

Разработка системы считывания и приёма данных детектора RICH эксперимента CBM

J. Adamczewski-Musch^a, P. Akishin^g, K.-H. Becker^b, S. Belogurov^{g,e}, J. Bendarouach^c, N. Boldyreva^d, C. Deveau^c, V. Dobyrn^d, M. Dürr^c, J. Eschke^a, J. Förtsch^b, J. Heep^c, C. Höhne^c, K.-H. Kampert^b, L. Kochenda^{d,e}, J. Kopfer^{b,c}, P. Kravtsov^{d,e}, I. Kres^b, S. Lebedev^{c,g}, E. Lebedeva^c, E. Leonova^d, S. Linev^a, T. Mahmoud^c, J. Michel^f, N. Miftakhov^d, W. Niebur^a, E. Ovcharenko^{*g}, V. Patel^b, C. Pauly^b, M. Penschuck^f, D. Pfeifer^b, S. Querschfeld^b, J. Rautenberg^b, S. Reinecke^b, Y. Riabov^d, E. Roshchin^d, V. Samsonov^{d,e,h}, V. Schetinin^{g,i}, O. Tarasenkova^d, M. Traxler^a, C. Ugur^a, E. Vznuzdaev^d, и M. Vznuzdaev^d

^aGSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, D-64291 Darmstadt, Germany

^bDepartment of Physics, University Wuppertal, D-42097 Wuppertal, Germany

^cInstitute of Physics II and Institute of Applied Physics, Justus Liebig University Giessen, D-35392 Giessen, Germany

^dNational Research Centre - Kurchatov Institute, B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, 188300 Gatchina, Russia

^eNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

^fInstitut für Kernphysik, Goethe University Frankfurt, D-60438 Frankfurt am Main, Germany

^gLaboratory of Information Technologies, Joint Institute for Nuclear Research (JINR-LIT), 141980 Dubna, Russia

^hSt. Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU), 195251 St. Petersburg, Russia

ⁱBauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, Russia

Содержание

Введение	2
1 Фотоэлектронный умножитель	5
2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH	7
2.1 64-канальный модуль считывания	7
2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ	13
3 Экспериментальные установки	14
3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах	14
3.2 Лабораторный стенд	18
4 Программное обеспечение	20
4.1 Распаковка	21
4.2 Калибровка точного времени	21

*eovchar@jinr.ru

4.3	Коррекция задержек между каналами	22
4.4	Построение хита	23
4.5	Построение события	24
4.6	Реконструкция	26
5	Результаты	26
5.1	Испытание системы сбора данных с использованием FLIB .	26
5.2	Калибровка точного времени (Fine time calibration)	26
5.3	Определение коррекций задержек между каналами	31
5.4	Временное разрешение	32
5.5	Исследование профиля высвечивания сместителя спектра . .	35
5.6	Время над порогом	37
5.7	Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании	39
	Заключение	42
	Список литературы	43

Аннотация

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приёма данных, состоящий из МА ФЭУ H12700, четырёх плат предусилителей-дискриминаторов RADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функции ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы прототипа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют временное разрешение от 21 до 64 пс (FWHM) в зависимости от способа калибровки точного времени. Проведена калибровка задержек между каналами. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс за все время измерений. Исследованы спектры “времени над порогом” (ToT). Выявлены влияние периодических наводок и необходимость совершенствования схемотехнических решений. Исследованы временные свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации черенковских колец. Наиболее интенсивная компонента характеризуется временем высвечивания 1.1 нс, также имеются компоненты с характерными временами 3.8 нс и 45 нс. Выявлено влияние особенностей одноэлектронного спектра на эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов. Временное разрешение совокупности из 256 каналов составляет 1.2 нс. Полученные результаты достаточны для использования исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM, однако устранение выявленных недостатков позволит создать запас по эффективности и повысить надежность системы при долговременной эксплуатации.

Введение

В настоящее время на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) [1] ведутся работы по созданию экспериментальной установки CBM (Compressed Baryonic

27 Matter) [2, 3, 4, 5]. Физическая программа CBM нацелена на всестороннее
28 изучение фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи и урав-
29 нения состояния вещества при экстремально высоких плотностях барион-
30 ной материи, получаемых при столкновении релятивистских ядер в экспе-
31 рименте с фиксированной мишенью.

32 Для реализации программы необходимы измерения выходов и распре-
33 делений в фазовом пространстве частиц, рождающихся в области взаимо-
34 действия. Для этого в каждом событии требуются:

- 35 • восстановление короткоживущих частиц, включая очень редкие, по
36 продуктам их распадов;
- 37 • идентификация долгоживущих продуктов взаимодействия;
- 38 • измерение центральности соударения;
- 39 • определение плоскости реакции.

40 Для выполнения различных измерений CBM будет функционировать
41 в двух конфигурациях — с мюонным детектором (MUCH) и с детектором
42 черенковских колец (RICH).

43 Схема экспериментальной установки с RICH представлена на рис. 1.

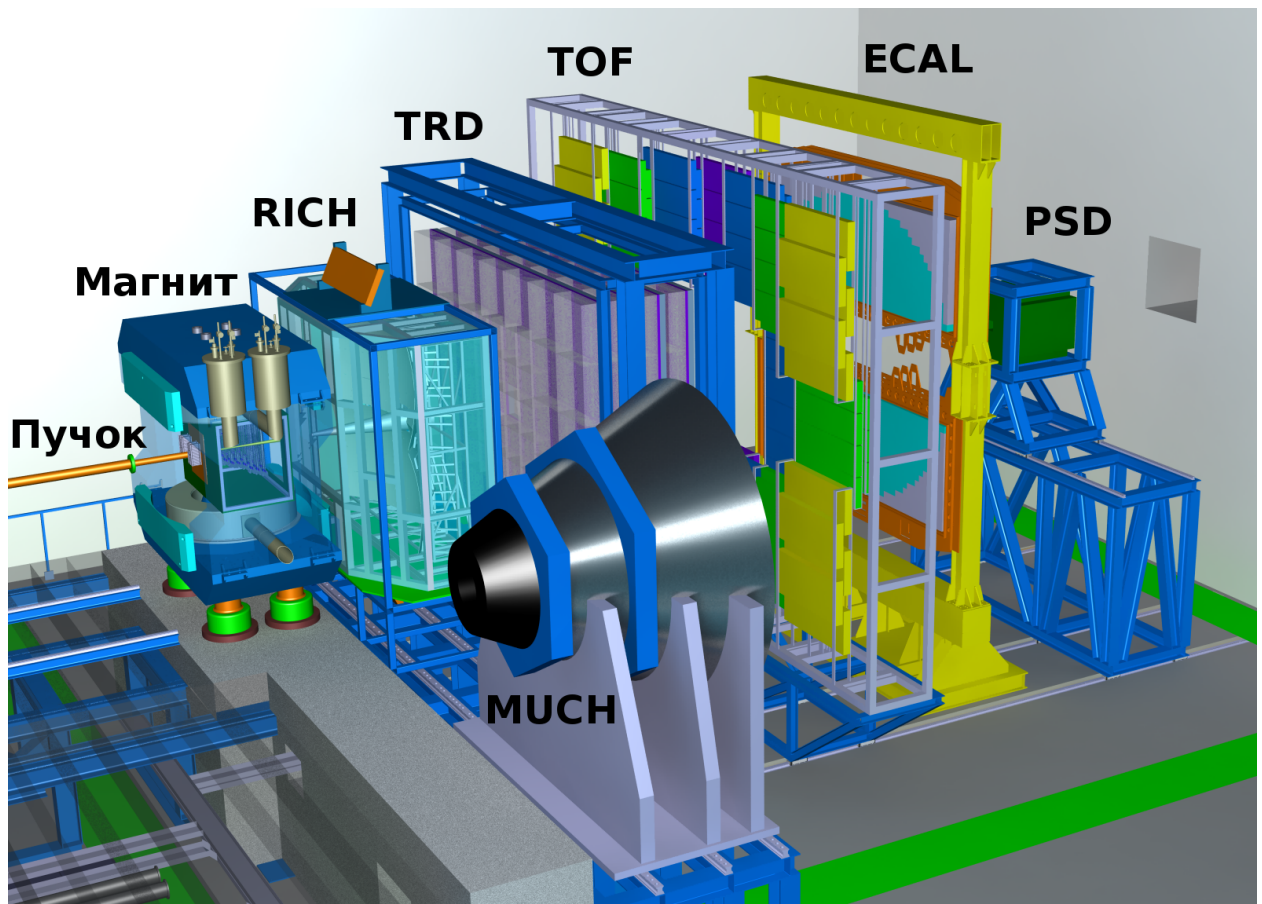


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH.

Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [6] расположена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микродетектор (MVD) [7], выполненный на основе монолитного пиксельного детектора типа MAPS. Ниже по пучку также между полюсами, но уже вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой системы (STS) [8], собранные из двухсторонних микроstriповых сенсоров. Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для реконструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импульсов с точностью не хуже 1% и нахождения вторичных вершин в условиях высокой множественности и плотности частиц.

Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детектор черенковских колец (RICH) [9], предназначенный для идентификации электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов и J/ψ частиц. Этот детектор, разработке которого посвящена данная статья, имеет радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под небольшим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментированных сферических зеркал радиуса 3 м и общей площадью 13 кв.м. В качестве позиционно-чувствительного фотодетектора используется многоанодный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H12700.

Во второй конфигурации на месте RICH стоит мюонная система (MUCH) [10], предназначенная в первую очередь для исследования частиц, распадающихся по димюонному каналу и состоящая из чередующихся слоев железа и газовых трековых камер [11].

Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструкции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от пионов [12].

Для идентификации адронов используется время-пролётный детектор (TOF) [13].

Электромагнитный калориметр (ECAL) типа “шашлык” необходим для регистрации прямых фотонов и фотонов от распада нейтральных мезонов (π^0, η) [14].

Детектор непровзаимодействовавших осколков ядер (PSD) [15] представляет собой сегментированный адронный калориметр и служит для определения центральности столкновения и плоскости реакции путем регистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами к пучку.

Эксперимент характеризуется высокой множественностью частиц, большой плотностью треков под малыми углами и высокой частотой взаимодействий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упакованных каналов считывания, работающих по бестриггерной схеме, с которых необходимо собирать и анализировать “на лету” большой поток данных.

В данной статье описаны результаты тестов прототипа систем регистра-

ции фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных. Были реализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и программные, соответствующих систем разрабатываемого детектора черенковских колец эксперимента СВМ. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа детектора RICH на пучке PS в ЦЕРН.

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. 1, по большинству параметров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ H8500 [19].

Таблица 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

119 до 2.5 мТл [17] без значительного падения характеристик. Использование
120 магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетектора в
121 пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использования в экспе-
122 рименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют интерес и другие
123 эксперименты, например, он рассматривается и для обновления LHCb [17].
124 Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ H12700B-03 име-
125 ет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных ФЭУ и
126 требующие особого внимания при реализации канала считывания. Размно-
127 жение электронов в динодной системе происходит в одном и том же ваку-
128 умном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный объём
129 динодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 2, отличается тем, что она
130 довольно компактна, едина для всех каналов и позволяет добиться отлич-
131 ных временных свойств. Электронные лавины, соответствующие разным
132 каналам, отличаются местом прохождения через динодную систему. Име-
133 ют место такие эффекты как выбивание электронов из динодов фотона-
134 ми, прошедшими сквозь фотокатод, и отклонение электронов от идеаль-
135 ной траектории за счет разброса энергий. Последняя особенность приво-
136 дит к попаданию электронов на последующие стадии динодной системы,
137 минуя предыдущие, и перетеканию всей или части электронной лавины в
138 соседний канал. Перетекание части лавины в соседний канал имеет место
139 в более чем 25% случаев при равномерном освещении всего фотокатода.
140 Величина перетекающего заряда составляет от 3% до 7% в зависимости
141 от взаимного расположения пикселей [17]. Вероятность того, что лавина
142 от фотоэлектрона полностью разовьётся в соседнем канале зависит от вза-
143 имного расположения каналов и составляет при равномерном освещении
144 от 0.1% до 2% [23]. Кроме того, при наличии относительно большого сиг-
145 нала в одном из каналов, наблюдается биполярная наводка в каналах, рас-
146 положенных в том же ряду. При интегрировании этой наводки возмож-
147 но формирование низкоамплитудных импульсов в нескольких каналах. В
148 классическом ФЭУ такие эффекты отсутствуют из-за отсутствия связи с
149 соседними каналами, наличия развитой системы фокусировки и такой кон-
150 струкции динодной системы, что диноды имеют большую площадь и по-
151 следующие стадии полностью экранируются предыдущими.

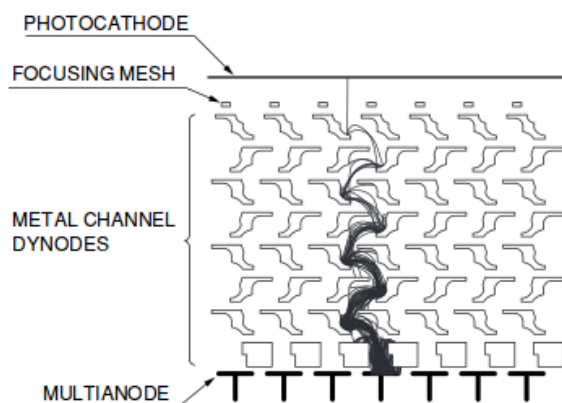


Рис. 2: Схема диодной системы типа “Metal Channel”.

152 Описанные особенности приводят к формированию в одноэлектронном
 153 спектре низкоамплитудной части, сливающейся с шумами и отделенной от
 154 основного пика довольно глубокой ложбинкой. Проявления этого эффекта
 155 в наших измерениях обсуждаются в секции 5.7.

156 2 Архитектура системы сбора данных СВМ RICH

157 2.1 64-канальный модуль считывания

158 Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифров-
 159 ки данных СВМ RICH может быть сгруппирована в 64-канальные модули,
 160 каждый из которых соответствует одному многоанодному фотоэлектрон-
 161 ному умножителю (МА ФЭУ). Схема 64-канального модуля показана на
 162 рис. 3. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату TRB v3.

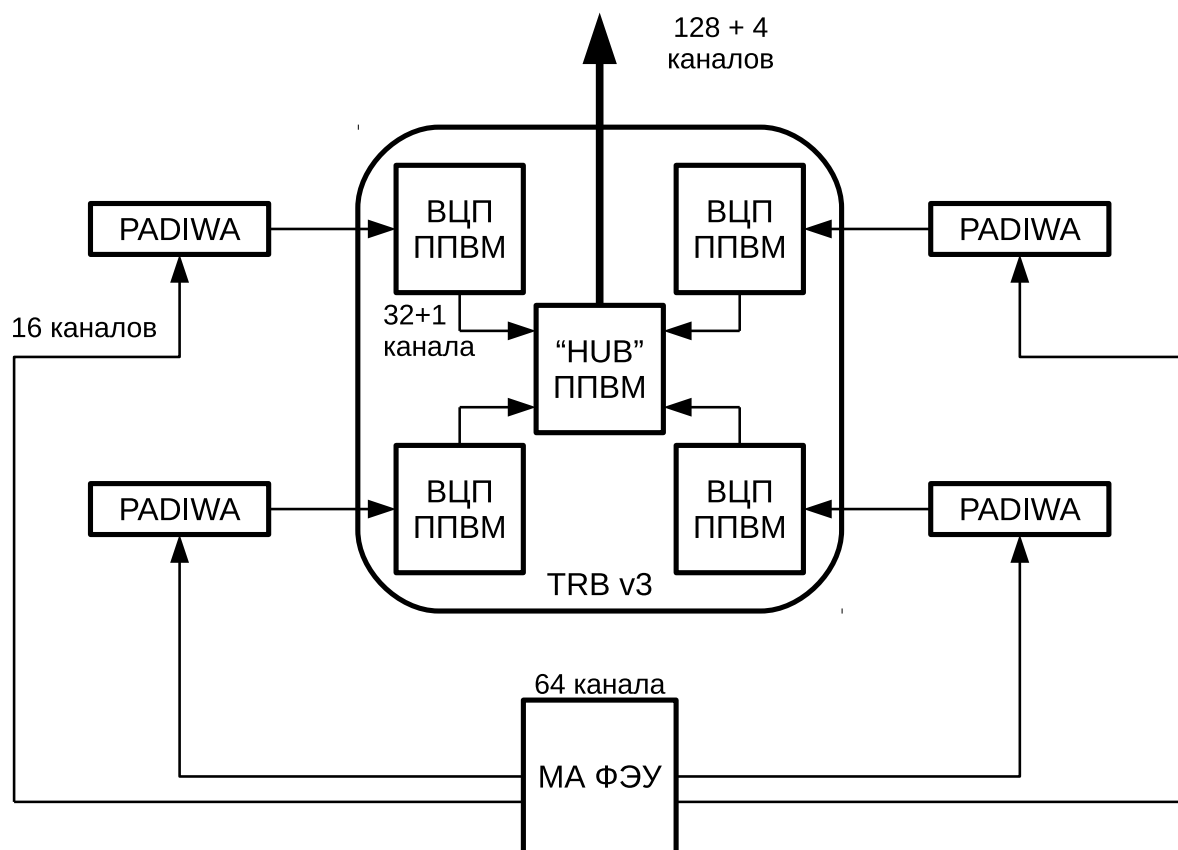


Рис. 3: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

РADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [24]. Общий вид платы RADIWA показан на рис. 4. Плата устанавливается на МА ФЭУ через плату-адаптер, единственным назначением которой является соединение анодов МА ФЭУ с соответствующими входами RADIWA. С одной стороны печатной платы RADIWA 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 RADIWA к плате-адаптеру любой стороной. Каждый канал RADIWA 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. 5. Далее расположены выходные порты и порты настройки

183 ППВМ, объединённые в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий.
184 Для управления платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS
185 линий — выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен
186 стандартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения
187 источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого имеется
188 датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика могут
189 использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев, если та-
190 кая возможность заложена в программе ППВМ.

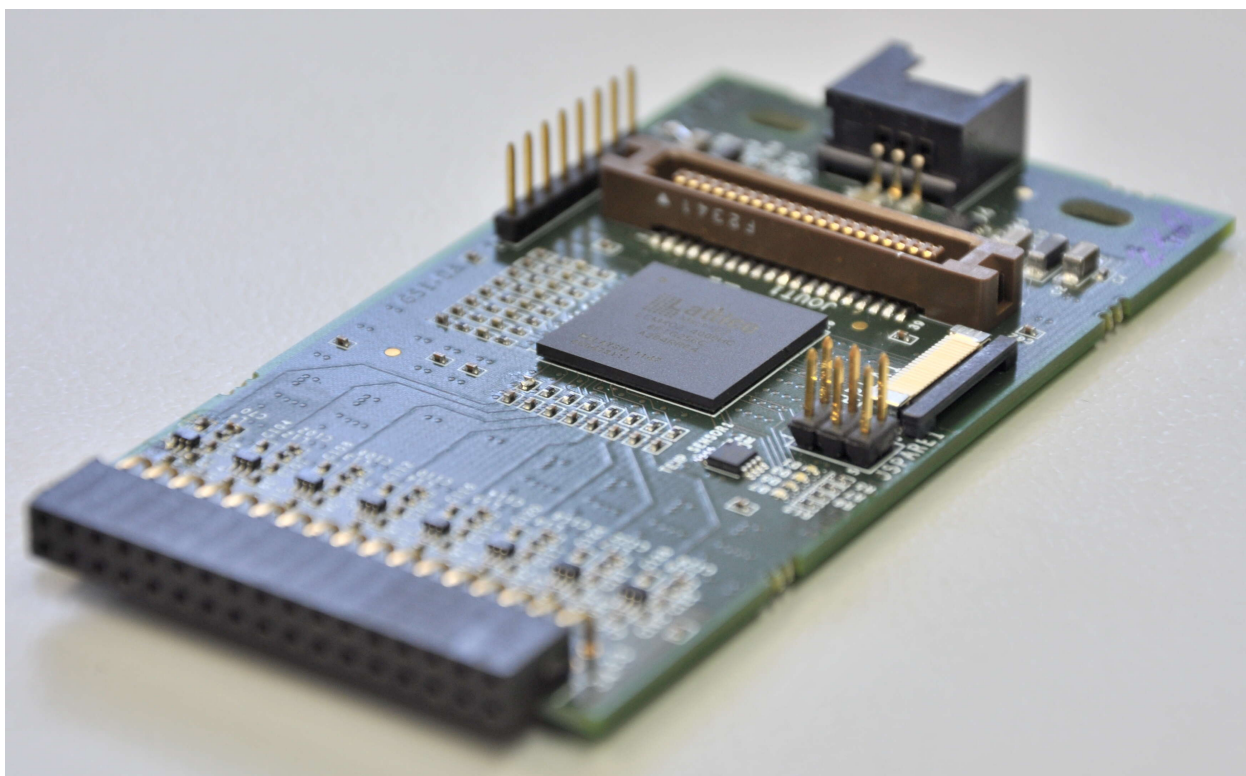


Рис. 4: Общий вид платы RADIWA.

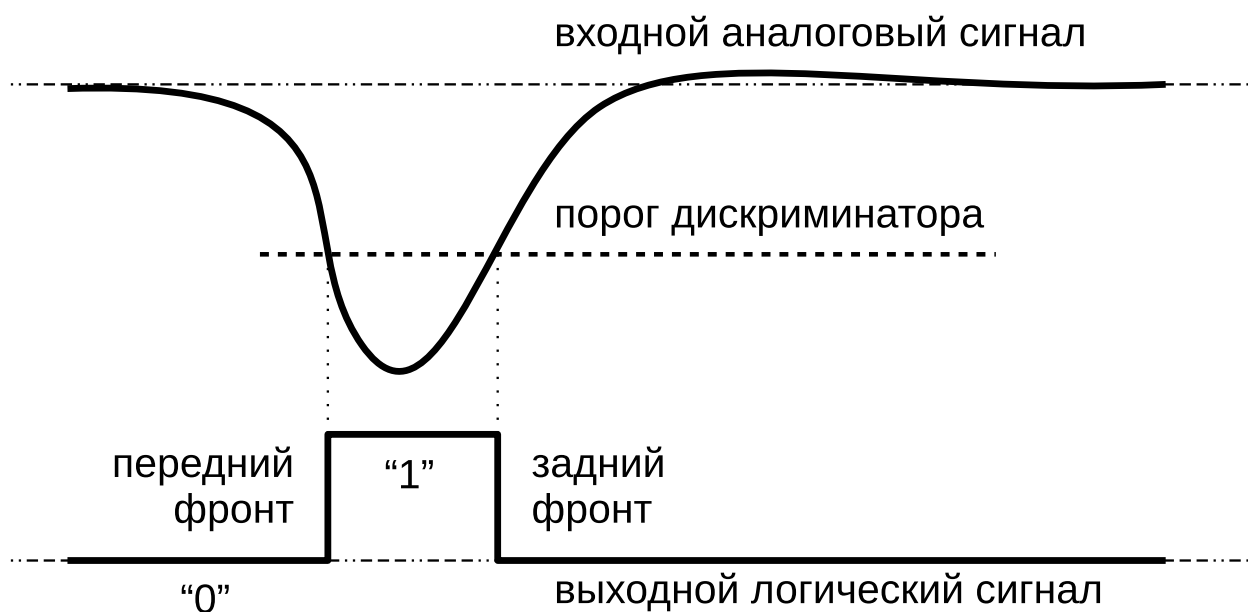


Рис. 5: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

191 Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППВМ, каждую из
 192 которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 централь-
 193 ную ППВМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППВМ
 194 запрограммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а цен-
 195 тральная ППВМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию платы
 196 будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

197 Выходные логические LVDS сигналы со всех 16 каналов платы PADIWA
 198 поступает в одну из периферийных ППВМ платы TRB v3, где каждый
 199 входной канал разветвляется на два канала ВЦП — первый чувствителен
 200 к переднему фронту, второй — к заднему. К получившимся 32 каналам в
 201 каждой периферийной ППВМ добавляется канал синхронизации. Таким
 202 образом, на выходе всей платы TRB v3 имеются 132 канала.

203 Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 6. Рядом с каждой перифе-
 204 рийной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоеди-
 205 нить платы расширения. В частности, существует специальная плата рас-
 206 ширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате TRB v3
 207 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые ис-
 208 пользуются для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с ком-
 209 пьютером.

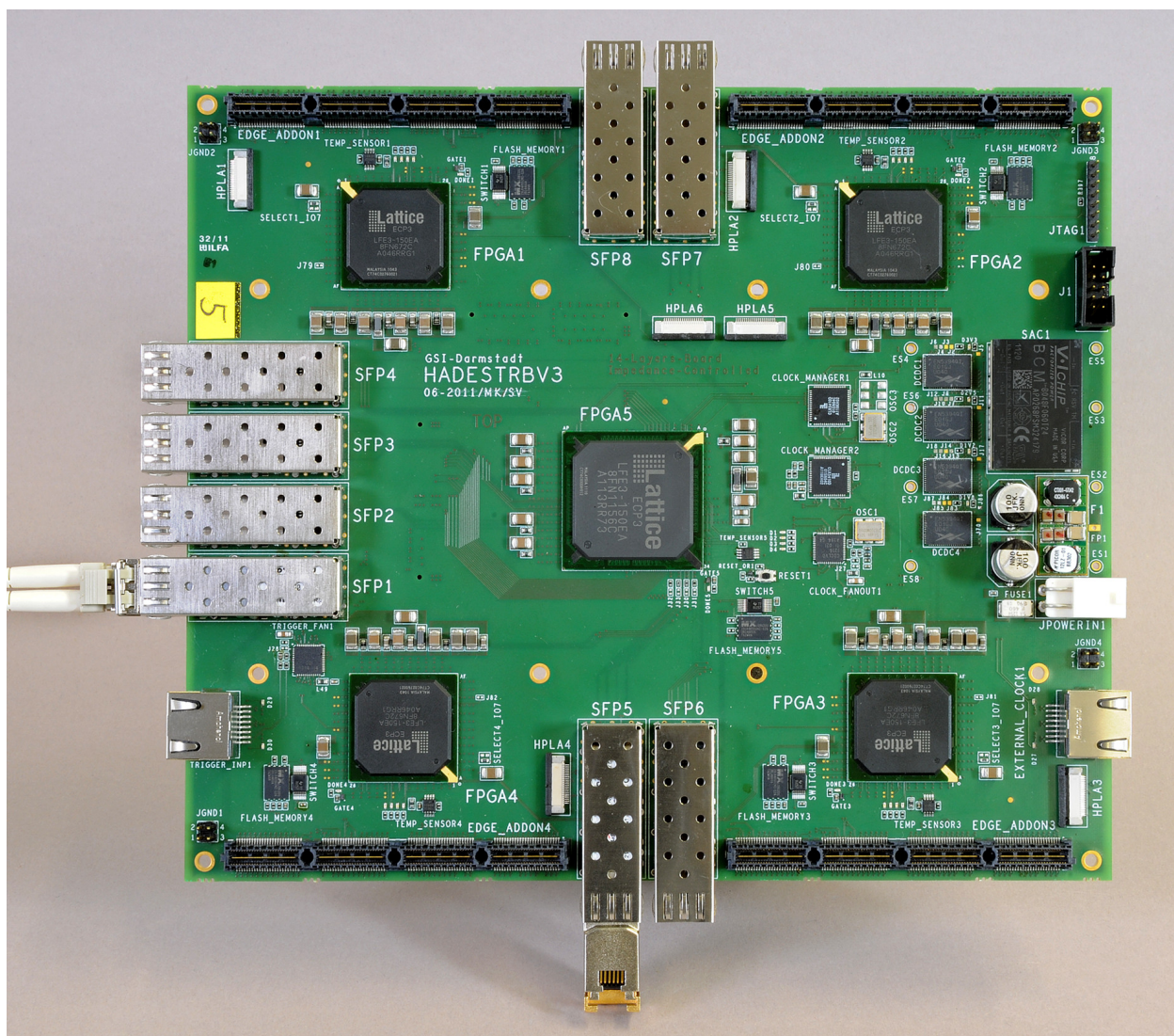


Рис. 6: Общий вид платы TRB v3.

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 5.2. 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. Гру-

226 бое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется
227 от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счетчика
228 называются эпохой (*epoch*), а 11 младших разрядов называются грубым
229 временем (*coarse*) [25]. При регистрации момента времени входного фрон-
230 та значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой и собствен-
231 но так называемой временной отметкой (*timestamp*). Чтобы уменьшить
232 поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивается каждые
233 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных отметок, принад-
234 лежащих данной эпохе.

235 Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный
236 регистр точного времени (*fine*). В регистр пишется значение счётчика точ-
237 ного времени, реализованного с помощью технологии Tapped delay line
238 (TDL) на 512-ти элементах. Теоретически, если все элементы задержки
239 идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный 5 нс, мож-
240 но разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной временной отмет-
241 ки была бы равна 9.9 пс, а полное время рассчитывалось бы как $T =$
242 $(epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

243 Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс пара-
244 метров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калибровка
245 результатов измерения точного времени относительно диапазона значений
246 регистра. Процедура калибровки и анализ ее качества обсуждаются в сек-
247 циях 4 и 5.2 соответственно.

248 Находящиеся на TRB v3 ППВМ формируют 4-байтовые сообщения од-
249 ного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER,
250 TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика фор-
251 мирования сообщений подробно описана в документации [26].

252 Рассмотрим для примера структуру сообщения типа TIMESTAMP, наи-
253 более информативного для нашего анализа. В зависимости от номера ка-
254 нала это сообщение может нести информацию о фронте синхронизации
255 SYNC, о переднем фронте хита LEAD или о заднем фронте хита TRAIL.

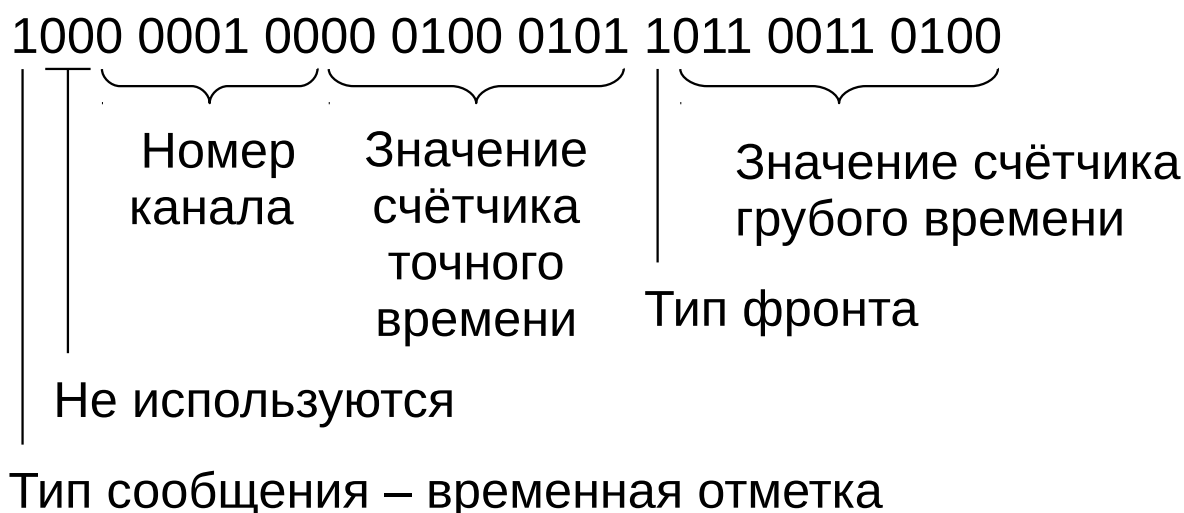


Рис. 7: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

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 диодной системе, временем распространения сигнала по проводникам и временем переключения логических элементов. Процедура коррекции задержек и ее особенности описаны далее в секциях 4 и 5.3.

2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

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

281 детектора способом и группируют эти данные в пакеты, называемые сре-
282 зами времени (time slice). В каждый срез времени попадают сообщения со
283 всех детекторов, имеющие временную отметку в заданном интервале. Да-
284 лее они передаются по меньшему числу оптических каналов с более высо-
285 кой пропускной способностью [27]. После этого данные поступают в память,
286 доступную центральному процессору ЭВМ по высокоскоростной шине че-
287 рез платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает
288 FLES Interface Board, а FLES [28], в свою очередь, обозначает First Level
289 Event Selector, т.е. специализированный аппаратно-программный комплекс
290 для построения событий “на лету” и их отбора по заданным критериям.
291 Плата FLIB может быть реализована, например, путем программирования
292 коммерческой PCI-E платы HTG K-7.

293 В случае пучковых тестов RICH плата передней электроники реализо-
294 вана как пара PADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется
295 объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [29]. В каче-
296 стве ROB используется плата TRB v3, сконфигурированная как concentra-
297 тор. Плата DPB находится в стадии разработки прототипа, а плата FLIB
298 была впервые применена в одном из протестированных вариантов системы
299 сбора данных. При этом значительная часть измерений была выполнена с
300 использованием стабильной системы сбора данных на основе DABC [30] и
301 обычной сетевой карты.

302 3 Экспериментальные установки

303 3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах

304 Исследование системы считывания и сбора данных проводилось в составе
305 полнофункционального прототипа детектора RICH эксперимента CBM в
306 ходе комплексных пучковых испытаний прототипов нескольких детекторов
307 того же эксперимента [31]. Подробности реализации прототипов детектора
308 переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в рабо-
309 тах [32] и [33] соответственно. Схема установки представлена на рис. 8.

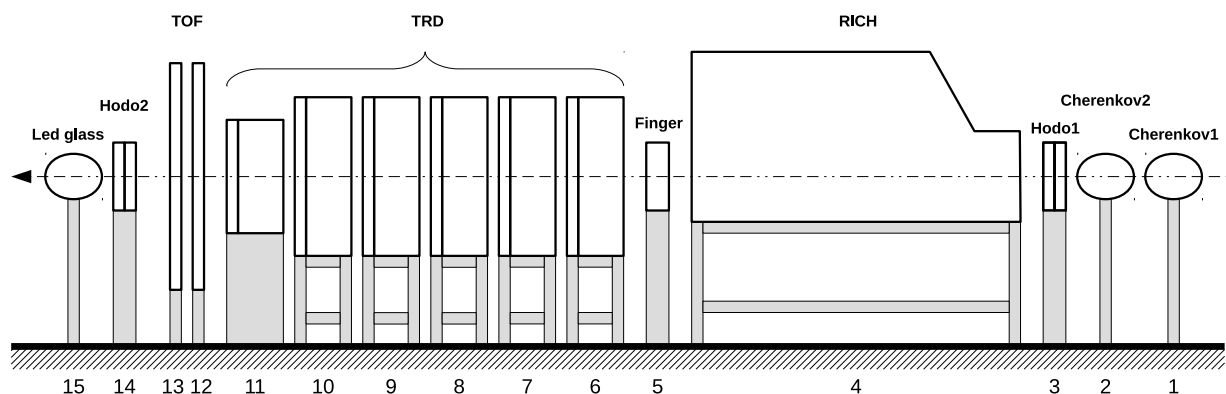


Рис. 8: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции прототипа детектора переходного излучения; 12-13 — станции прототипа время-пролётного детектора; 15 — электромагнитный калориметр из свинцового стекла.

310 Вывод пучка Т9 ускорителя PS [34] в ЦЕРНе представляет собой сме-
 311 шанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов импульсом, на-
 312 страиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых тестов
 313 пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода со-
 314 ставляла около 2 секунд, причем за это время регистрировалось в среднем
 315 500 электронов.

316 Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена на
 317 рис. 9.

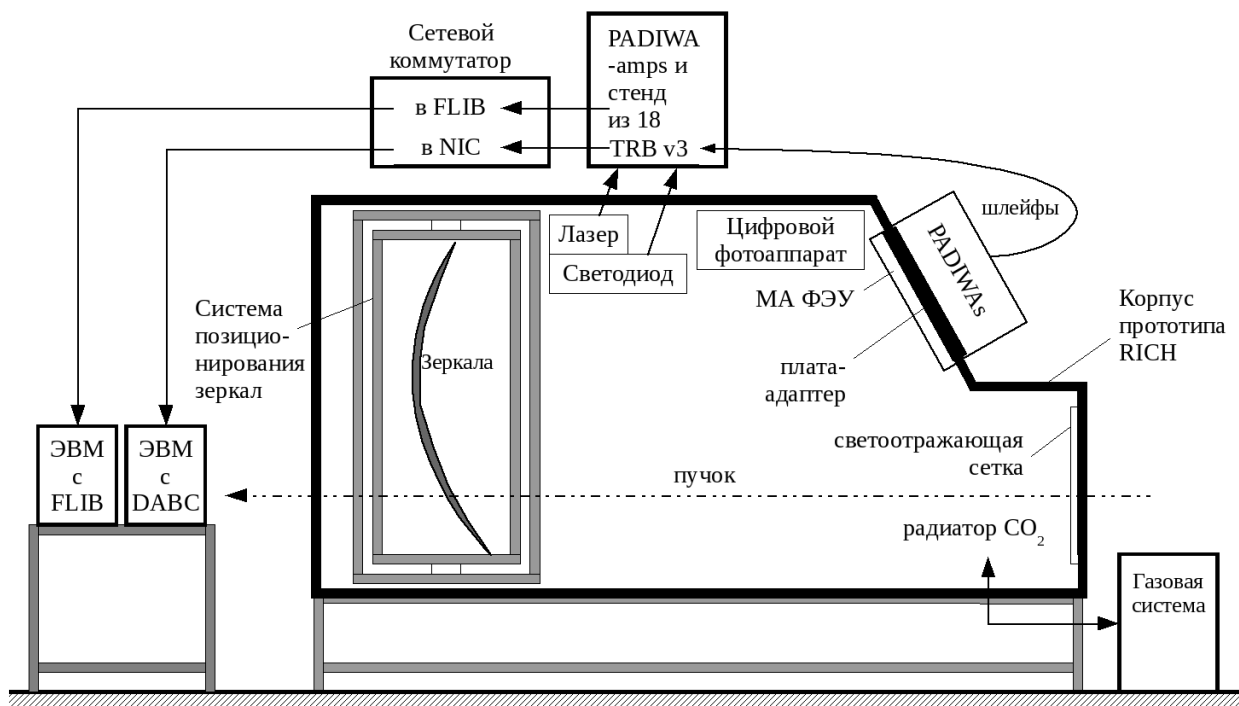


Рис. 9: Схема прототипа детектора RICH.

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 моторизованных 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 удалённо. Сетка сделана из полос ретрорефлектора шири-

ной 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 мониторинга системы считывания и калибровки относительных задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphalas Picorpower 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 2.1. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предусилителей-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 TRB v3 по медному носителю, а другая через FLIB с одной (18-й) платы TRB v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рис. 10. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

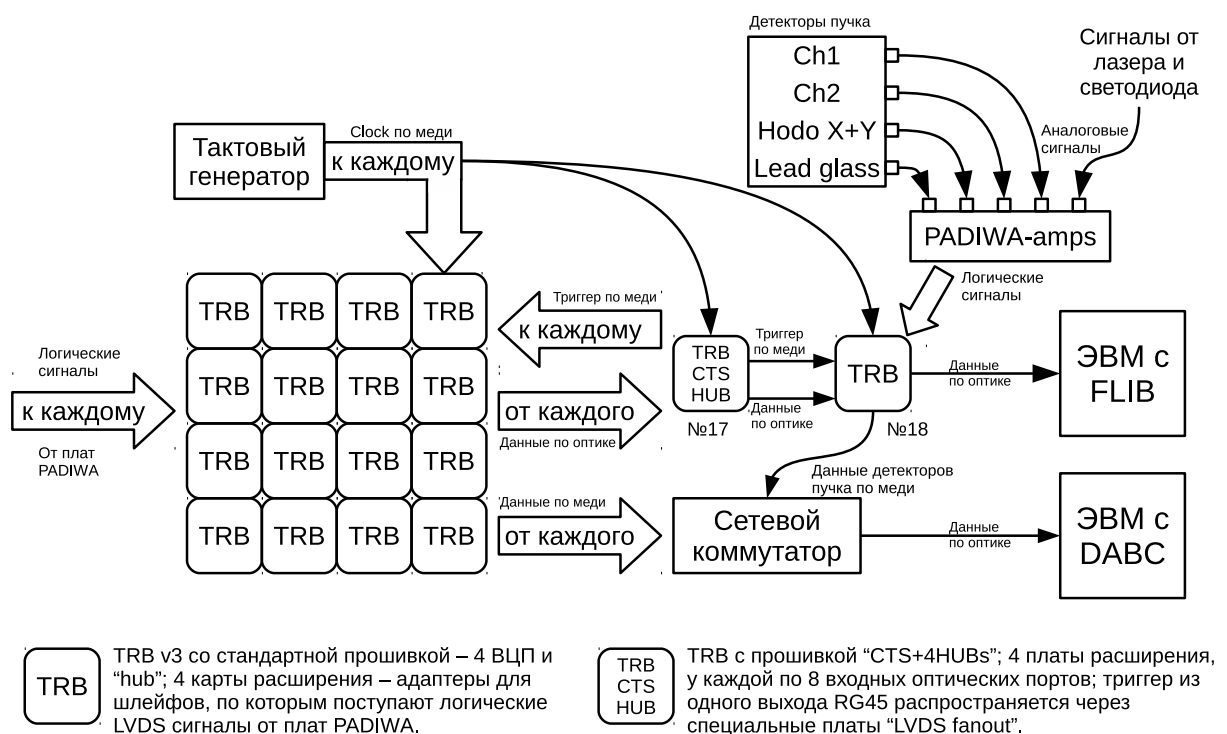


Рис. 10: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

3.2 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 отметок 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 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, подключаемой 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. 11.

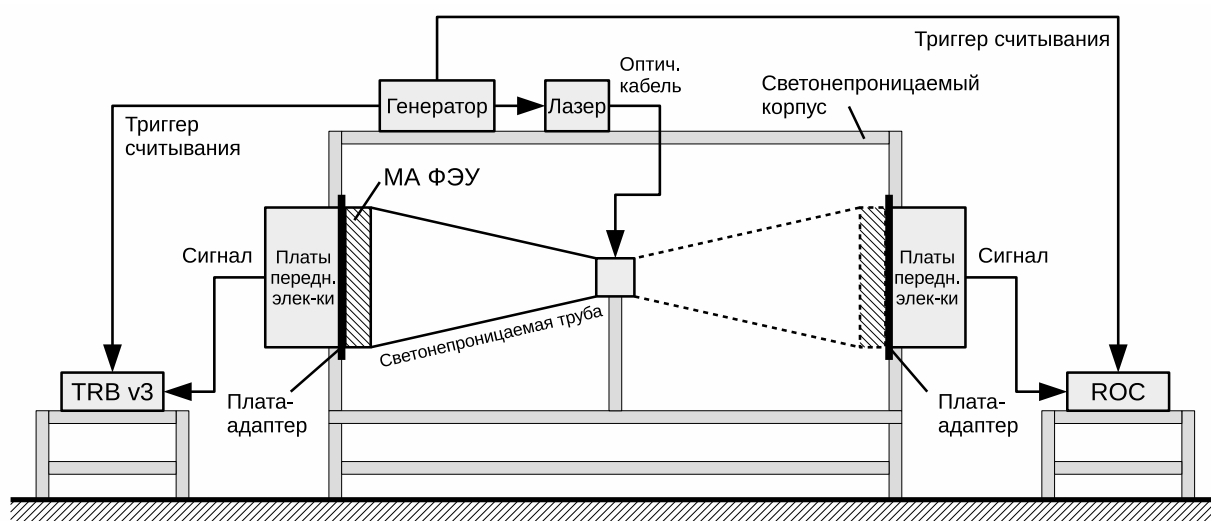


Рис. 11: Схема лабораторной установки.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picorpower 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

434 корпуса обязательно выдерживался интервал не менее одного часа. В лю-
435 бой момент была возможность удалённо выключить лазер и исследовать
436 темновой шум МА ФЭУ. Для снижения наводок от люминесцентных ламп
437 на время измерений свет в помещении выключался.

438 Две системы считывания и сбора данных были установлены одновре-
439 менно, каждая на своей стороне корпуса. Упомянутая выше пластиковая
440 труба, рассеивающее стекло и МА ФЭУ поворачиваются как единое целое,
441 обеспечивая одинаковые условия засветки МА ФЭУ в положениях, соот-
442 ветствующих работе с обеими системами считывания.

443 Опорные печатные платы-адаптеры необходимы для того, чтобы на них
444 с одной стороны крепились МА ФЭУ, а с другой — платы передней элек-
445 троники. Плата-адаптер вмонтирована стенку коробки и выполняет роль
446 каркаса и светоизолятора. Также по ней разведено питание МА ФЭУ. Вся
447 считывающая электроника питалась низким напряжением, а МА ФЭУ вы-
448 соким напряжением от высоковольтного источника.

449 Обе системы считывания и сбора данных являются самозапускающи-
450 мися в том смысле, что каждый импульс на входе, при преодолении уста-
451 новленного порога, регистрируется и заносится в выходной буфер. Однако
452 для того, чтобы данные из выходного буфера были отправлены в ЭВМ,
453 необходимо периодически посылать во вспомогательный вход контроллера
454 считывания специальный импульс, называемый триггером считывания. В
455 нашей установке импульсы генератора, управляющего лазером, одновре-
456 менно играют роль триггера считывания выходного буфера. В использу-
457 емых системах считывания и сбора данных триггер считывания автома-
458 тически поступает во входной поток данных. Это позволяет анализиро-
459 вать зарегистрированные временные отметки, сопоставляя их с моментом
460 вспышки лазера. Съём данных с обеих систем считывания и сбора дан-
461 ных осуществлялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой интерфейс
462 ЭВМ.

463 4 Программное обеспечение

464 Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа
465 CBM RICH представляет собой набор модулей приема, первичной обработ-
466 ки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса
467 CbmRoot [42]. CbmRoot вместе с FLESnet [43] образуют инфраструктуру,
468 позволяющую выполнять приём данных, моделирование, реконструкцию и
469 анализ данных эксперимента CBM.

470 Соответствующим образом сконфигурированное приложение, написан-
471 ное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный слу-
472 чай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считывания
473 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. 12. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков описаны ниже.

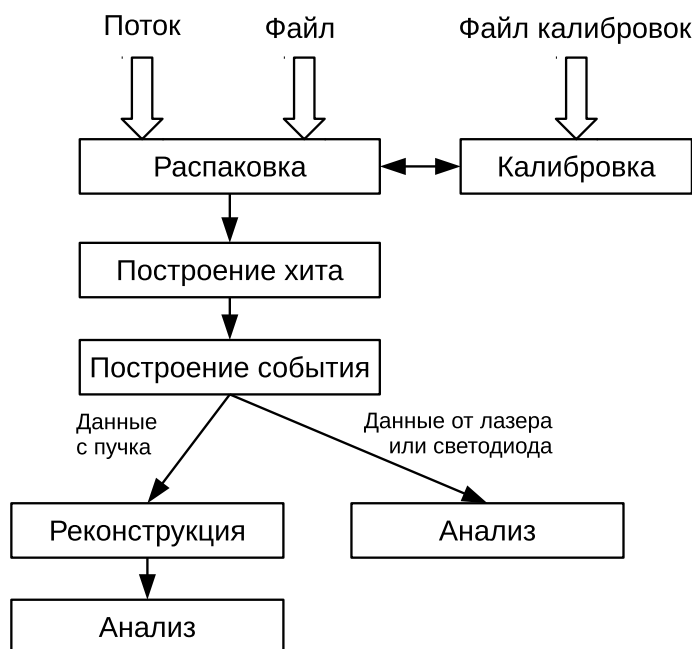


Рис. 12: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

4.1 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 интерфейсного 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*.

4.2 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 результа-

те 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.

4.3 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 CbmRoot, возможно, с применением параллельных расчётов. Второй макрос строит 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 $M \cdot M$. В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, относительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по сути, столбцом матрицы A .

533 4.4 Построение хита

534 Сигнал от каждого зарегистрированного фотона, называемый хитом, со-
535 стоит из двух сообщений, содержащих временные отметки переднего и зад-
536 него фронтов. Т.к. разные каналы имеют разные задержки и вероятность
537 регистрации отдельных фронтов не равна 100%, необходимо было в анали-
538 зе данных реализовать алгоритм подбора пар фронтов. Данная процедура
539 реализована в task-классе *CbmTrbEdgeMatcher*, который стоит в конвей-
540 ере после распаковки и фактически выполняется после применения всех
541 калибровок.

542 Для каждого внешнего канала был реализован буфер сообщений, ко-
543 торый наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее,
544 как только приходил задний фронт, из буфера выбирался наиболее близ-
545 кий по временной отметке передний фронт внутри заданного допустимого
546 временного окна. На рис. 13 приведён пример буфера передних фронтов
547 для заданной пары внутренних каналов в момент прихода одного заднего
548 фронта. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий об ампли-
549 туде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок заднего и
550 переднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как положительные,
551 так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны накладывается
552 ограничение.

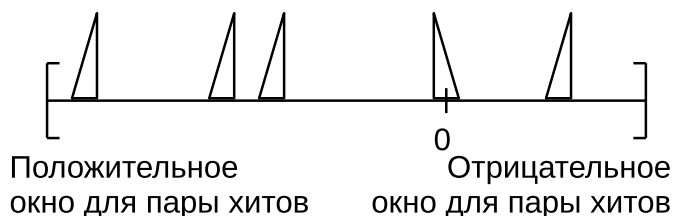


Рис. 13: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

553 Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный (передний либо
554 задний) фронт, буфер постепенно наполняется и его необходимо очищать,
555 чтобы избежать переполнения. Если для поступившего заднего фронта нет
556 кандидата переднего фронта в буфере это означает, что передний фронт
557 не был зарегистрирован. В таком случае этот задний фронт отбрасыва-
558 ется. Количество ненайденных фронтов сильно зависит от нагруженности
559 входного канала ВЦП, которая в свою очередь зависит от порога дискри-
560 минатора. При низком пороге регистрируется высокочастотный шум элек-
561 троники, что приводит к формированию огромного потока выходных со-
562 общений, которые не могут быть переданы из-за ограниченной пропускной
563 способности выходного тракта системы считывания.

564 Предусмотрена возможность допускать одиночные передние фронты в
565 качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла, т.к. в

566 нормальном режиме ненайденные пары в основном обусловлены ошибками
 567 ВПЦ и доля таких сообщений пренебрежимо мала — менее $2 \cdot 10^{-4}$.

568 4.5 Построение события

569 В силу того, что электроника бестриггерная и приём данных осуществля-
 570 ется порциями, называемыми DAQ-событиями, никак не связанными с ре-
 571 альными событиями, для формирования корректной входной информации
 572 для реконструкции и дальнейшего анализа данных необходимо выполнять
 573 процедуру построения события.

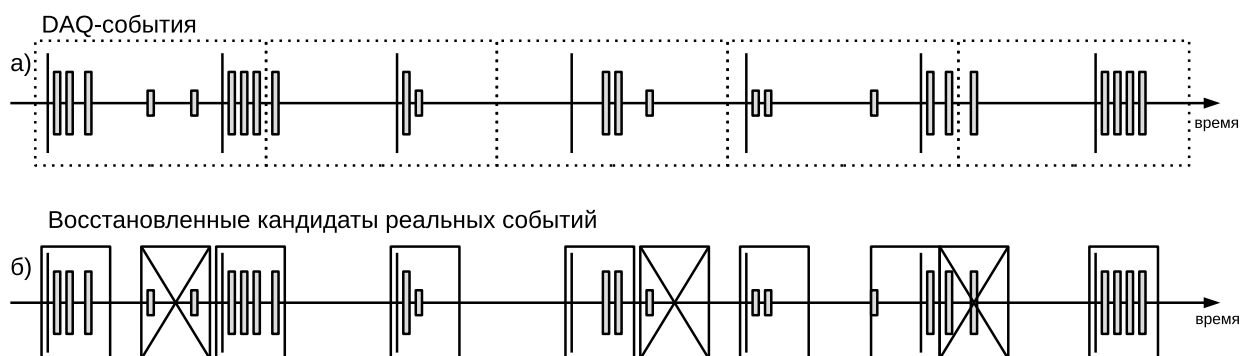


Рис. 14: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

574 Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 14, в
 575 течение которого поступают:

- 576 • Триггерные сигналы — импульсы с генератора, питающего лазер, ли-
 577 бо сигналы с детекторов пучка;
- 578 • Сигналы, скоррелированные с импульсами с генератора или детекто-
 579 рами пучка, т.е. связанные со светом;
- 580 • Шумовые сигналы, распределённые равномерно во времени.

581 Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-событий,
 582 следовательно, необходимо при построении реальных событий смотреть на
 583 несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей электроники не гаран-
 584 тируется, что входная информация поступает упорядоченной во времени.
 585 Поэтому периодически случается, что хиты реального события, пришедше-
 586 го 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. 15 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.

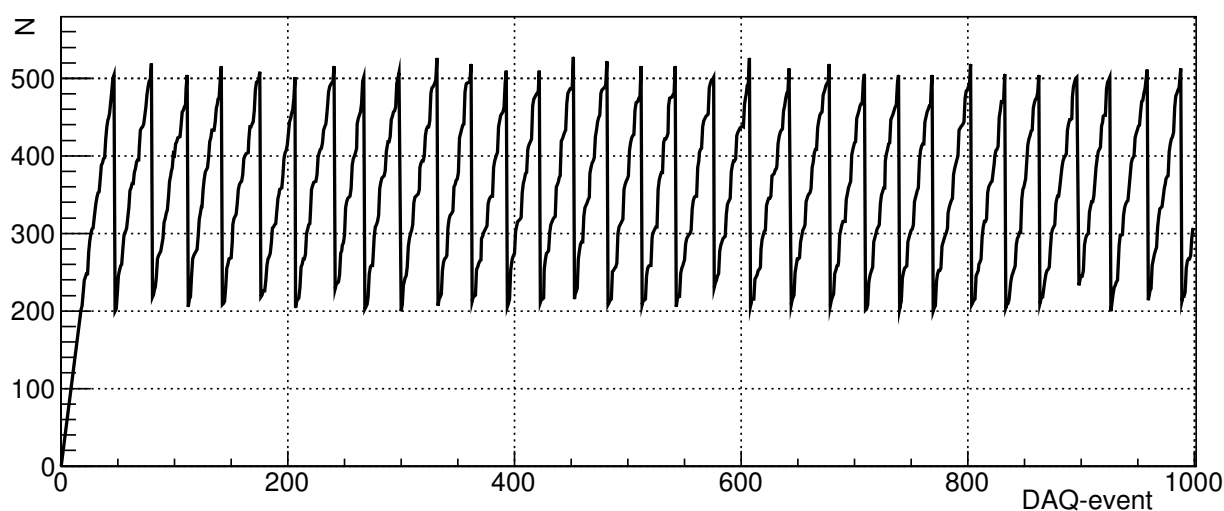


Рис. 15: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

610 4.6 Реконструкция

611 Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости
612 реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит как
613 загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, после фоку-
614 сировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствительной камеры,
615 которая в общем случае может состоять из нескольких плоскостей. Первый
616 этап реконструкции — перевод хитов из плоскостей камеры в плоскость ре-
617 конструкции. Затем выполняется поиск колец по хитам. В CbmRoot есть
618 реализации нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практиче-
619 ский интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковско-
620 го излучения, основанный на проеобразовании Хафа, описанный в рабо-
621 тах [46, 47]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована
622 для данных пучковых тестов, в которых ожидается одно кольцо на событие.
623 Данный алгоритм реализован в классе *CbmRichProtRingFinderHoughImpl*,
624 унаследованном от *CbmRichProtRingFinderHough* и далее от *CbmRichRingFinder*.
625 После этого определяются параметры кольца и далее реконструкция с при-
626 менением информации с других детекторов.

627 5 Результаты

628 5.1 Испытание системы сбора данных с использовани- 629 ем FLIB

630 Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами
631 сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов распа-
632 ковки обоих потоков. На массиве составляющем примерно 10^7 сообщений
633 расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована работоспо-
634 собность концепции формирования временных интервалов и ввода данных
635 в компьютер с использованием FLIB. Приведённые в следующих разделе
636 лах результаты получены на основе данных, принятых через стандартный
637 сетевой интерфейс с применением DAQ ПО на основе DABC [30].

638 5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

639 Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных ла-
640 бораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 16. По оси абсцисс
641 откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — зна-
642 чение точного времени в наносекундах. Вид графика не зависит от того,
643 по каким данным он был построен, так как он определяется архитектурой
644 время-цифрового преобразователя. Обратим внимание, что в показанном
645 примере в диапазоне значений десятибитного счетчика точного времени

646 интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс, соответствуют от-
647 счеты от 30 до 520. Точные границы интервала определяются значениями
648 задержек на элементах цифровой линии задержки. Эти величины индиви-
649 дуальны и зависят от флуктуаций технологического процесса.

650 С целью понимания особенностей работы счётчиков точного времени,
651 каждая таблица калибровки точного времени была аппроксимирована кусочно-
652 линейной функцией. На рис. 17 показан пример разности значений функ-
653 ции калибровки точного времени и линейной функции. Видно, что откло-
654 нения не превышают 60 пс.

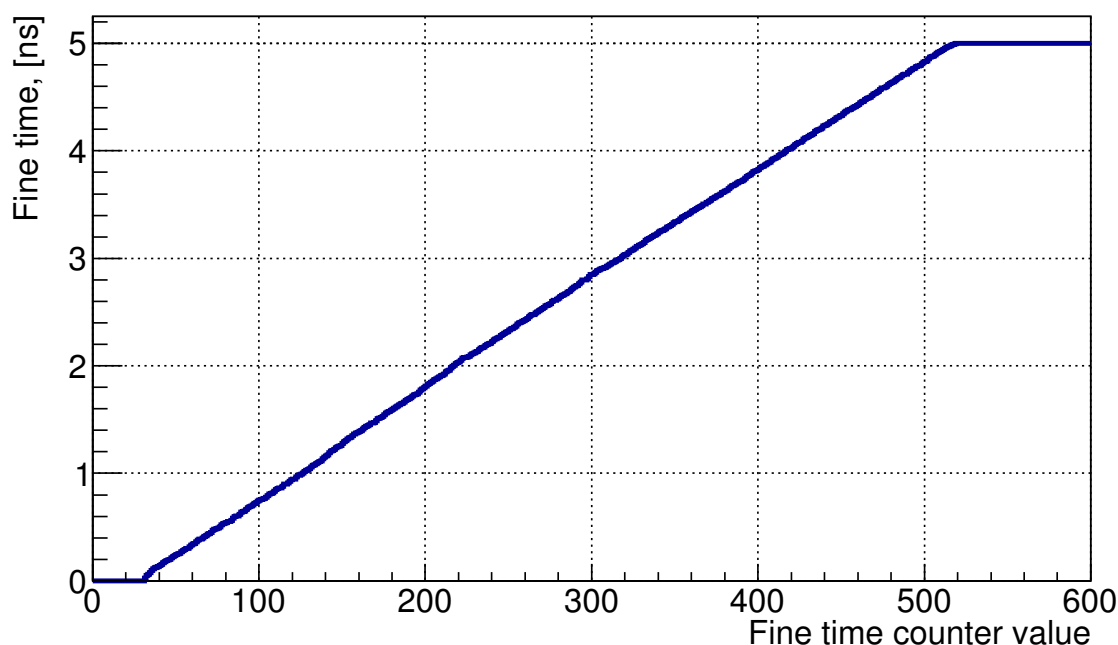


Рис. 16: Пример калибровочной кривой.

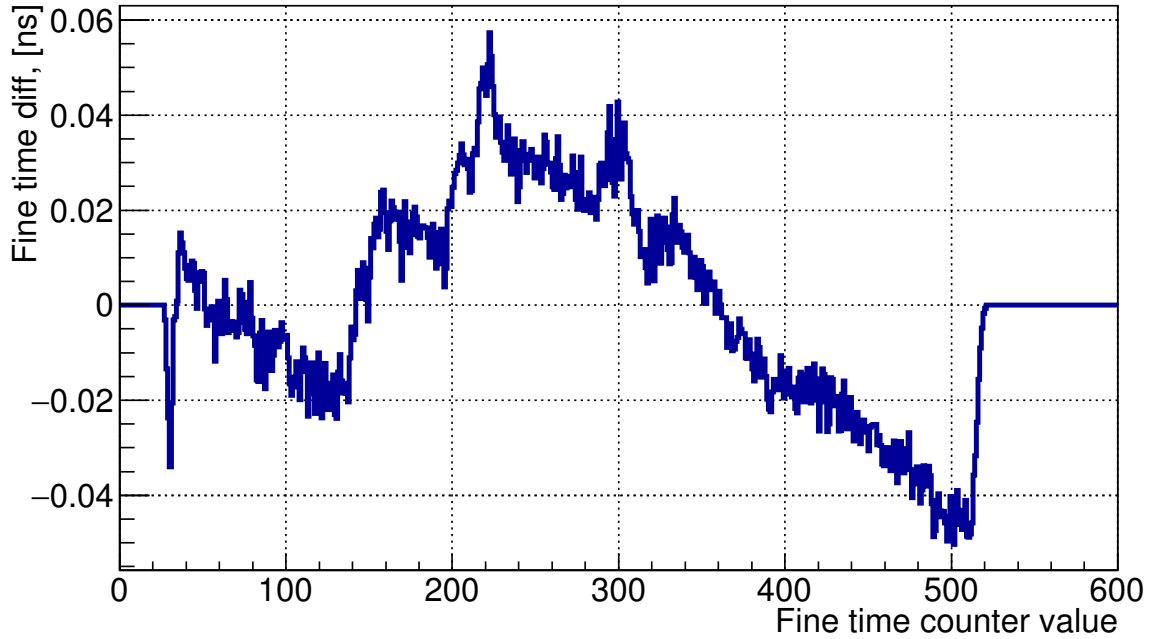


Рис. 17: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

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. 18. 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. 18 сплошным квадратом). Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом входном канале показаны на рис. 19. 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 флуктуирующих каналах ВЦП составляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разрешению 21 пс. Использование индивидуальной линейной функции приводит к увеличе-

нию ширины до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах. Отметим, что применение усредненной 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 усредненной 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.

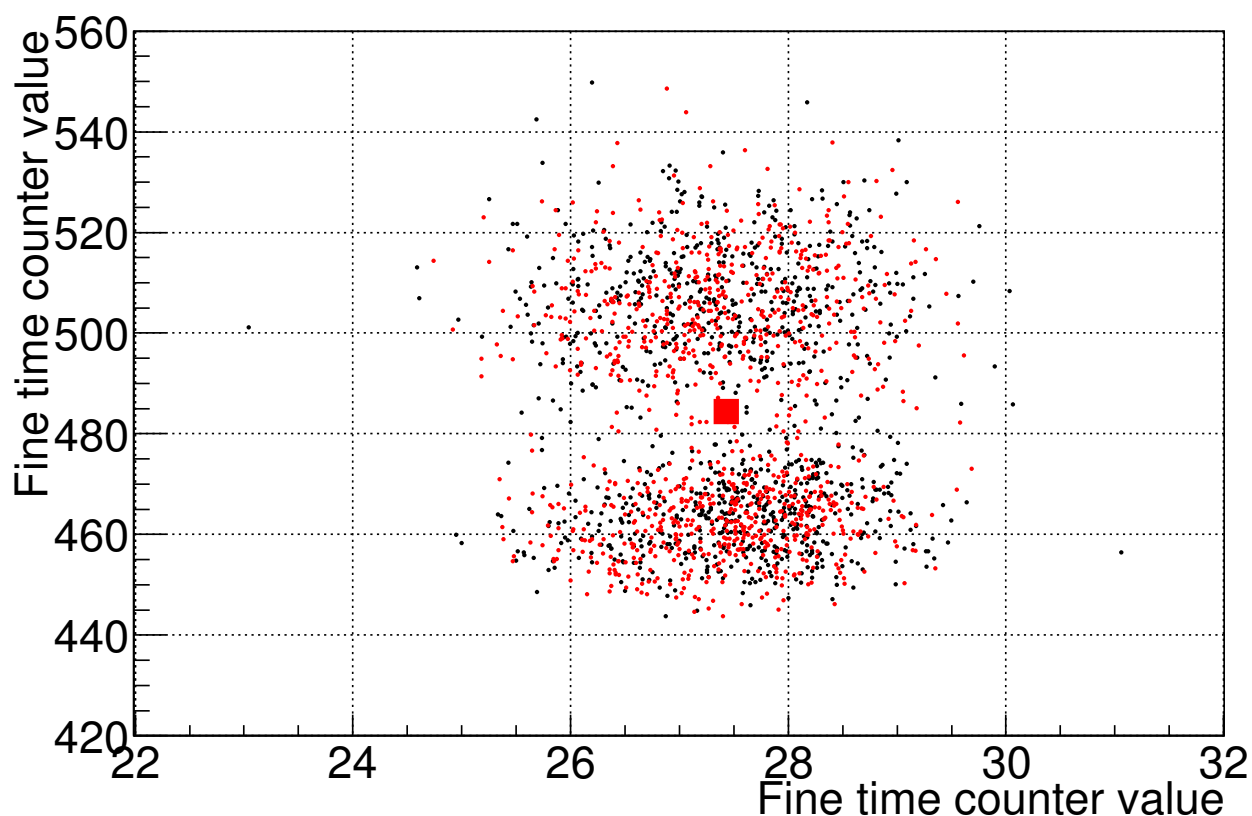


Рис. 18: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для глобальной псевдокалибровки.

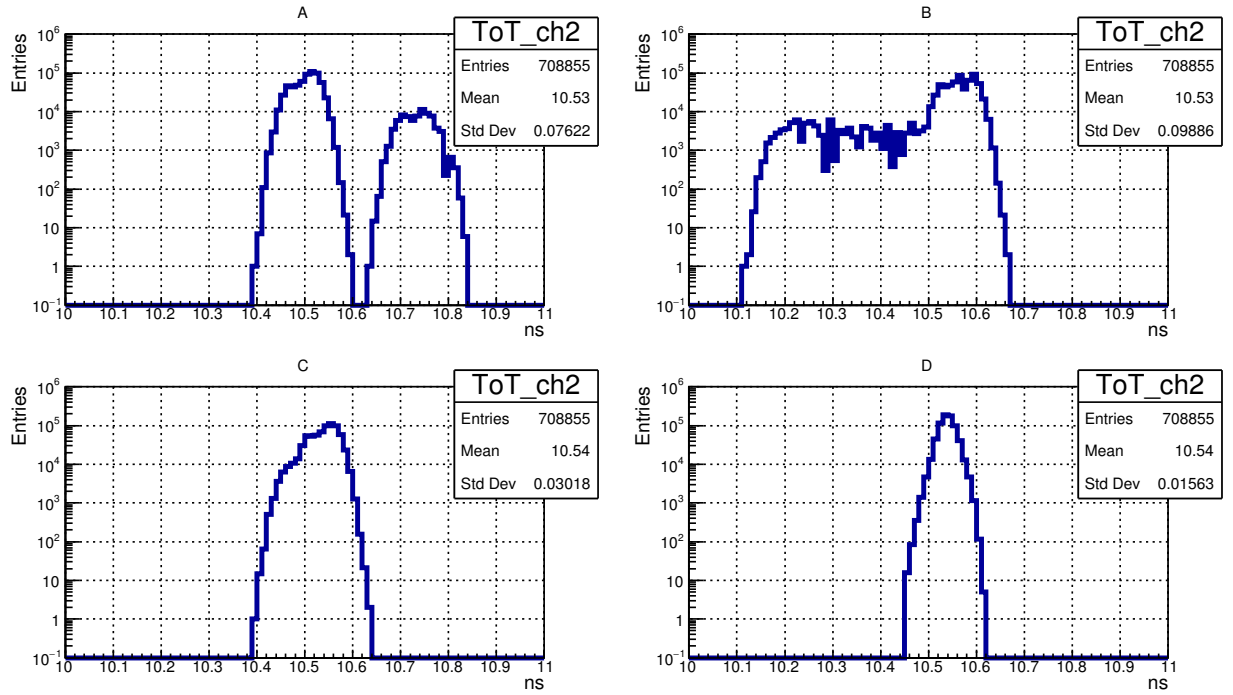


Рис. 19: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (A) без калибровки точного времени; (B) с применением усреднённой калибровочной функции; (C) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (D) с применением полноценной калибровочной функции.

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. 20 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.

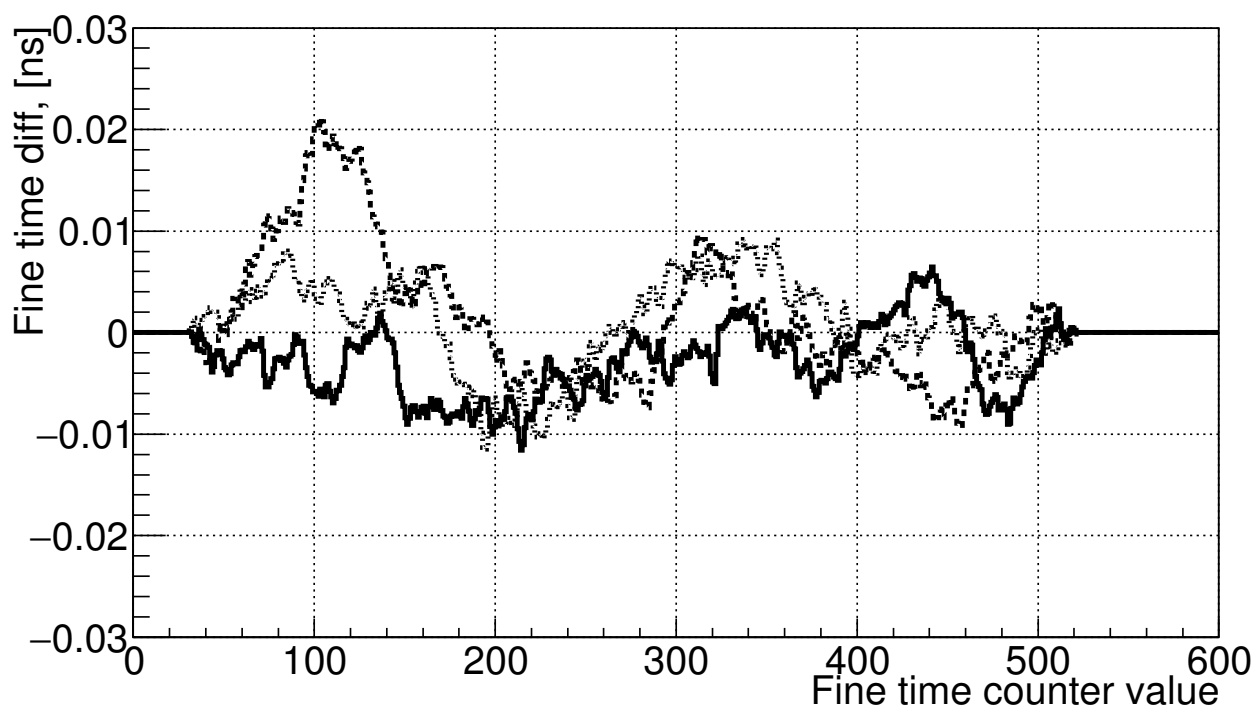


Рис. 20: Стабильность калибровок.

5.3 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. 21. Такие гистограммы позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести коррекцию задержки. Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 нс значений задержек, полученных таким образом, что даёт заметный вклад во временное разрешение системы считывания (см. секцию 5.4).

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. 21. См., например, рис. 22. 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 осо-

729 бое внимание будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гисто-
 730 граммы, подобные обсуждаемым в данном разделе, будут использоваться
 731 в качестве диагностического инструмента.

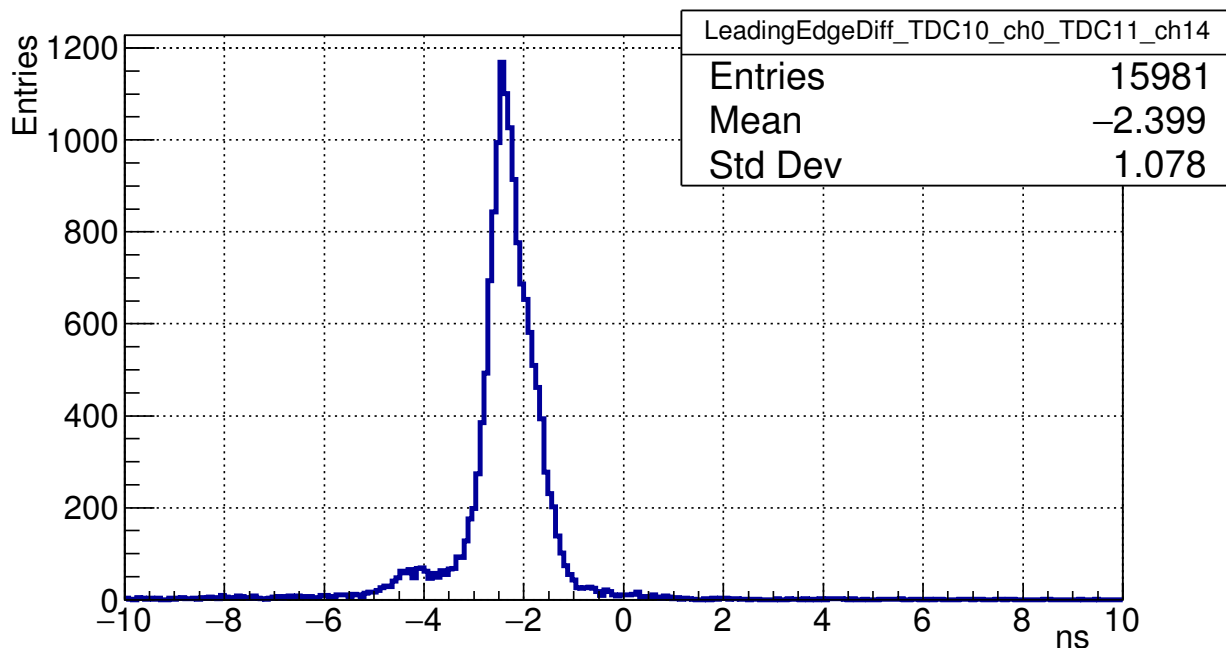


Рис. 21: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

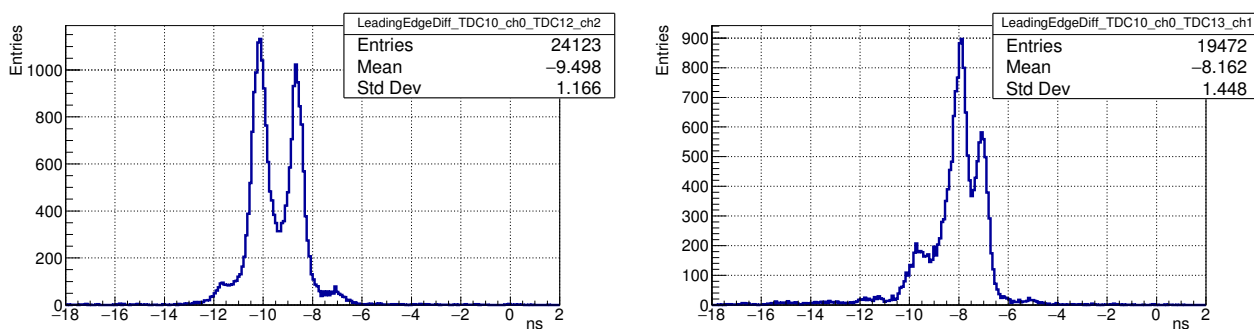


Рис. 22: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

732 5.4 Временное разрешение

733 В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых
 734 регистрируются несколько практически одновременно испущенных фото-
 735 нов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой ≈ 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 одинаковому 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, получается распределение аналогичное показанному на рис. 21, 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 вкладками: 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 5.6.

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. 23. В таблице 2 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 размывание индивидуальных особенностей каналов в процессе усреднения. Для хитов, принадлежащих

779 одному черенковскому кольцу (см. рис. 24), и FWHM и RMS возрастают с
 780 увеличением числа каналов. Вероятно, отличия связаны с тем, что распре-
 781 деления фотонов во времени для черенковского кольца и вспышки лазера
 782 отличаются друг от друга.

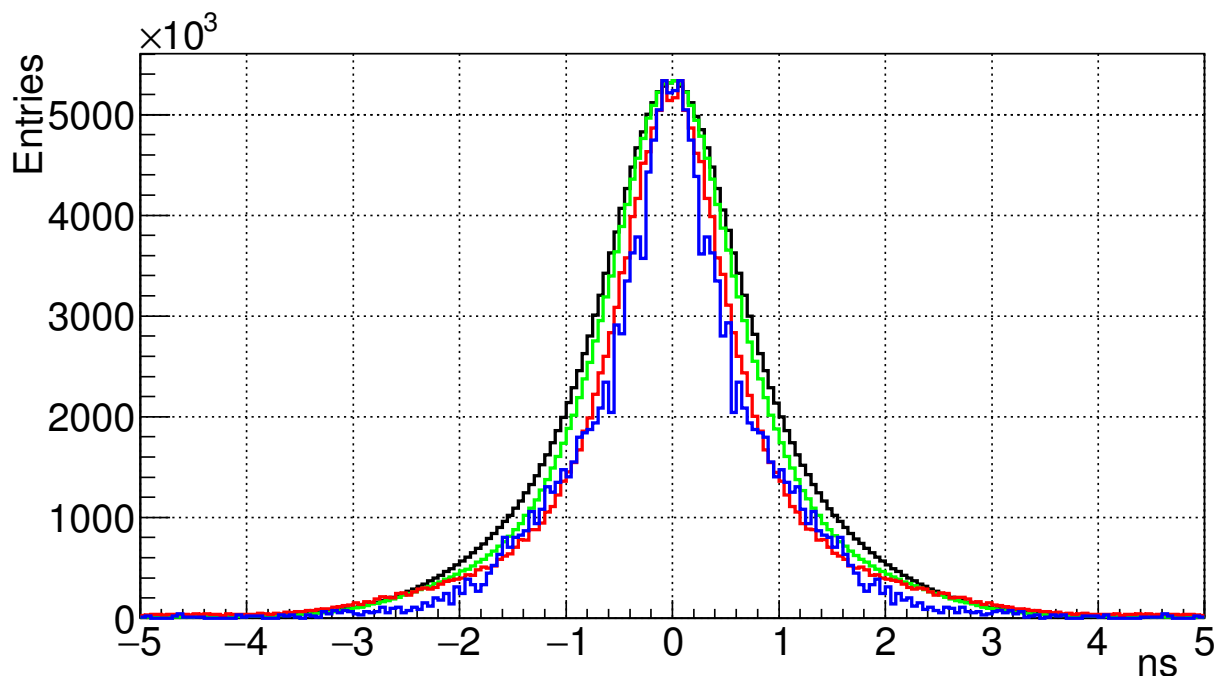


Рис. 23: Распределения для четырёх различных наборов каналов для со-
 бытий от лазера.

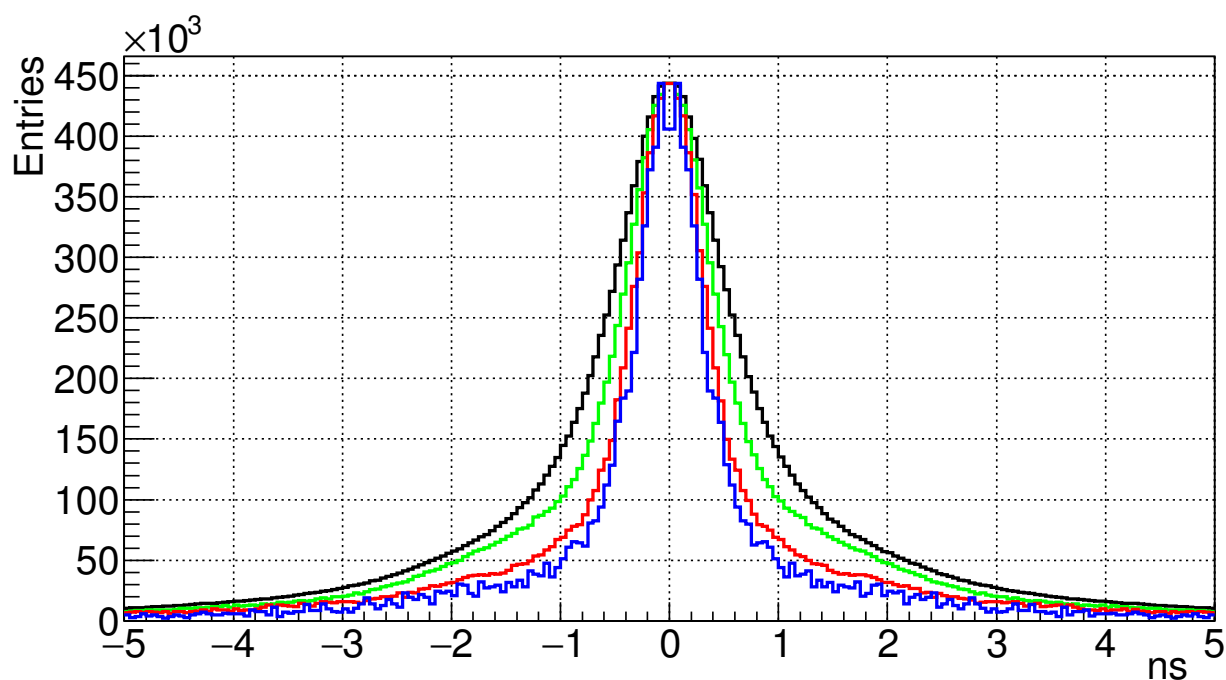


Рис. 24: Распределения для четырёх различных наборов каналов для со-
 бытий от черенковских колец.

Таблица 2: FWHM и RMS распределений при различных наборах исследуемых каналов.

Анализируемая область	Пара каналов	Плата RADIWA	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

5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра

Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя спектра. Анализ подлжит 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. 25, а разность этих распределений — на рис. 26. 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.

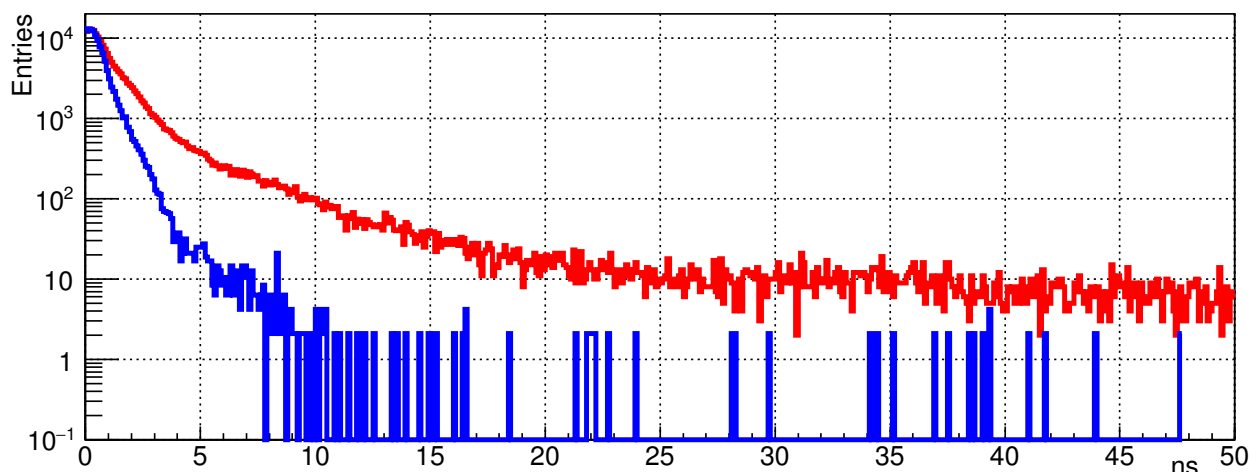


Рис. 25: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечивания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

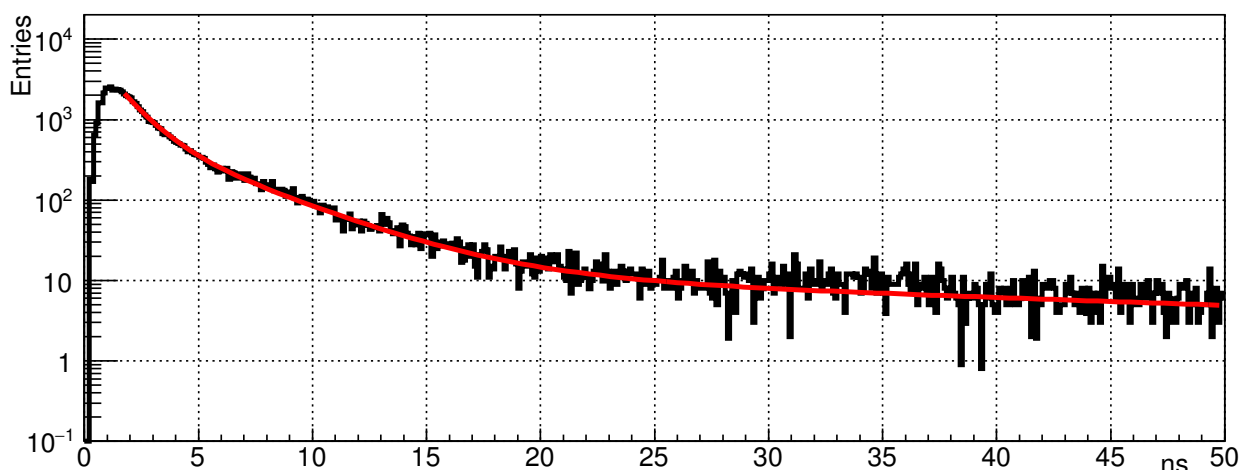


Рис. 26: Разница распределений со сместителем спектра и без него и кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

804 Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные вре-
805 мена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную кривую
806 с результатами флюориметрических исследований. Стекла́нная пластина
807 со слоем сместителя спектра, нанесённым точно таким же методом, как
808 и на МА ФЭУ, была исследована с помощью классического метода счёта
809 фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Были получе-
810 ны ([49]) значения вре́мен высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и соответ-
811 ствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000, и 0.8364.

812 Подгонка кривой с рис. 26 суммой трёх экспонент с соответствующими
813 временами показывает разумное согласие для времен превышающих 5 нс.
814 Начальный участок лучше подгоняется с характерным временем $\tau_1=1.1$ нс.
815 Сравнение интенсивностей наиболее быстрой компоненты с флюорометри-
816 ческими измерениями затруднено из-за начального неэкспоненциального
817 участка, а относительный вклад наиболее медленной компоненты в полную

818 интенсивность в нашем случае оказывается в 3.8 раз ниже. Это можно объ-
819 яснить влиянием способа возбуждения на заселение разных типов центров
820 высвечивания.

821 В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами метод
822 переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем сче-
823 та единичных фотонов [50]. Однако в нашем случае существует некоторая
824 случайная задержка между моментом попадания черенковского фотона на
825 поверхность МА ФЭУ и временем прихода первого хита. С целью выявле-
826 ния влияния метода на измеренные времена высвечивания было проведено
827 Монте Карло моделирование.

828 В модели были заложены разброс времени прохода лавины в МА ФЭУ
829 300 пс (RMS), три экспоненциальные компоненты с характерными време-
830 нами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17, 1.00,
831 0.22 и средним числом хитов в кольце равным 18. Получившееся распре-
832 деление времён относительно первого хита в кольце было подогнано трём
833 экспонентами со свободными параметрами. Если начать фитирование по-
834 лучившейся зависимости, отступив 4 нс от начала высвечивания, величи-
835 ны постоянных распада экспонент воспроизводятся с точностью лучше 5%,
836 а соответствующие относительные интенсивности несколько искажаются,
837 что естественно, в силу существования начального неэкспоненциального
838 участка кривой. Таким образом, подтверждена корректность применённо-
839 го метода определения времён высвечивания.

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

847 5.6 Время над порогом

848 Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найденного
849 хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об ампли-
850 туде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных
851 CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения временного раз-
852 решения путём коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды
853 (walk correction), а также для повышения качества отделения однофото-
854 электронного сигнала от шума. На рис. 28 показано типичное распределе-
855 ние ToT, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки
856 ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура,
857 согласно [51], может быть объяснена наличием периодической наводки как
858 на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и вхо-

859 дом ВЦП. На рис. 27 показан экран цифрового осциллографа в режиме
 860 накопления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к
 861 выходу PADIWA. Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдае-
 862 мым пикам в распределении ToT; имеет место проблема недостаточности
 863 амплитуды одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логиче-
 864 ской единицы; имеется периодическая наводка на выходе дискриминато-
 865 ра, но ее недостаточно для объяснения наблюдаемой картины; преобла-
 866 дание определенных длительностей логических сигналов позволяет пред-
 867 положить наличие периодической структуры во входном сигнале. Все это
 868 говорит о необходимости подстройки аналоговой части для формирования
 869 на входе PADIWA более чистого сигнала большей амплитуды и о защите
 870 соединения между дискриминатором и ВЦП от наводок. Подобные измене-
 871 ния будут, с учетом результатов данной работы, реализованы в следующем
 872 прототипе платы передней электроники, называемом DIRICH [29].

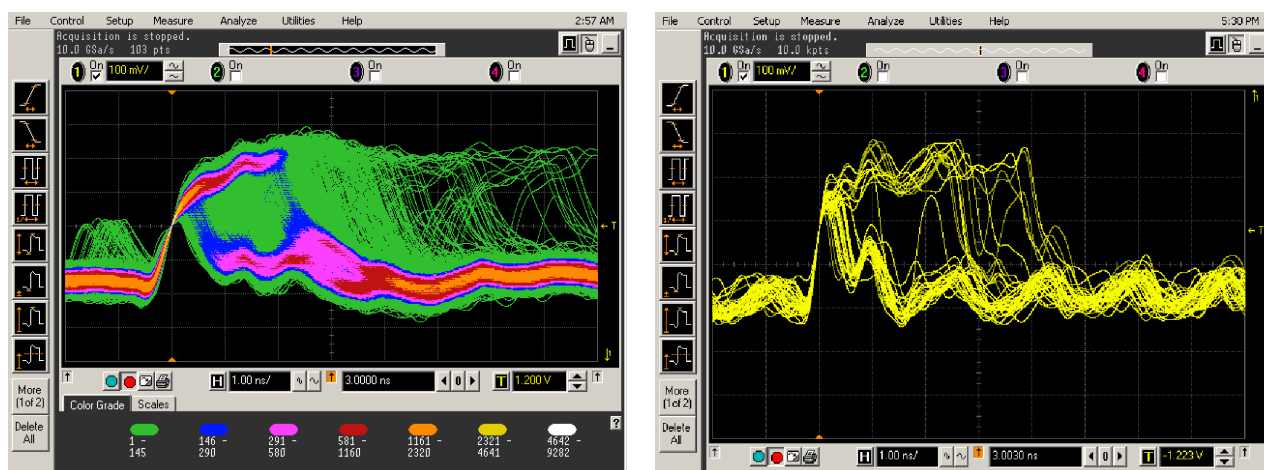


Рис. 27: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту.

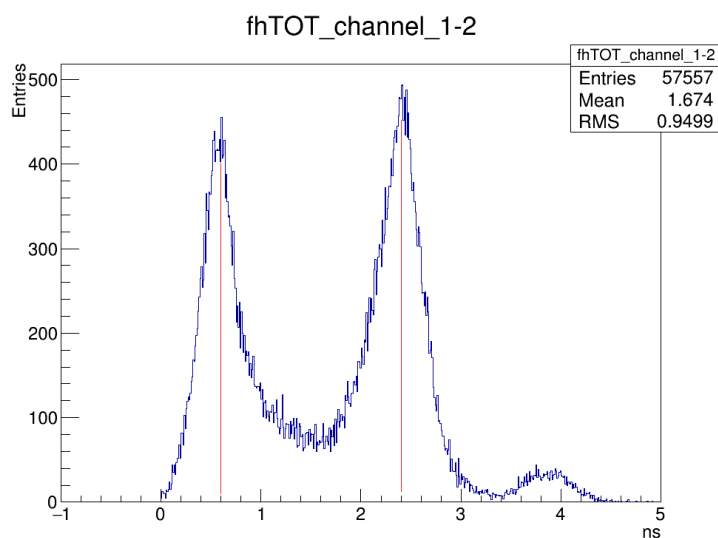


Рис. 28: Типичное распределение ToT.

873 Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в случае
874 CBM RICH, и продемонстрированные в данной работе параметры доста-
875 точны для уверенного поиска колец. Тем не менее, улучшение разделения
876 сигналов и шумов и повышение эффективности регистрации поможет со-
877 здать необходимый запас надежности для долговременной работы детек-
878 тора в условиях постепенной деградации оптических свойств радиатора,
879 зеркал и фотодетекторов.

880 5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при времен- 881 ном и амплитудном считывании

882 Как отмечено в секции 1, у МА ФЭУ Н12700 имеются особенности, которые
883 могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фото-
884 электронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для прояснения
885 этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределе-
886 ний с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XYTER,
887 см. описание лабораторного стенда в секции 3.2. Далее, результаты ампли-
888 тудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью
889 платы PADIWA.

890 Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали нали-
891 чие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелирован-
892 ных с источником света. Также были выполнены специальные измерения
893 с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см.
894 пикселя. Эти измерения позволили установить, что событие с малой ам-
895 плитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале,
896 находящемся в том же ряду динодной системы, был зарегистрирован фото-
897 электрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с
898 низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выгля-
899 дит как на рис. 29.

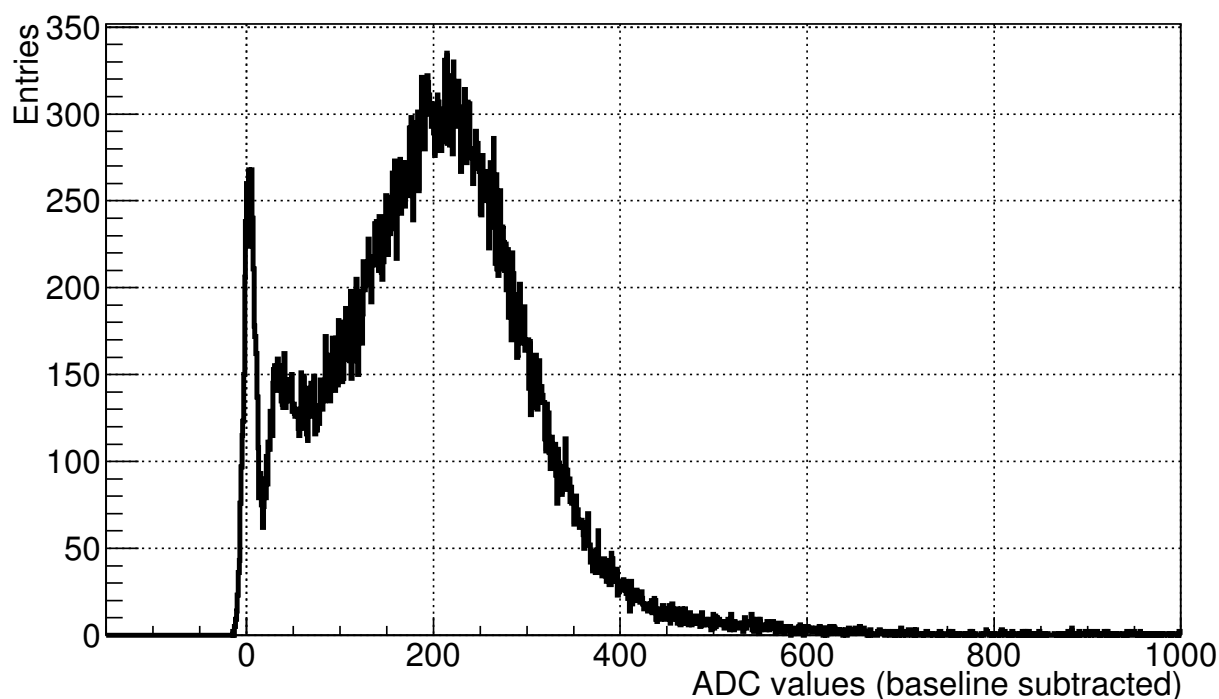


Рис. 29: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ Н12700.

900 Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, рас-
 901 положенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный
 902 сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одно-
 903 электронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в секции 1
 904 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется от опти-
 905 мального пути от динода к диноду. Отметим, что в большинстве каналов
 906 уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения низкоампли-
 907 тудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного сигнала. Таким
 908 образом, попытка получить максимальную эффективность регистрации за
 909 счет снижения порога приводит к возрастанию паразитных хитов, лока-
 910 лизованных не в тех пикселях, где родился фотоэлектрон. Для снижения
 911 числа паразитных хитов мы ставили порог регистрации в ложбине меж-
 912 ду низко- и высоко-амплитудными частями одноэлектронного спектра. По-
 913 скольку формы одноэлектронных спектров во всех каналах подобны, ана-
 914 лиз формы спектра на рис. 29 позволяет заключить, что выбранный нами
 915 порог приводит к потере 12 % одноэлектронных импульсов.

916 Одно из отличий канала считывания в плате RADIWA — это значи-
 917 тельно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-XYTER
 918 осуществляется формирование со временем интегрирования 190 нс, то в
 919 RADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что соответ-
 920 ствует характерному времени нарастания сигнала несколько наносекунд.
 921 Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов и наводок
 922 при регистрации сигналов с помощью RADIWA.

923 Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с по-

924 мощностью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена
 925 в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях, по-
 926 строенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут быть
 927 получены из анализа потока данных, набранных при различных значени-
 928 ях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализо-
 929 ванного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 2.1, позволяет
 930 получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но позво-
 931 ляет достичь максимальных частот, достаточных для локализации базовой
 932 линии. На рис. 30 показана зависимость частоты триггеров от порога реги-
 933 страции. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более по-
 934 дробно исследованному ниже, а быстро возрастающие границы вокруг вер-
 935 тикальной штриховой линии ограничивают локализацию базовой линии.
 936 Точность локализации базовой линии мы оцениваем как ± 200 отсчетов по
 937 шкале, использованной на рис. 30 и рис. 31B,D.

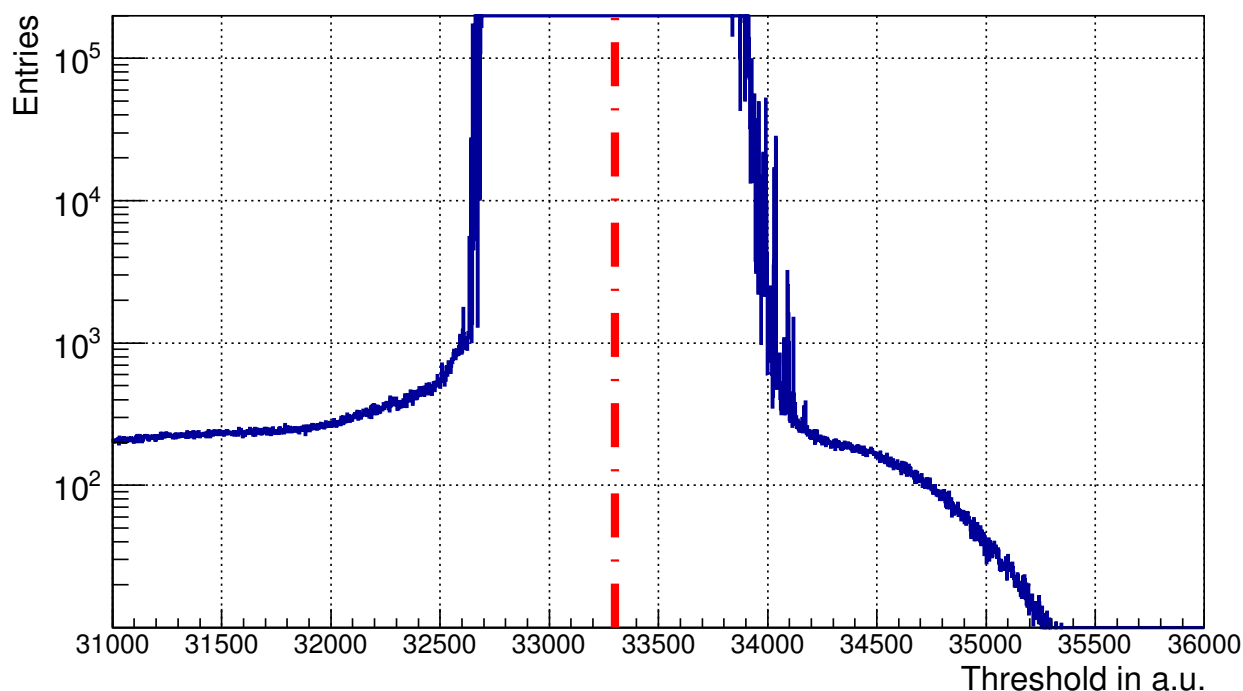


Рис. 30: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

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

942 Интересно сравнить зависимость скорости счёта от порога при исполь-
 943 зовании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Ре-
 944 зультаты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на
 945 рис. 31. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован ин-
 946 теграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 31C. Соответствен-

но, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с од-
ноэлектронным спектром, показанным на рис. 31А. Сплошная линия на
рис. 31В получена дифференцированием кривой, показанной красным цве-
том на рис. 31D и полученной подгонкой измеренной зависимости полино-
мом 7-й степени. Отметим, что мы оцениваем равенство световых пото-
ков как $\pm 5\%$. Видно, что скорости счёта в области ложбины и максимума
одноэлектронного спектра приблизительно совпадают. Амплитуды, соот-
ветствующие максимуму и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в
обоих случаях. При этом, в случае RADIWA наблюдается, с одной сторо-
ны 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 эффективно-
сти за счёт установления порога ниже ложбины.

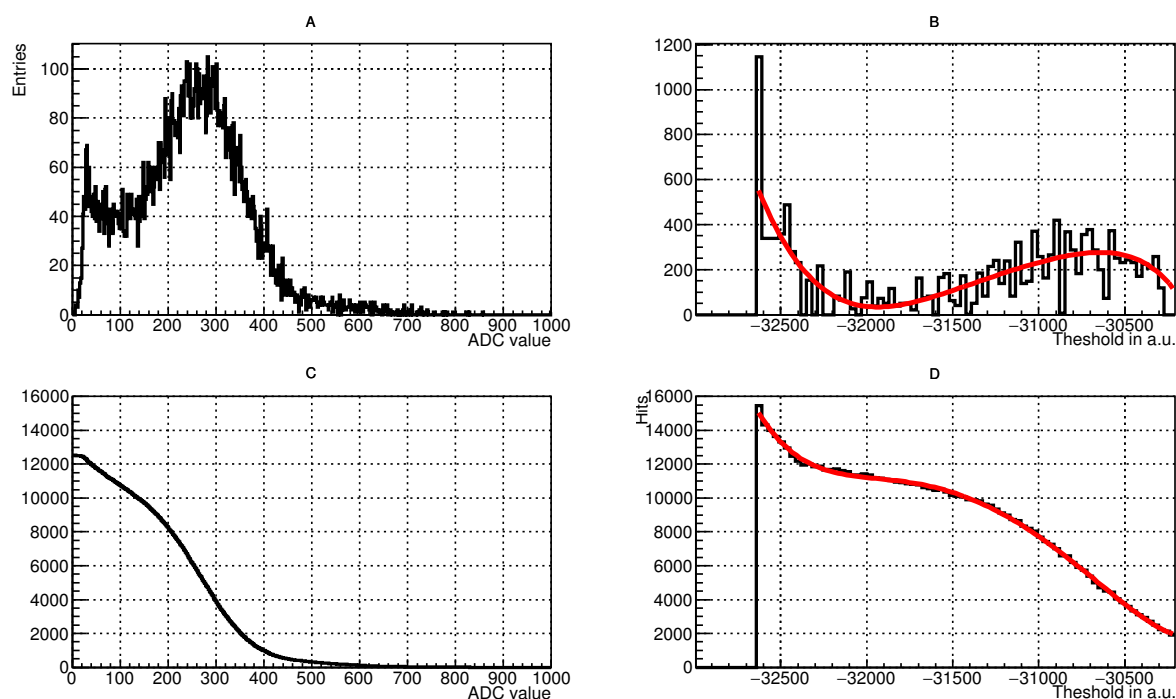


Рис. 31: Сравнение (А) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (В) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе RADIWA и TRB v3; сравнение (С) интеграла одноэлектронного спектра и (D) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

Заключение

Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных детектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный модуль, состоящий из МА ФЭУ N12700, четырёх плат предусилителей-

965 дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функции
 966 ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы прото-
 967 типа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют временное раз-
 968 решение 21 пс (FWHM) при использовании калибровки точного времени.
 969 Применение поканальной кусочно-линейной псевдо-калибровки ухудшает
 970 временное разрешение до 50 пс (FWHM), а единой для всех каналов усред-
 971 нённой псевдо-калибровки приводит к значению временного разрешения
 972 64 пс (FWHM) в наиболее неблагоприятных случаях. Обсуждена процеду-
 973 ра калибровки задержек между каналами а также стабильность получен-
 974 ных задержек. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс за все время измере-
 975 ний. Рассмотрена возможность использования спектров “времени над поро-
 976 гом” (ToT) для отбора корректных хитов и коррекции временной привязки.
 977 Выявлено, что спектр ToT имеет многопиковую структуру по причине пе-
 978 риодических наводок. Это препятствует использованию этого параметра в
 979 анализе. Выявленные схемотехнические недостатки будут устранены в сле-
 980 дующей версии плат считывающей электроники. Исследованы временные
 981 свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации
 982 черенковских колец. Наиболее интенсивная быстрая компонента характе-
 983 ризуется временем высвечивания 1.1 нс, но имеются также компоненты с
 984 характерными временами 3.8 нс и 45 нс. Проведено сравнение медленного
 985 аналогового и быстрого временного считывания МА ФЭУ. Выявлено про-
 986 явление особенностей одноэлектронного спектра в том, как эффективность
 987 регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов за-
 988 висят от порога дискриминатора. Исследовано временное разрешение все-
 989 го канала считывания для различных по величине множеств каналов: от
 990 одной пары до 256 штук. Наихудшее из полученных значений составляет
 991 1.2 нс, что определяется в первую очередь отсутствием коррекции времен-
 992 ной отметки в зависимости от амплитуды сигнала и дрейфом задержек
 993 между каналами. Полученные результаты достаточны для использования
 994 исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM,
 995 однако устранение выявленных недостатков позволит создать запас по эф-
 996 фективности и повысить надежность системы при долговременной эксплу-
 997 атации.

998 Список литературы

- 999 [1] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6,
 1000 2006.
- 1001 [2] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and*
 1002 *P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in
 1003 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, 25th 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 Image 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), 25th 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
- [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://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf>
- [27] *W. M. Zabołotny 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.

- 1070 [32] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector and
1071 radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress Report
1072 2014, p.78.
- 1073 [33] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the
1074 basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real
1075 conditions, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.
- 1076 [34] Information about the T9 beam line and experimental facilities,
1077 [http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
1078 [spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
1079 [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)
- 1080 [35] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS
1081 SYSTEM.
- 1082 [36] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror
1083 displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector,
1084 doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- 1085 [37] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment
1086 control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- 1087 [38] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
1088 [datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
- 1089 [39] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on
1090 multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21
1091 May 2015, Pages 43–50.
- 1092 [40] Alphalas Picopower-LD series datasheet, [http://www.alphalas.](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD-ALPHALAS.pdf)
1093 [com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_](http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD-ALPHALAS.pdf)
1094 [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)
- 1095 [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- 1096 [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- 1097 [43] FLESnet development repository, [https://github.com/cbm-fles/](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
1098 [flesnet](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
- 1099 [44] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, and C. Ugur* //
1100 HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41,
1101 GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- 1102 [45] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of the
1103 integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE Transactions
1104 on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April 1997.

- 1105 [46] *C.A. Лебедев, Г.А. Ососков* // Быстрые алгоритмы распознавания
1106 колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента
1107 CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- 1108 [47] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring
1109 Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment
1110 at FAIR, ACAT2010 proceedings.
- 1111 [48] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout
1112 and DAQ prototype, PEPAN letters.
- 1113 [49] M. Dürr, private communication.
- 1114 [50] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon Counting,
1115 Academic Press, London 1984.
- 1116 [51] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the
1117 presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.