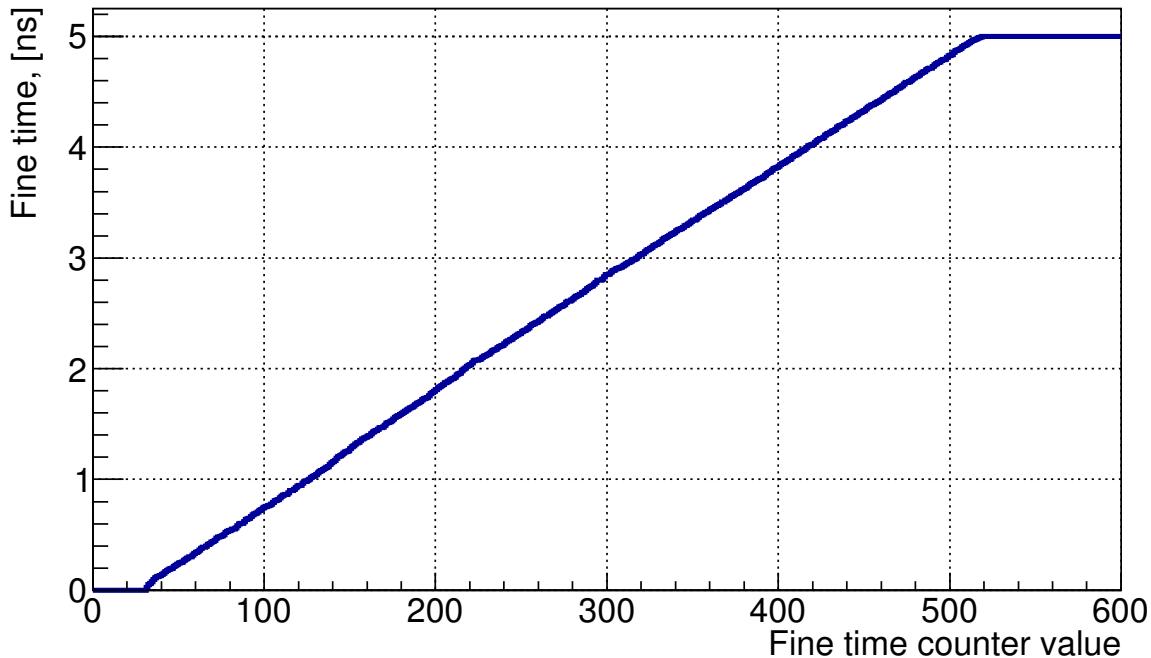


Рис. 4.1: Пример калибровочной кривой.

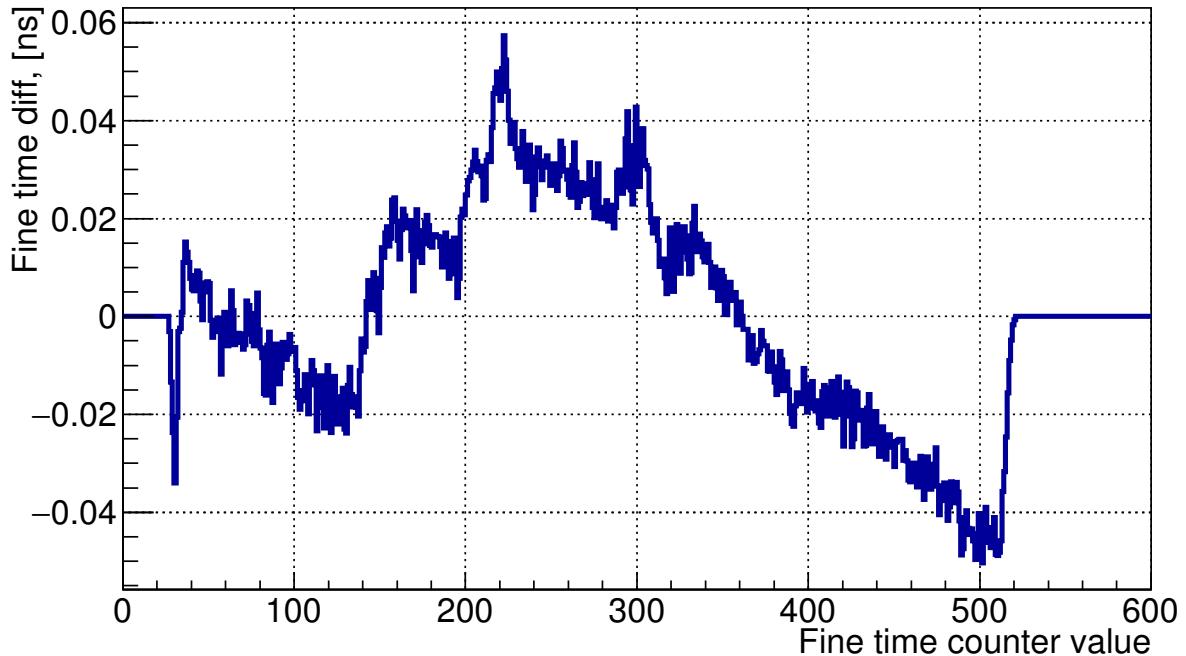


Рис. 4.2: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

Каждая аппроксимирующая кусочно-линейная функция состоит из трёх отрезков и может быть однозначно описана двумя координатами изломов, которые приблизительно соответствуют двум крайним рабочим значениям счётчика точного времени. Параметры линейных функций для всех каналов отображены на двумерной диаграмме на рис. 4.3. Видно, что хотя параметры и локализованы в двух областях, распределение достаточно компактное.

Для оценки влияния калибровки на точность регистрации временных отметок можно исследовать как одновременные фронты на разных каналах ВЦП, так и длительности прямоугольных импульсов во входных каналах, полученных с помощью высокоточного генератора прямоугольных импульсов. В работе [48] показано, что предельное временное разрешение в обоих случаях одинаково. Ниже мы используем второй подход.

В процедуре калибровки для каждого канала была выполнена замена точной калибровочной таблицы сначала индивидуальной линейной функцией данного канала, а потом общей функцией, усредненной по всем каналам (параметры этой функции показаны на рис. 4.3 сплошным квадратом). Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом входном канале показаны на рис. 4.4. Там же показаны результаты без калибровки.

Видно, что точная калибровка точного времени необходима для достижения предельного разрешения ВЦП. Ширина распределения разностей временных отметок в двух независимо флюктуирующих каналах ВЦП составляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разрешению 21 пс. Использование индивидуальной линейной функции приводит к увеличению ширины до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах. Отметим, что применение усреднённой калибровки устраняет двухпиковую форму, характерную для распределения без калибровки, но в некоторых случаях приводит при этом к увеличению ширины.

Таким образом, при невозможности выполнить калибровку точного времени, например, из-за недостаточного массива данных, предоставленных для анализа, в условиях нашей задачи, когда характерное временное разрешение составляет несколько сотен пикосекунд, возможно применение усреднённой линейной функции без заметного снижения точности.

Использование усреднённой калибровки может быть особенно полезно при измерении разности временных отметок, полученных ВЦП различного типа, поскольку тогда, в отличие от нашего случая, не происходит сокращения начального сдвига кусочно-линейной функции относительно нуля регистра точного времени.

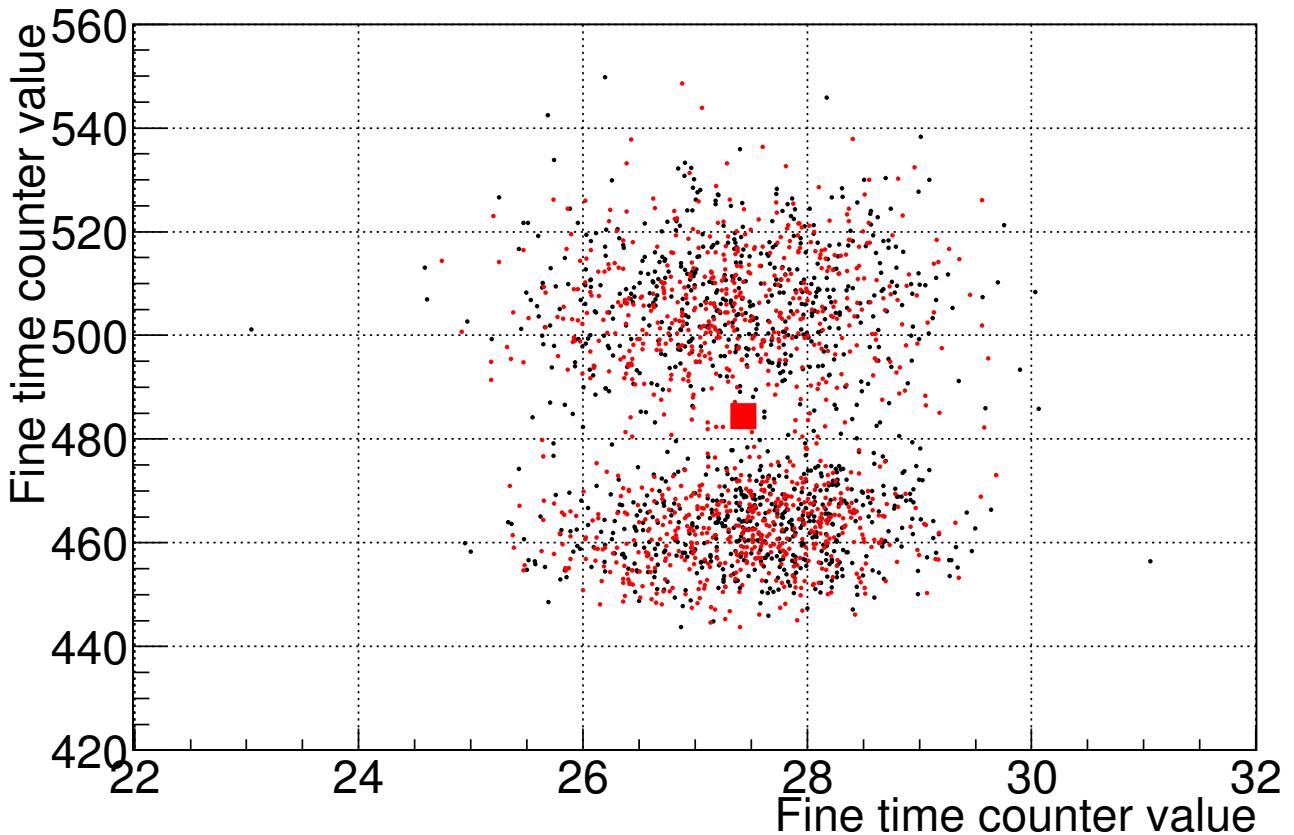


Рис. 4.3: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для глобальной псевдокалибровки.

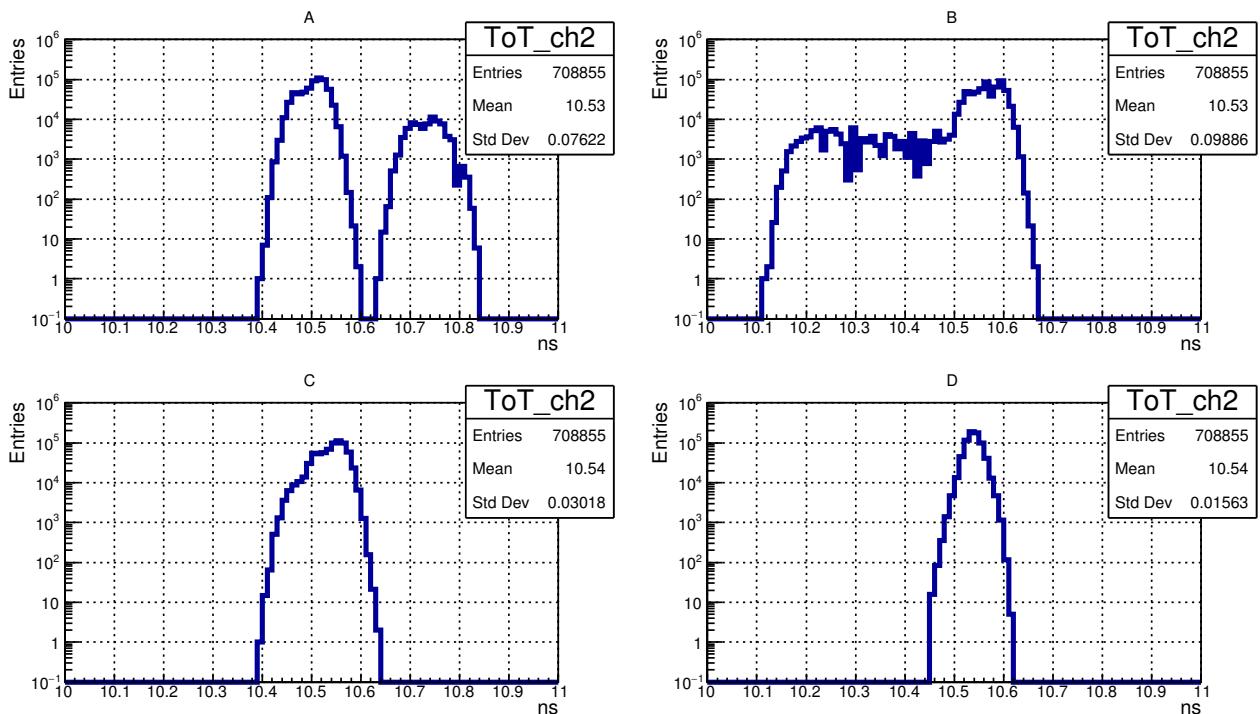


Рис. 4.4: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (A) без калибровки точного времени; (B) с применением усреднённой калибровочной функции; (C) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (D) с применением полноценной калибровочной функции.

Приведённые выше таблицы калибровки были построены по массиву данных, содержащихся в семи файлах. Каждый файл это 2 минуты измерений при частоте генератора 5 кГц, т. е. около 600 тысяч

вспышек лазера. Таким образом, всего было 4.2 миллиона вспышек за 14 минут, а один файл составляет приблизительно 15% от полного набора данных. В каждом канале было зарегистрировано от 300 до 400 тысяч временных отметок, которые были использованы для выполнения калибровки. Для иллюстрации стабильности калибровки на рис. 4.5 показана разность функций калибровки, построенных по всему массиву данных и функций, построенных на файлах, составляющих  $\approx 15\%$  данных каждый, взятых в начале, середине и конце набора данных. Видно, что отклонения в основном не превышают 10 пс, однако имеются редкие выбросы до 20 пс.

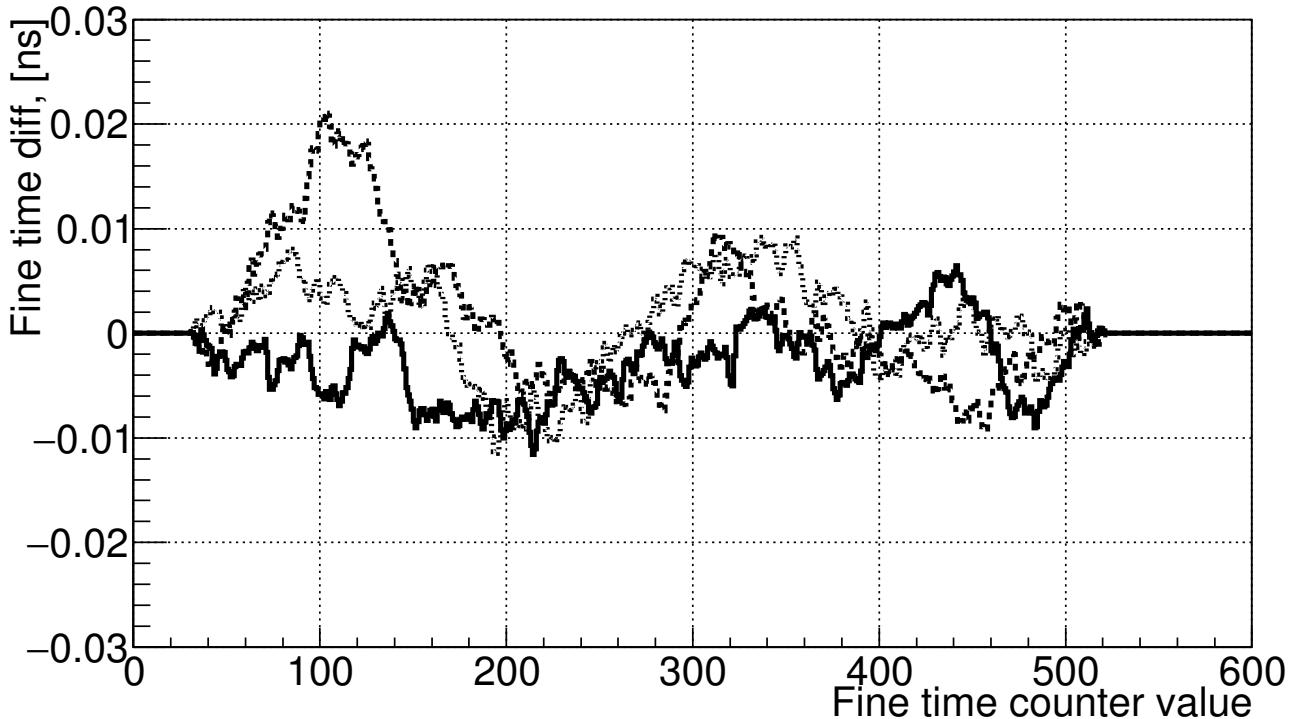


Рис. 4.5: Стабильность калибровок.

#### 4.4 Определение коррекций задержек между каналами

Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, показана на рис. 4.6. Такие гистограммы позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести коррекцию задержки. Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 пс значений задержек, полученных таким образом, что даёт заметный вклад во временное разрешение системы считывания (см. секцию 4.5).

Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в  $i$ -м канале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже 400 пс как сумма задержки в  $j$ -м канале относительно опорного и задержки в  $i$ -м канала относительно  $j$ -го. Для некоторых пар каналов вид гистограммы отличается от показанной на рис. 4.6. См., например, рис. 4.7. Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала подмешивается возбужденный или наведённый колебательный сигнал. Такая гипотеза подтверждается тем фактом, что форма гистограммы зависит от порога дискриминатора на плате PADIWA. При построении аналогичной гистограммы для пары дефектных каналов наблюдается до 5 пиков. Дальнейшее исследование проводилось с исключением дефектных каналов. Доля дефектных каналов составляет около 10% от полного числа каналов. При разработке следующей версии передней электроники для CBM RICH особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гистограммы, подобные обсуждаемым в данном разделе, будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

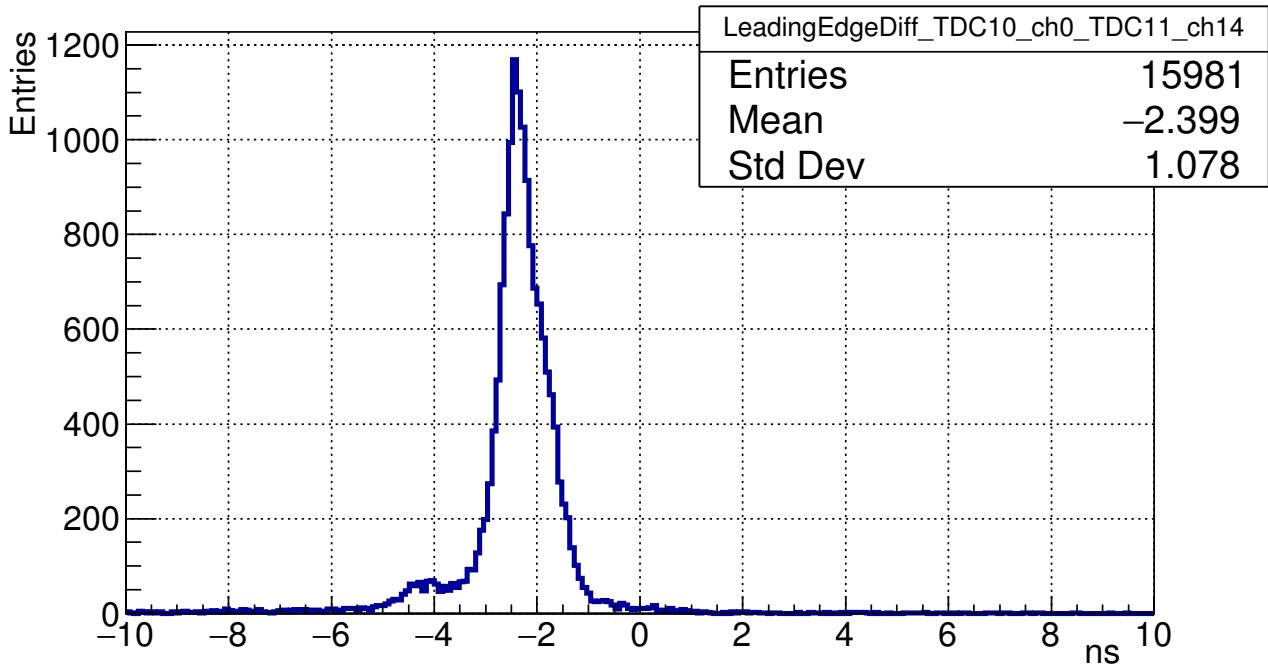


Рис. 4.6: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

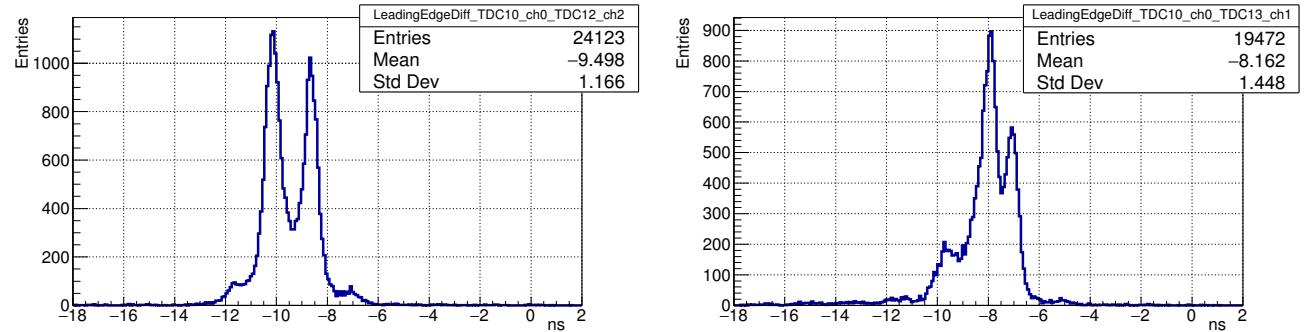


Рис. 4.7: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

## 4.5 Временное разрешение

В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых регистрируются несколько практически одновременно испущенных фотонов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой  $\approx 40$  пс, т.е. на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через МА ФЭУ. Второй тип — черенковские кольца. Разброс времени прихода фотонов на МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и 70 пс для вспышек лазера, что определяется в первую очередь наклоном плоскости в которой расположены фотокатоды. Анализ таких событий позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы считывания, начиная от окна МА ФЭУ и кончая формированием отметок времени. Временное разрешение одного канала определяется разбросом зарегистрированных временных отметок относительно времени прилёта фотона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилёта фотона измерить нельзя, нам приходится исследовать разброс разностей временных отметок в паре каналов при регистрации одновременно пришедших фотонов. Временные отметки в каждом из каналов подвержены независимым флуктуациям по однаковому закону, следовательно, измеренная ширина распределения будет в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем временное разрешение каждого канала. После применения коррекций задержек и калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых не является дефектным, получает-

ся распределение аналогичное показанному на рис. 4.6, отличающееся лишь тем, что положение центра находится в нуле.

Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения составляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное значение превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравнимыми вкладами: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации такой коррекции необходимо надёжное измерение времени над порогом, что в нашем случае невозможно, см. секцию 4.7.

Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в целом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновременные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать каналов, считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принадлежащих одному МА ФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырём соседним МА ФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и калибровки точного времени, отбирались все хиты, принадлежащие одному событию, и гистограммировались разности временных отметок по всем возможным парам каналов. Результаты для вспышек лазера показаны на рис. 4.8. В таблице 4.1 показано, как эволюционирует среднеквадратичное отклонение и FWHM в зависимости от числа каналов. Отметим, что для событий от лазера среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно с тем, что распределение последовательно принимает форму, более близкую к распределению Гаусса. Такое поведение можно интерпретировать как размытие индивидуальных особенностей каналов в процессе усреднения. Для хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу (см. рис. 4.9), и FWHM и RMS возрастают с увеличением числа каналов. Вероятно, отличия связаны с тем, что распределения фотонов во времени для черенковского кольца и вспышки лазера отличаются друг от друга.

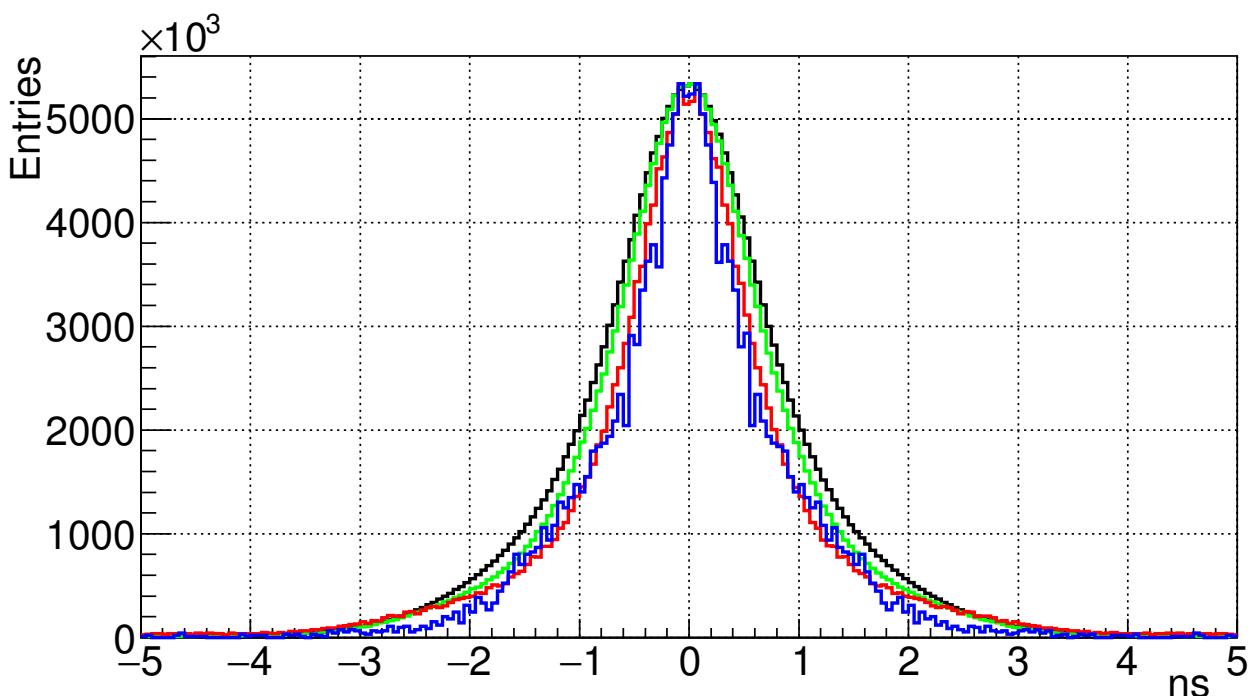


Рис. 4.8: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от лазера.

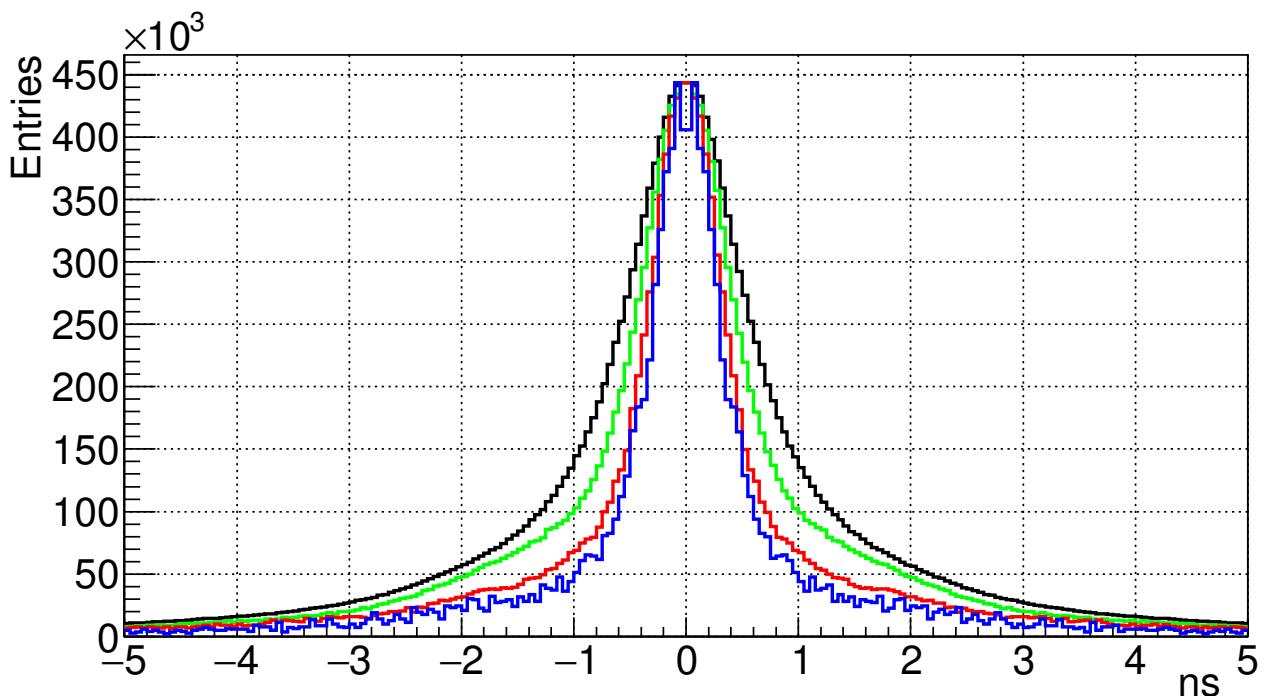


Рис. 4.9: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от черенковских колец.

Таблица 4.1: FWHM и RMS распределений при различных наборах исследуемых каналов.

Анализируемая область	Пара каналов	Плата PADIWA	Один МА ФЭУ	Четыре МА ФЭУ
Кол-во каналов	2	16	64	256
FWHM, лазер, нс	1.1	1.2	1.5	1.7
FWHM, кольца, нс	0.6	0.8	1.0	1.3
RMS, лазер, нс	0.913	1.093	0.997	1.034
RMS, кольца, нс	1.238	1.379	1.430	1.487

## 4.6 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра

Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя спектра. Анализу подлежит распределение разностей временных отметок хитов каждого кольца относительно первого по времени хита в данном кольце. В зависимости от длины волны черенковский фотон может с той или иной вероятностью либо поглотиться сместителем спектра и вызвать его свечение, либо пройти сквозь слой сместителя спектра без взаимодействия и попасть фотокатод. В результате, даже при наличии слоя сместителя спектра, часть хитов подчиняется временной зависимости характерной для чистого ФЭУ. Таким образом, для получения кривой высвечивания сместителя спектра необходимо из распределения разностей времен, полученного со сместителем спектра, вычесть должным образом отнормированное в максимуме распределение разностей времён, полученное с чистым ФЭУ.

Нормированные в максимуме кривые высвечивания со сместителем спектра и без него показаны на рис. 4.10, а разность этих распределений — на рис. 4.11. Видно, что за исключением небольшой выпуклости в области 7 нс, связанной с особенностями работы данного семейства МА ФЭУ, кривая выглядит похоже на сумму нескольких экспонент.

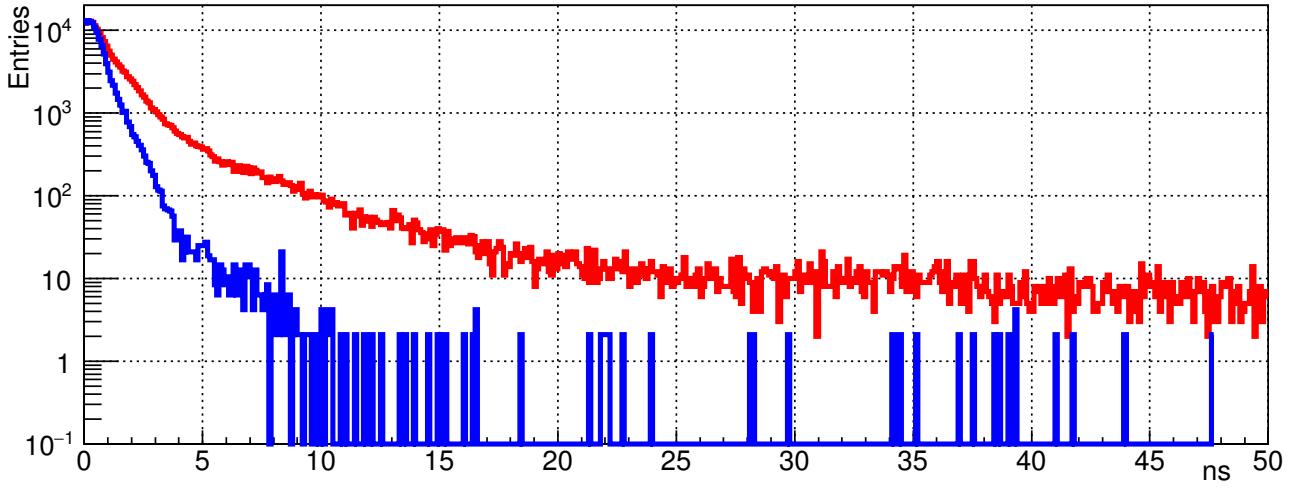


Рис. 4.10: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечивания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

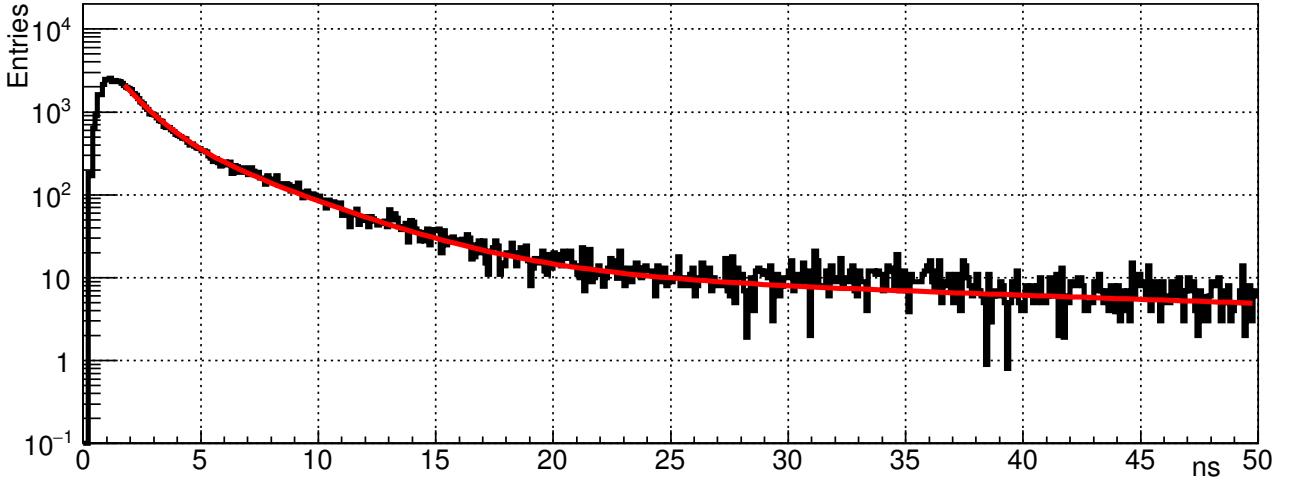


Рис. 4.11: Разница распределений со сместителем спектра и без него и кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную кривую с результатами флюориметрических исследований. Стеклянная пластина со слоем сместителя спектра, нанесённым точно таким же методом, как и на МА ФЭУ, была исследована с помощью классического метода счёта фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Были получены ([49]) значения времён высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000, и 0.8364.

Подгонка кривой с рис. 4.11 суммой трех экспонент с соответствующими временами показывает разумное согласие для времен превышающих 5 нс. Начальный участок лучше подгоняется с характерным временем  $\tau_1=1.1$  нс. Сравнение интенсивностей наиболее быстрой компоненты с флюориметрическими измерениями затруднено из-за начального неэкспоненциального участка, а относительный вклад наиболее медленной компоненты в полную интенсивность в нашем случае оказывается в 3.8 раз ниже. Это можно объяснить влиянием способа возбуждения на заселение разных типов центров высвечивания.

В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами метод переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем счета единичных фотонов [50]. Однако в нашем случае существует некоторая случайная задержка между моментом попадания черенковского фотона на поверхность МА ФЭУ и временем прихода первого хита. С целью выявления влияния метода на измеренные времена высвечивания было проведено Монте Карло моделирование.

В модели были заложены разброс времени прохода лавины в МА ФЭУ 300 пс (RMS), три экспоненциальные компоненты с характерными временами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17, 1.00, 0.22 и средним числом хитов в кольце равным 18. Получившееся распределение времён одновременно первого хита в кольце было подогнано трёмя экспонентами со свободными параметрами. Если

начать фитирование получившейся зависимости, отступив 4 нс от начала высвечивания, величины постоянных распада экспонент воспроизводятся с точностью лучше 5%, а соответствующие относительные интенсивности несколько искажаются, что естественно, в силу существования начального неэкспоненциального участка кривой. Таким образом, подтверждена корректность применённого метода определения времён высвечивания.

Практическая ценность проведенного исследования состоит в том, что может быть оптимизирована длительность окна, в пределах которого хиты принимаются одновременными и могут быть приписаны одному событию. Для этого необходимо найти баланс между числом дополнительных хитов, полученных благодаря сместителю спектра и вероятностью наложения сигналов друг на друга или подхвата в кольцо темнового хита. Например, прирост хитов в 19% может быть достигнут при длительности окна 15 нс.

#### 4.6.1 Исследование спектросмешителя с помощью флюориметра

Были проведены независимые флюориметрические измерения пара-терфениловой плёнки, нанесённой по той же технологии (dip-coating), что применяется для напыления смешителя спектра на поверхность МА ФЭУ в СВМ RICH. Измеренный временной профиль приведён на рисунке 4.12, а результаты фитирования — в таблице 4.2.

Таблица 4.2: Результаты фитирования флюориметрических измерений смешителя спектра.

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

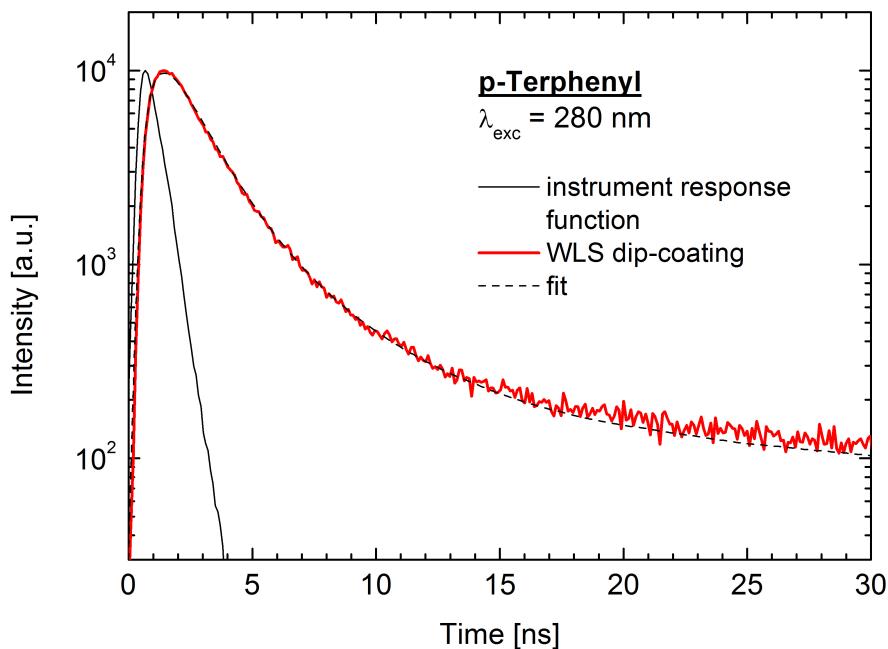


Рис. 4.12:

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 4.2. Здесь единица в скобке возле переменной  $t$  означает сдвиг графика по горизонтали на 1 нс и обусловлена разрешением измерительного прибора.

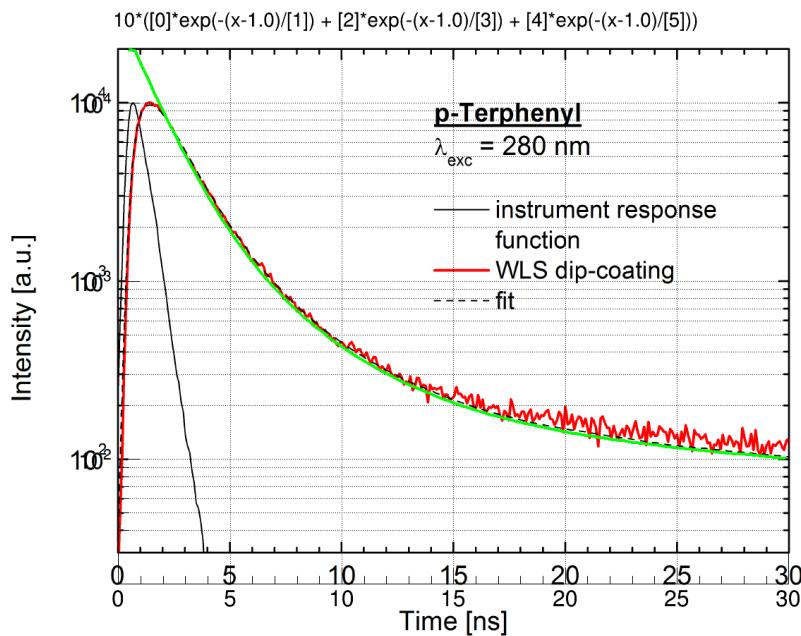


Рис. 4.13:

#### 4.6.2 Прямые измерения временного профиля спектрометриста

Можно фильтровать распределение WLS\_on или WLS\_off 4-мя компонентами, а можно фильтровать их разницу WLS\_diff трёмя компонентами. Можно фильтровать функцией с зафиксированными временами, чтобы определить амплитуды, а можно фильтровать функцией, где параметрами являются и времена и амплитуды.

##### Прямые фотонны

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

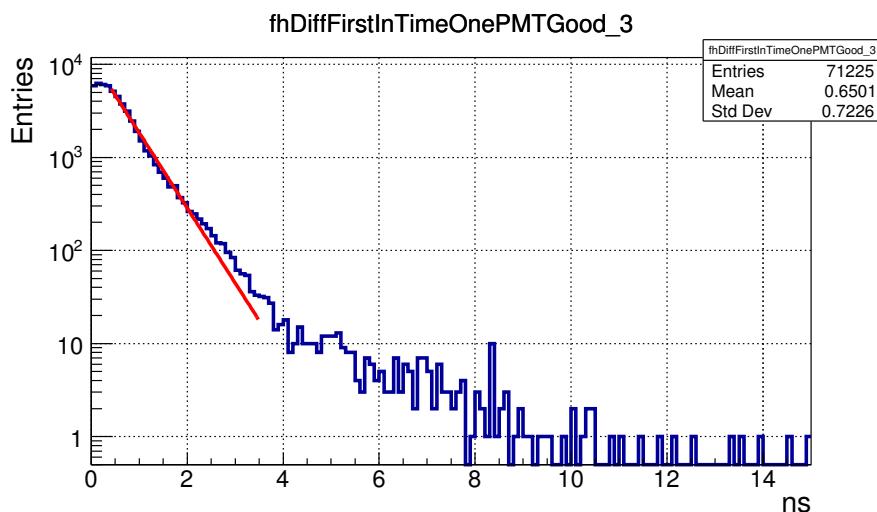


Рис. 4.14:

## Фитирование WLS\_diff

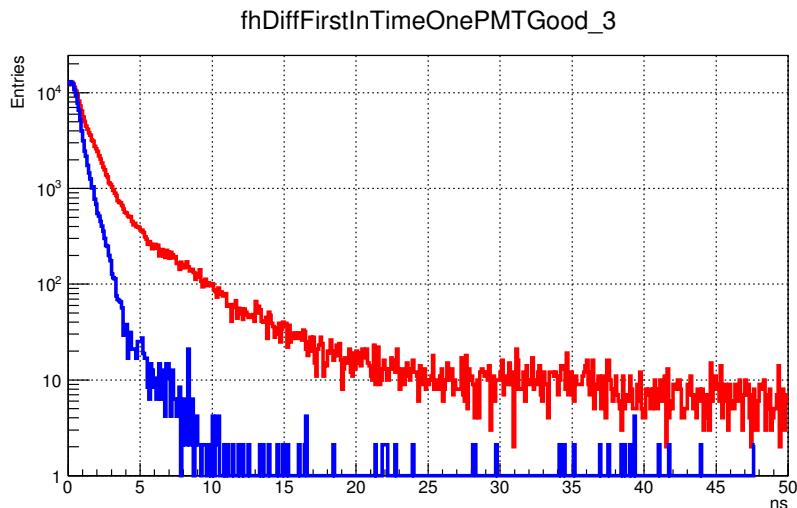


Рис. 4.15:

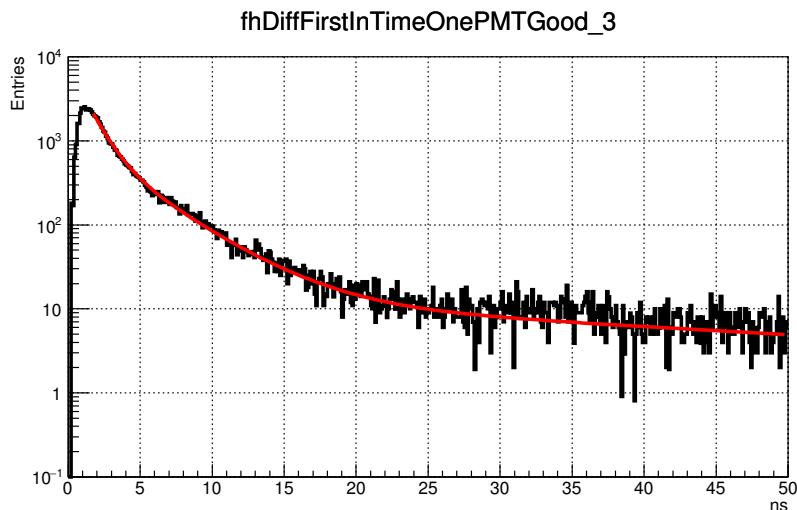


Рис. 4.16:

## 4.7 Время над порогом

Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найденного хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об амплитуде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения временного разрешения путём коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды (walk correction), а также для повышения качества отделения однофотоэлектронного сигнала от шума. На рис. 4.18 показано типичное распределение ToT, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура, согласно [51], может быть объяснена наличием периодической наводки как на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и входом ВЦП. На рис. 4.17 показан экран цифрового осциллографа в режиме накопления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к выходу PADIWA. Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдаемым пикам в распределении ToT; имеет место проблема недостаточности амплитуды одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логической единицы; имеется периодическая наводка на выходе дискриминатора, но ее недостаточно для объяснения наблюдаемой картины; преобладание определенных длительностей логических сигналов позволяет предположить наличие периодической структуры во входном сигнале. Все это говорит о необходимости подстройки аналоговой части для формирования на выходе PADIWA более чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между дискриминатором и ВЦП от наводок.

Подобные изменения будут, с учетом результатов данной работы, реализованы в следующем прототипе платы передней электроники, называемом DIRICH [29].

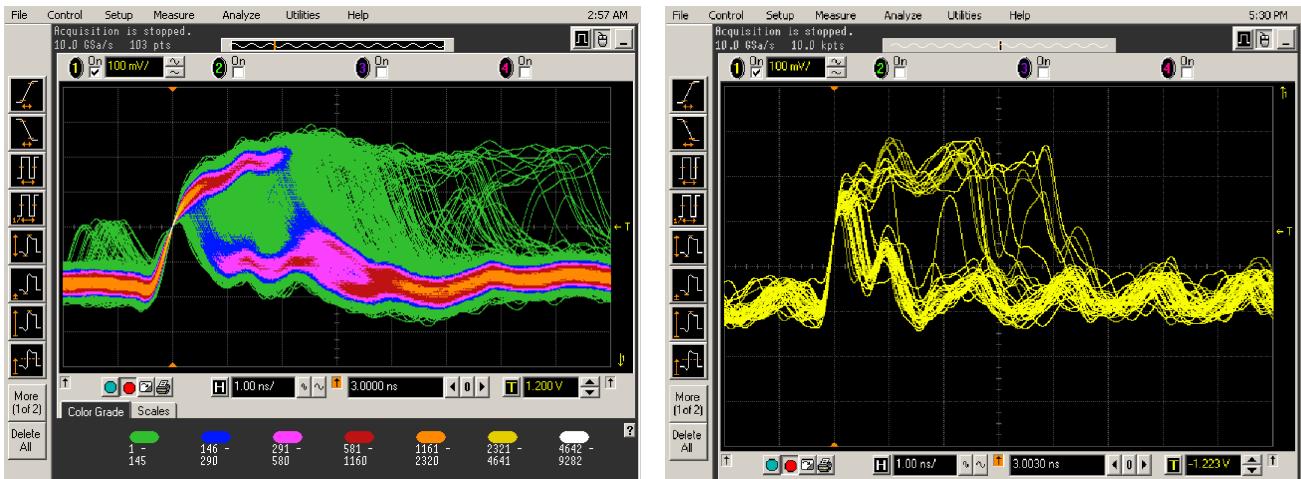


Рис. 4.17: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту.

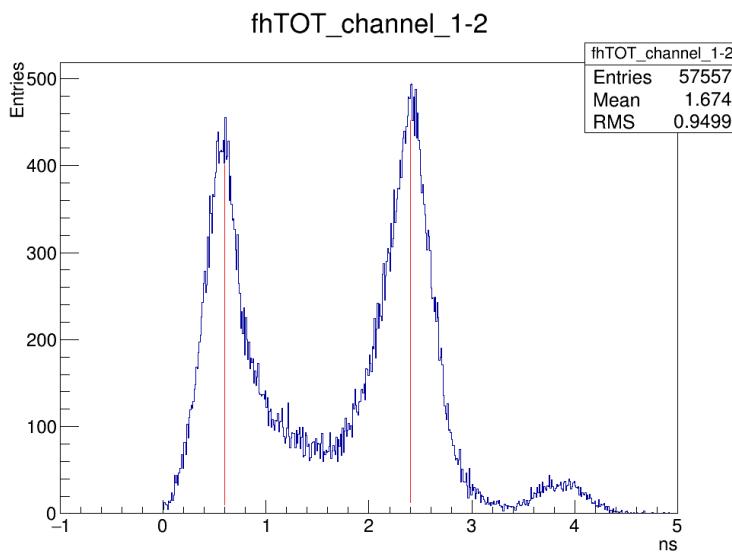


Рис. 4.18: Типичное распределение ToT.

Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в случае СВМ RICH, и продемонстрированные в данной работе параметры достаточны для уверенного поиска колец. Тем не менее, улучшение разделения сигналов и шумов и повышение эффективности регистрации поможет создать необходимый запас надежности для долговременной работы детектора в условиях постепенной деградации оптических свойств радиатора, зеркал и фотодетекторов.

## 4.8 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в секции 3.1, у МА ФЭУ H12700 имеются особенности, которые могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фотоэлектронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для прояснения этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределений с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XYTER, см. описание лабораторного стенда в секции 3.4.2. Далее, результаты амплитудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью платы PADIWA.

Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали наличие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелированных с источником света. Также были выполнены специальные измерения с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см. пикселя. Эти измерения позволили установить, что событие с малой амплитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале, находящемся в том же ряду динодной системы, был зарегистрирован фотоэлектрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выглядит как на рис. 4.19.

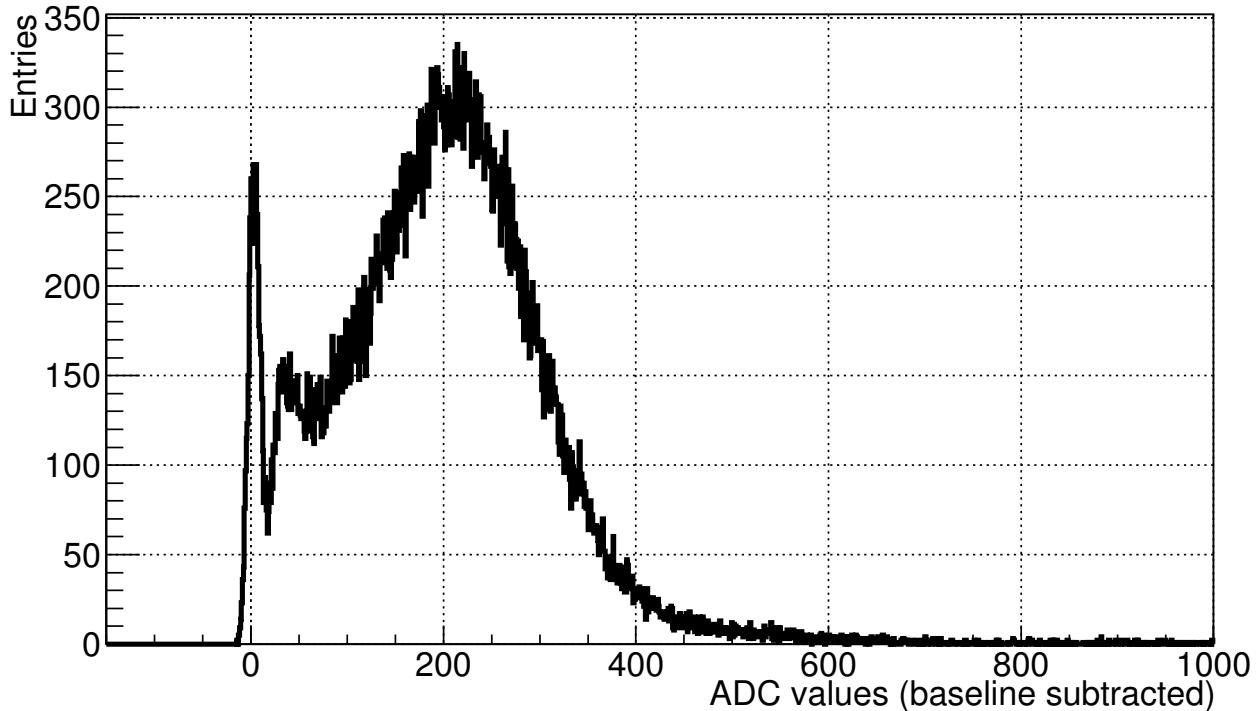


Рис. 4.19: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ H12700.

Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, расположенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одноэлектронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в секции 3.1 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется от оптимального пути от динода к диноду. Отметим, что в большинстве каналов уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения низкоамплитудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного сигнала. Таким образом, попытка получить максимальную эффективность регистрации за счет снижения порога приводит к возрастанию паразитных хитов, локализованных не в тех пикселях, где родился фотоэлектрон. Для снижения числа паразитных хитов мы ставили порог регистрации в ложбине между низко- и высоко-амплитудными частями одноэлектронного спектра. Поскольку формы одноэлектронных спектров во всех каналах подобны, анализ формы спектра на рис. 4.19 позволяет заключить, что выбранный нами порог приводит к потере 12 % одноэлектронных импульсов.

Одно из отличий канала считывания в плате PADIWA — это значительно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-XYTER осуществляется формирование со временем интегрирования 190 нс, то в PADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что соответствует характерному времени нарастания сигнала несколько наносекунд. Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов и наводок при регистрации сигналов с помощью PADIWA.

Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с помощью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях, построенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут быть получены из анализа потока данных, набранных при различных значениях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализованного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 3.2.1, позволяет получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но позволяет достичь максимальных частот, достаточных для локализации базовой линии. На рис. 4.20 показана зависимость частоты триггеров от порога регистрации. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более подробно исследованному ниже, а быстровозрастающие границы вокруг вертикальной штриховой линии ограничивают

локализацию базовой линии. Точность локализации базовой линии мы оцениваем как  $\pm 200$  отсчетов по шкале, использованной на рис. 4.20 и рис. 4.21B,D.

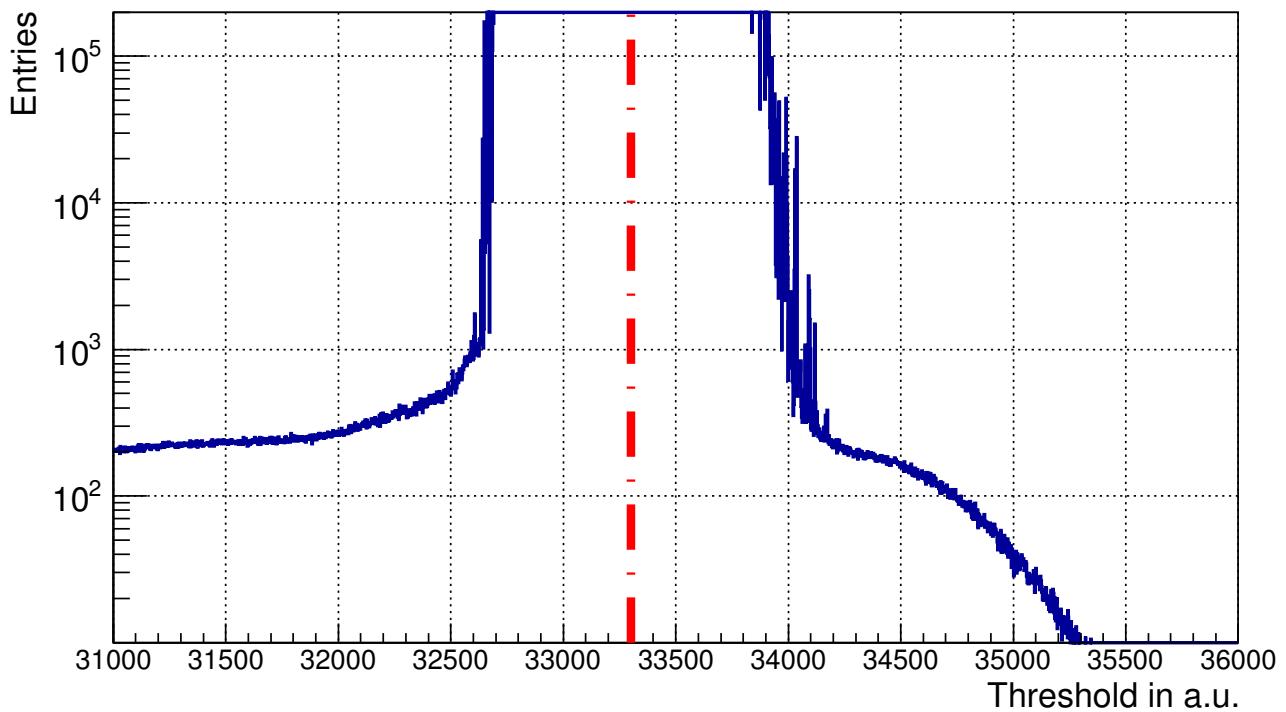


Рис. 4.20: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

Установлено, что результаты измерения частоты отсчетов, полученные с помощью счетчика и из анализа потока данных, совпадают между собой при условии, что система сбора и передачи данных справляется с передачей потока сообщений с временными отметками.

Интересно сравнить зависимость скорости счёта от порога при использовании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Результаты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на рис. 4.21. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 4.21C. Соответственно, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, показанным на рис. 4.21A. Сплошная линия на рис. 4.21B получена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 4.21D и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени. Отметим, что мы оцениваем равенство световых потоков как  $\pm 5\%$ . Видно, что скорости счёта в области ложбины и максимума одноэлектронного спектра приблизительно совпадают. Амплитуды, соответствующие максимуму и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом, в случае PADIWA наблюдается, с одной стороны более явно выраженная ложбина, а с другой — избыток счёта в малых амплитудах, что предполагает больший относительный вклад наводок и, следовательно, невозможность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра и нецелесообразность повышения эффективности за счёт установления порога ниже ложбины.

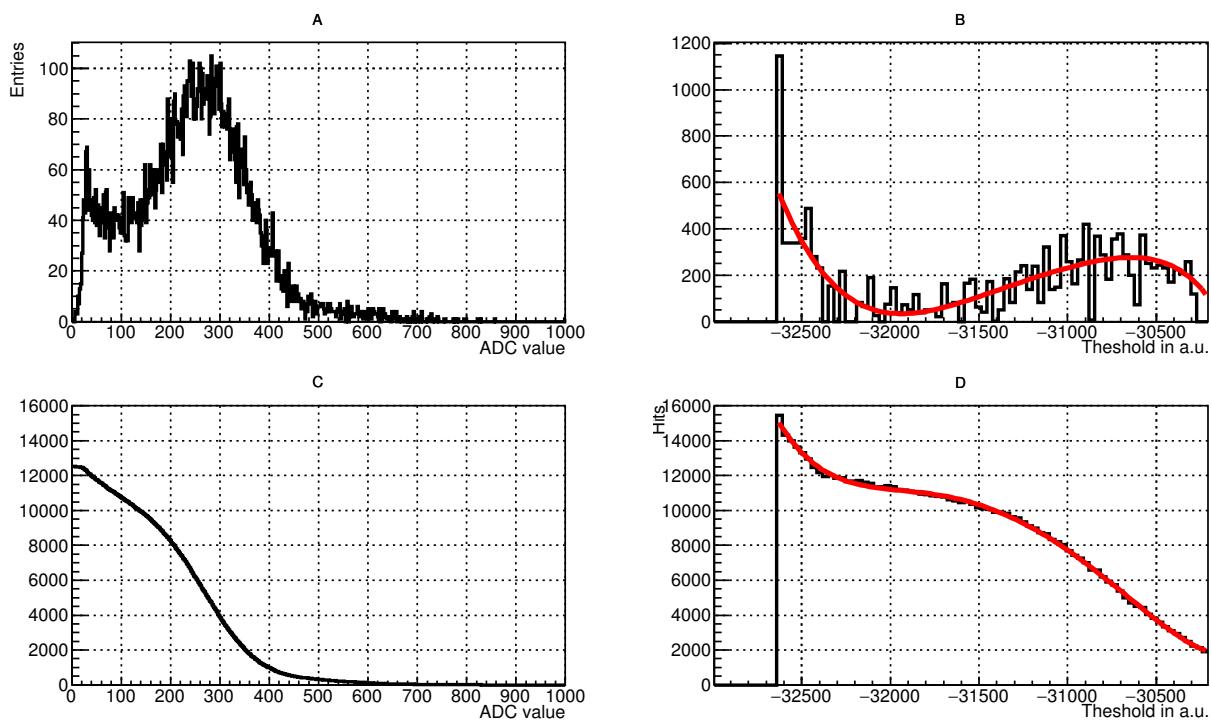


Рис. 4.21: Сравнение (А) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (Б) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRB v3; сравнение (С) интеграла одноэлектронного спектра и (Д) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

## Глава 5

# Применение разработанных методов к оптимизации СВМ RICH

# Заключение

## Основные результаты диссертационной работы

### Научная новизна результатов, полученных автором

1. Разработана схема отображения иерархии геометрии, используемой в моделировании транспорта частиц методом Монте Карло (МК), на дерево построений САПР CATIA v5.
2. В среде CATIA создан набор шаблонов для примитивов и сущностей конструктивной твердотельной геометрии, принятой в системах МК моделирования детекторов.
3. Создан набор инструментов для полуавтоматического построения детальной МК геометрии на основе САПР модели и быстрого обмена геометрией между САПР CATIA v5 и пакетами МК моделирования GEANT и ROOT.
4. Выполнены беспрецедентно точные параметризованные описания ряда приборов и детекторов в средах МК моделирования.
5. На основе детального параметризованного описания геометрии СВМ RICH выполнена оптимизация компоновки детектора.
6. Собран прототип системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH.
7. Разработано программное обеспечение для приема, упаковки и передачи бестриггерного потока данных с прототипа системы считывания и сбора данных с частотой до 20 МГц.
8. Разработано программное обеспечение для калибровки точного времени и относительных задержек каналов в потоке данных с детектора СВМ RICH.
9. Разработано программное обеспечение для построения событий из бестриггерного потока данных с детектора СВМ RICH в среде CbmRoot.
10. Проведены пучковые тесты прототипа системы считывания и сбора данных в составе полнофункционального прототипа детектора СВМ RICH и дополнительные тесты на лабораторном стенде.
11. Проведено комплексное исследование свойств канала считывания и сбора данных для СВМ RICH, реализованного на основе многоанодного ФЭУ H12700 с системой динодов “metal channel”, специально разработанных передней электроники типа предусилитель-дискриминатор и высокоточного ВЦП с последующим прямым вводом данных в единую среду моделирования, сбора и анализа данных CbmRoot.
12. Исследованы временные свойства нанесенного на окно МА ФЭУ сместителя спектра при возбуждении черенковскими фотонами.
13. Изучены возможности работы канала считывания при пониженных порогах.
14. Проведен сравнительный анализ особенностей считывания многоанодного ФЭУ временным и аналоговым трактами.
15. Исследованы характеристики детектора СВМ RICH с учетом неидеальности геометрии и шумов электроники.

## **Представление основных положений и результатов**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ЛИТ ОИЯИ и на различных международных конференциях и совещаниях, в том числе:

1. Семинар НОВФ ЛИТ ОИЯИ, Дубна, Россия, 22.12.2016  
Устный доклад “Development of the readout and DAQ system for CBM RICH and EXPERT. ‘CATIA-GDML geometry builder’ and Monte-Carlo geometry of CBM RICH.”
2. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, Москва, Россия, 14-15.12.2016  
Устный доклад “Detailed study of the stability and uniformity of the CBM RICH readout and DAQ prototype characteristics. Development and application of the Monte Carlo geometry package”
3. Международная конференция “The 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2016)”, Блед, Словения, 05-09.09.2016  
Представлен постер “Development of the CBM RICH readout electronics and DAQ”
4. Международная конференция “The 20th IEEE-NPSS Real Time Conference (IEEE-NPSS RT2016)”, Падуя, Италия, 05-10.06.2016  
Представлен постер “Development of the CBM RICH readout and DAQ”
5. Международная конференция “The XX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2016)”, ОИЯИ, Дубна, Россия, 14-18.03.2016  
Устный доклад “Development and characterization of CBM RICH readout and DAQ”
6. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, Москва, Россия, 15-17.12.2015  
Устный доклад “Development of ‘CATIA-GDML geometry builder’ and CBM RICH software”
7. Международное совещание “26th CBM Collaboration Meeting”, Прага, Чехия, 14-18.09.2015  
Устный доклад “PADIWA test measurements, beamtime analysis (TOT, WLS time resolution)”
8. Международное совещание “25th CBM Collaboration Meeting”, ГСИ, Дармштадт, Германия, 20-24.04.2015  
Устный доклад “Beamtime analysis: FLIB readout, TOT, timing”
9. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, Москва, Россия, 12-13.11.2013  
Устный доклад “Modernization of simulation and data acquisition packages of CBM experiment”
10. Международная конференция “20th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP)”, Амстердам, Нидерланды, 14-18.10.2013  
Представлен постер “Development and application of CATIA-GDML geometry builder”

## **Публикации**

# Список литературы

- [1] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6, 2006.
- [2] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments, Lect. Notes Phys. **814** (2011) pp. 980.
- [3] *P. Senger and V. Friese* // The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100, GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- [4] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. GSI, Darmstadt (2005) 406 p.
- [5] *V. Friese and C. Sturm* // CBM Progress Report 2014, ISBN: 978-3-9815227-2-3, 2015.
- [6] *A. Malakhov and A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- [7] *M. Koziel* // MVD Status: Integration, 25<sup>th</sup> CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.  
<https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960>
- [8] *J. Heuser et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS), GSI, Darmstadt (2013) 167 p.
- [9] *C. Höhne et al.* // Technical Design Report for the CBM Ring Imagine Cherenkov (RICH), GSI, Darmstadt (2013) 201 p.
- [10] *S. Chattopadhyay et al.* // Technical Design Report for the CBM Muon Chambers (MuCh), GSI, Darmstadt (2014) 192 p.
- [11] *S. Biswas et al.* // Development of a GEM based detector for the CBM Muon Chamber (MUCH), 2013 JINST 8 C12002.
- [12] *M. Petris et al.* // TRD detector development for the CBM experiment, NIM A, Volume 732, 21 December 2013, Pages 375–379.
- [13] *N. Herrmann et al.* // Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF), GSI, Darmstadt (2014) 182 p.
- [14] *I. Korolko* // CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status), 25<sup>th</sup> CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.  
<https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960>
- [15] *F. Guber et al.* // Technical Design Report for the CBM Projectile spectator detector (PSD), GSI, Darmstadt (2014) 78 p.
- [16] Hamamatsu H12700 manual, <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700 TPMH1348E.pdf>
- [17] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes, 2015 JINST 10 P09021.
- [18] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 multi-anode photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade, LHCb-INT-2015-006.
- [19] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500\\_H10966 TPMH1327E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966 TPMH1327E.pdf)
- [20] T. Mahmoud RICH2016 proceedings.
- [21] *C. Pauly et al.* // The CBM RICH project, NIM A 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.05.102.

- [22] *S. Reinecke et al.* // The CBM-RICH detector, JINST 11 (2016) no.05, C05016.
- [23] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal.
- [24] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>
- [25] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, and M. Traxler* // A novel approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS) TDC in an FPGA, 2016 JINST 11 C01046.
- [26] TRB v3 documentation, <http://jpc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf>
- [27] *W. M. Zabłotny and G. Kasprowicz* // Data processing boards design for CBM experiment, Proc. SPIE 9290, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014, 929023 (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2073377;
- [28] *J de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM Experiment at FAIR, 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006.
- [29] *J. Michel, M. Faul, J. Friese, C. Höhne, K.-H. Kampert, V. Patel, C. Pauly, D. Pfeifer, P. Skott, M. Traxler, and C. Ugur* // Electronics for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, 2017 JINST 12 C01072.
- [30] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Data acquisition and online monitoring software for CBM test beams, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001.
- [31] *C. Bergmann et al.* // Common CBM beam test of the RICH, TRD and TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014, CBM Progress Report 2014, p.9.
- [32] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector and radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress Report 2014, p.78.
- [33] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real conditions, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.
- [34] Information about the T9 beam line and experimental facilities, [http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight\\_students/information\\_about\\_the\\_t9\\_beam\\_line\\_and\\_experimental\\_facilities.pdf](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
- [35] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS SYSTEM.
- [36] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector, doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- [37] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- [38] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/datasheets/led\\_deeppuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deeppuv/uvtop240.pdf)
- [39] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21 May 2015, Pages 43–50.
- [40] Alphalas Picopower-LD series datasheet, [http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond\\_Pulse\\_Diode\\_Lasers\\_with\\_Driver\\_PICOPOWER-LD\\_ALPHALAS.pdf](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf)
- [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- [43] FLESnet development repository, <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
- [44] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Oucharenko, and C. Ugur* // HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41, GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- [45] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of the integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April 1997.
- [46] *С.А. Лебедев, Г.А. Осоков* // Быстрые алгоритмы распознавания колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- [47] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment at FAIR, ACAT2010 proceedings.

- [48] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout and DAQ prototype, PEPAN letters.
- [49] M. Dürr, private communication.
- [50] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon Counting, Academic Press, London 1984.
- [51] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.
- [52] Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование 2002 Физматлит ISBN 5-94052-048-0