

Разработка системы считывания и приёма данных детектора RICH эксперимента CBM

J. Adamczewski-Musch^a, П.Г. Акишин^g, К.-Н. Becker^b, С.Г. Белогуров^{g,e},
J. Bendarouach^c, Н. Болдырева^d, С. Deveaux^c, В.В. Добырин^d, М. Dürr^c, J. Eschke^a,
J. Förtsch^b, J. Heep^c, С. Höhne^c, К.-Н. Kampert^b, Л.М. Коченда^{d,e}, J. Kopfer^{b,c},
П.А. Кравцов^{d,e}, I. Kres^b, С.А. Лебедев^{c,g}, Е.И. Лебедева^c, Е. Леонова^d, С.В. Линева^a,
Т. Mahmoud^c, J. Michelf^f, Н. Мифтахов^d, W. Niebur^a, Е.В. Овчаренко^g, V. Patel^b,
С. Pauly^b, М. Penschuck^f, D. Pfeifer^b, S. Querschfeld^b, J. Rautenberg^b, S. Reinecke^b,
Ю.Г. Рябов^d, Е.В. Рошин^d, В.М. Самсонов^{d,e,h}, В.Н. Щетинин^{g,i}, О.П. Тарасенкова^d,
М. Traxler^a, С. Ugur^a, Е. Вэнуздаев^d, и М.Е. Вэнуздаев^d

^a*GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, D-64291 Darmstadt, Germany*

^b*Department of Physics, University Wuppertal, D-42097 Wuppertal, Germany*

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

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

^e*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia*

^f*Institut für Kernphysik, Goethe University Frankfurt, D-60438 Frankfurt am Main, Germany*

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

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

ⁱ*Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, Russia*

Содержание

Введение	2
1 Особенности МА ФЭУ Н12700	5
2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH	8
2.1 64-канальный модуль считывания	8
2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ	12
3 Экспериментальные установки	13
3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах	13
3.2 Лабораторный стенд	16
4 Программное обеспечение	18
4.1 Распаковка	19
4.2 Калибровка точного времени	19

*eovchar@jinr.ru

4.3	Коррекция задержек между каналами	20
4.4	Построение хита	21
4.5	Построение события	22
4.6	Реконструкция	24
5	Результаты	24
5.1	Испытание системы сбора данных с использованием FLIB .	24
5.2	Калибровка точного времени (Fine time calibration)	24
5.3	Определение коррекций задержек между каналами	29
5.4	Временное разрешение	30
5.5	Исследование профиля высвечивания сместителя спектра . .	32
5.6	Время над порогом	35
5.7	Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании	36
	Заключение	40
	Список литературы	41

Аннотация

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приёма данных, состоящий из многоанодного фотоэлектронного умножителя (МА ФЭУ) H12700, четырёх плат предусилителей-дискриминаторов PADIWA 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 СВМ, 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 рабо-

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

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

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

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

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

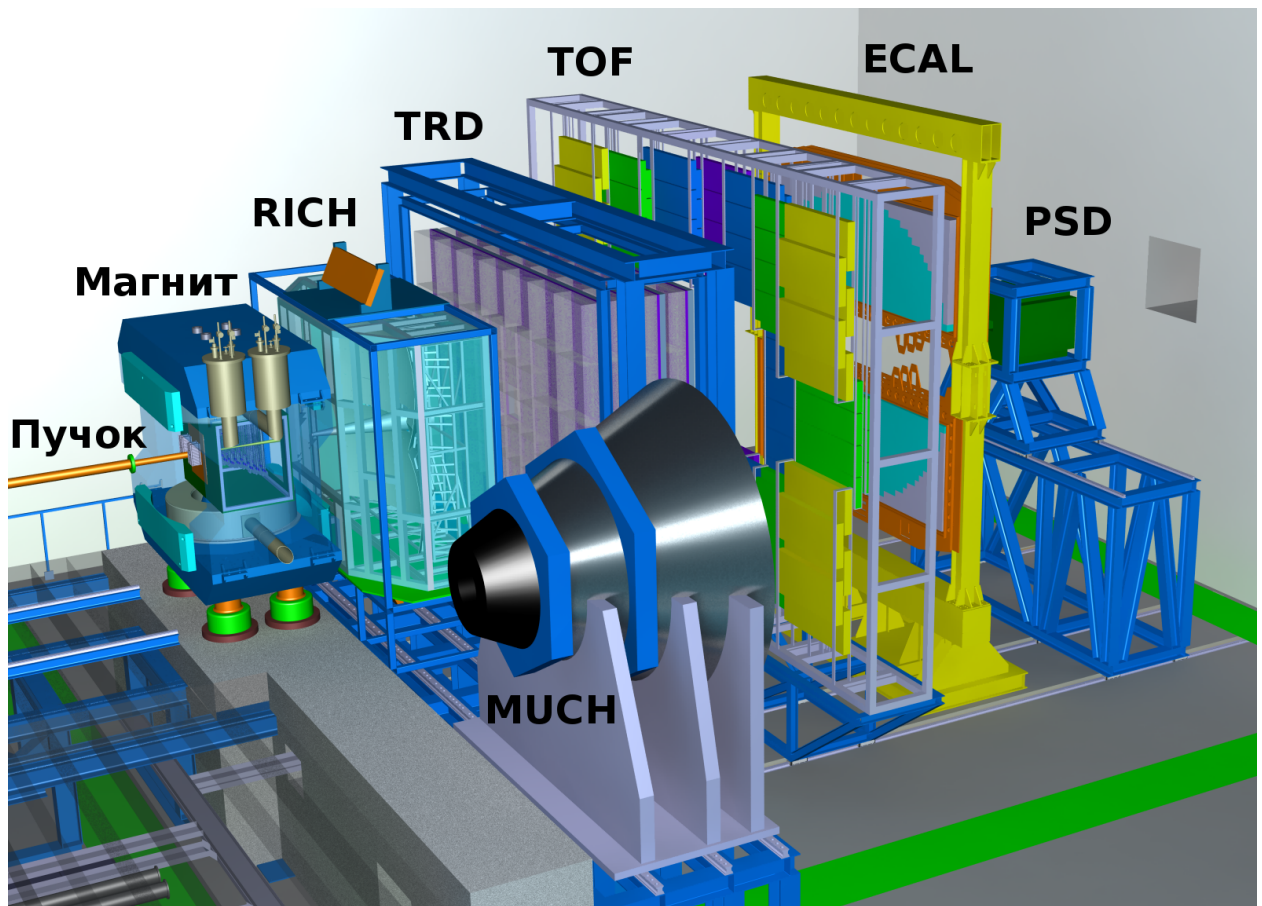


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH.

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

64 Hamamatsu H12700 (МА ФЭУ).

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

69 Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструк-
70 ции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях
71 доминирующего фона от пионов [12].

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

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

77 Детектор непрореагировавших осколков ядер (PSD) [15] пред-
78 ставляет собой сегментированный адронный калориметр и служит для
79 определения центральности столкновения и плоскости реакции путем ре-
80 гистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами к пучку.

81 Эксперимент характеризуется высокой множественностью частиц, боль-
82 шой густотой треков под малыми углами и высокой частотой взаимодей-
83 ствий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упакো-
84 ванных каналов считывания, работающих по бестриггерной схеме, с кото-
85 рых необходимо собирать и анализировать “на лету” большой поток дан-
86 ных.

87 В данной статье описаны результаты тестов прототипа систем регистра-
88 ции фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных. Были ре-
89 ализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и программные,
90 соответствующих систем разрабатываемого детектора черенковских колец
91 эксперимента CBM. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так
92 и в составе полнофункционального прототипа детектора RICH на пучке PS
93 в ЦЕРН.

94 1 Особенности МА ФЭУ H12700

95 Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фирмы
96 Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризо-
97 ван в работах [17, 18]. Он обладает следующими достоинствами: большая
98 доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочувствитель-
99 ные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без потерь
100 значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время прохожде-
101 ния однофотоэлектронного сигнала через динодную систему, малый раз-
102 брос этого времени от события к событию, низкие перекрёстные помехи и
103 низкая скорость счета тепловых электронов. Некоторые свойства данного

прибора показаны в табл. 1, по большинству параметров он превосходит
своего предшественника МА ФЭУ Н8500 [19].

Таблица 1: Свойства МА ФЭУ Н12700В-03.

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

Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чувствительность МА ФЭУ в версии Н12700В-03, используемой в настоящей работе, определяется входным окном, сделанным из стекла, прозрачного в ультрафиолетовой области. Коротковолновая граница спектральной 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. Каждому аноду соответствует канал МА ФЭУ, состоящий из своего фрагмента динодной системы и области фотокатода, называемой пикселем. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов усиления в каналах МА ФЭУ 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 для обновления LHCb [17].

Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ Н12700В-03 имеет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных МА 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 объём динодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 2 [23], 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

139 приводит к попаданию электронов на последующие стадии диодной систе-
 140 мы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или части электронной лавины
 141 в соседний канал. Перетекание части лавины в соседний канал имеет ме-
 142 сто в более чем 25% случаев при равномерном освещении всего фотокатода.
 143 Величина перетекающего заряда составляет от 3% до 7% в зависимости от
 144 взаимного расположения каналов МА ФЭУ [17]. Вероятность того, что ла-
 145 вина от фотоэлектрона полностью разовьётся в соседнем канале зависит
 146 от взаимного расположения каналов и составляет при равномерном осве-
 147 щении от 0.1% до 2% [24]. Кроме того, при наличии относительно большого
 148 сигнала в одном из каналов, наблюдается биполярная наводка в каналах,
 149 имеющих диоды в одном ряду. При интегрировании этой наводки возмож-
 150 но формирование низкоамплитудных импульсов в нескольких каналах. В
 151 классическом МА ФЭУ такие эффекты не наблюдаются из-за отсутствия
 152 связи с соседними каналами, наличия развитой системы фокусировки и та-
 153 кой конструкции диодной системы, что диоды имеют большую площадь
 154 и последующие стадии полностью экранируются предыдущими.

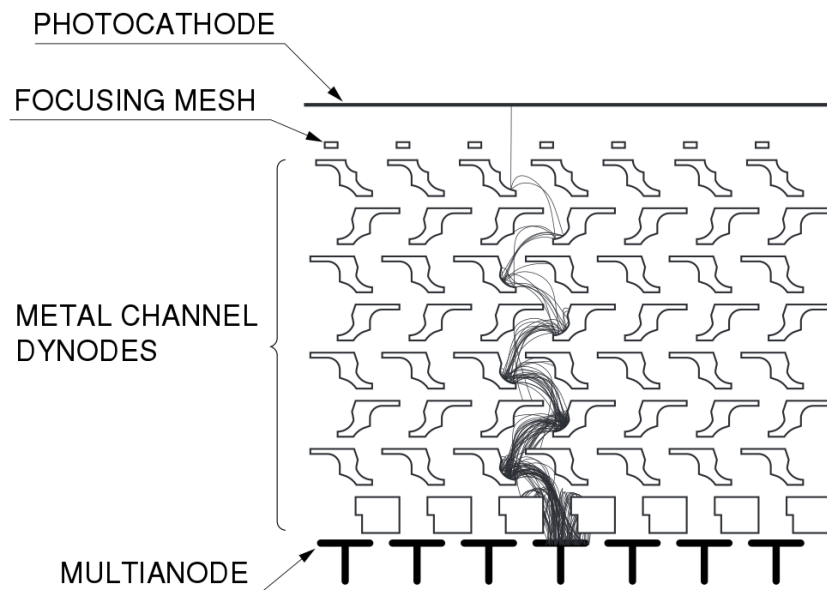


Рис. 2: Схема диодной системы типа "Metal Channel".

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

2 Архитектура системы сбора данных СВМ RICH

2.1 64-канальный модуль считывания

Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифровки данных СВМ 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. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату TRB v3.

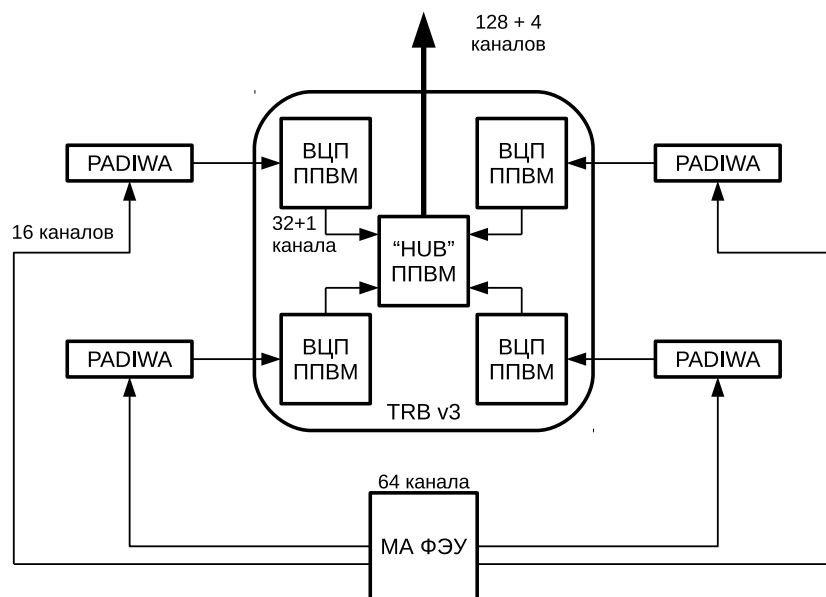


Рис. 3: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [25]. Общий вид платы PADIWA показан на рис. 4. 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 мо-

182 гут использоваться как дискриминаторы. На выходе каждого канала фор-
183 мируется логический ноль, когда входной сигнал в этом канале ниже уста-
184 новленного порога, и логическая единица, когда входной сигнал выше этого
185 порога. Далее расположены выходные порты и порты настройки ППВМ,
186 объединённые в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для
187 управления платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS ли-
188 ний — выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен
189 стандартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения
190 источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого имеется
191 датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика могут
192 использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев, если та-
193 кая возможность заложена в программе ППВМ.

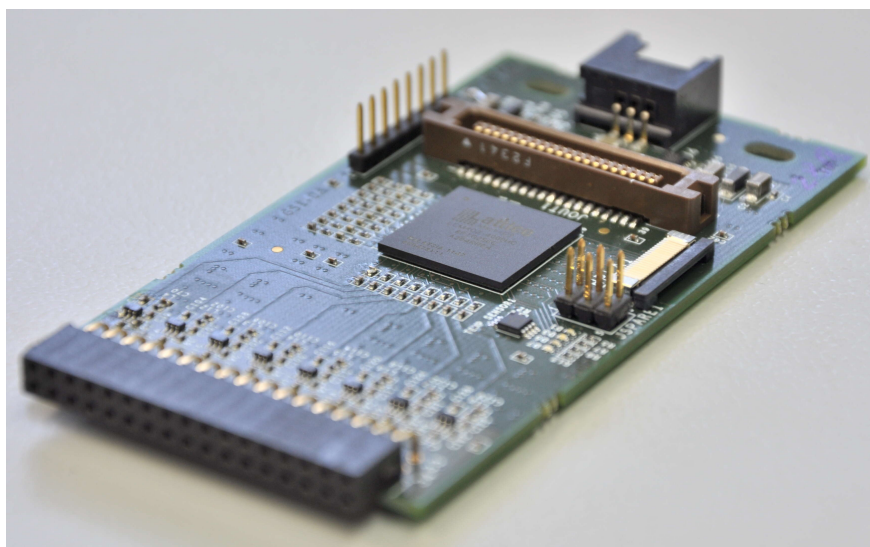


Рис. 4: Общий вид платы PADIWA.

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

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

206 Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 5. Рядом с каждой перифе-
207 рийной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоеди-
208 нить платы расширения. В частности, существует специальная плата рас-
209 ширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате TRB v3

210 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые ис-
211 пользуются для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с ком-
212 пьютером.

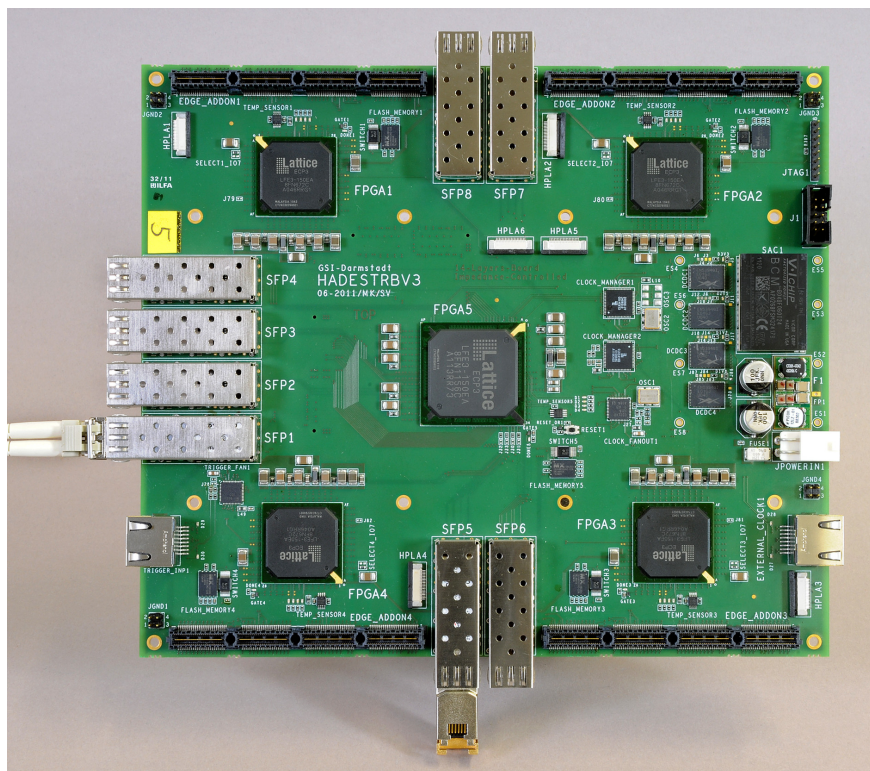


Рис. 5: Общий вид платы TRB v3.

213 Каждая периферийная ППВМ, разбивается на 32 области, в каждой из
214 которых программируется одна и та же схема канала ВЦП. Каналы распо-
215 ложены в разных областях матрицы, поэтому каждый канал ВЦП имеет
216 свою величину пути, проходимого сигналом внутри ППВМ. Нечетные ка-
217 налы настроены на положительный перепад напряжения, т.е. на передний
218 фронт, а четные каналы — на отрицательный перепад напряжения, т.е. на
219 задний фронт. Обработка импульса из одного входного канала выполняется
220 двумя каналами ВЦП, относительная задержка между которыми должна
221 быть прокалибрована с помощью точного генератора прямоугольных им-
222 пульсов. Особенности такой калибровки обсуждаются в 5.2. Отметим, что в
223 ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик количества
224 зарегистрированных временных отметок, значение которого может быть
225 опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик может
226 быть использован, например, для получения зависимости скорости счёта
227 от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

228 Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа. Гру-
229 бое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется
230 от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счетчика
231 называются эпохой (epoch), а 11 младших разрядов называются грубым

временем (coarse) [26]. 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 $T = (epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

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 4 и 5.2 соответственно.

Находящиеся на TRB v3 ППБМ 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 [27].

На рис. 6 для примера показана структура 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.

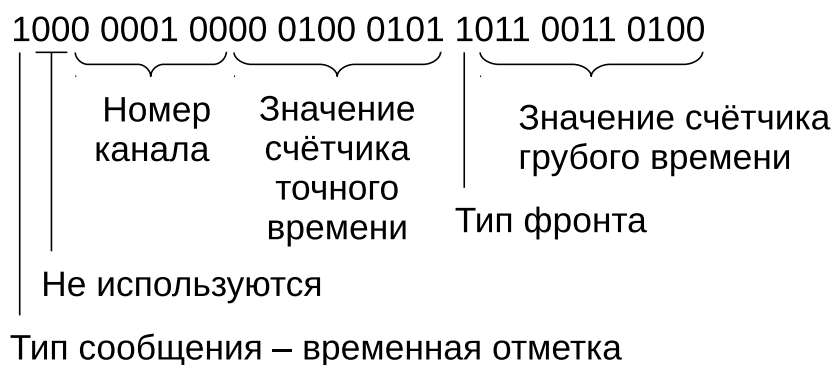


Рис. 6: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

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 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 [28]. 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 [29], 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 RADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем планируется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [30]. 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 [31] и обычной сетевой карты.

3 Экспериментальные установки

3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах

Исследование системы считывания и сбора данных проводилось в составе полнофункционального прототипа детектора RICH эксперимента CBM в ходе комплексных пучковых испытаний прототипов нескольких детекторов того же эксперимента [32]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [33] и [34] соответственно. Схема установки представлена на рис. 7.

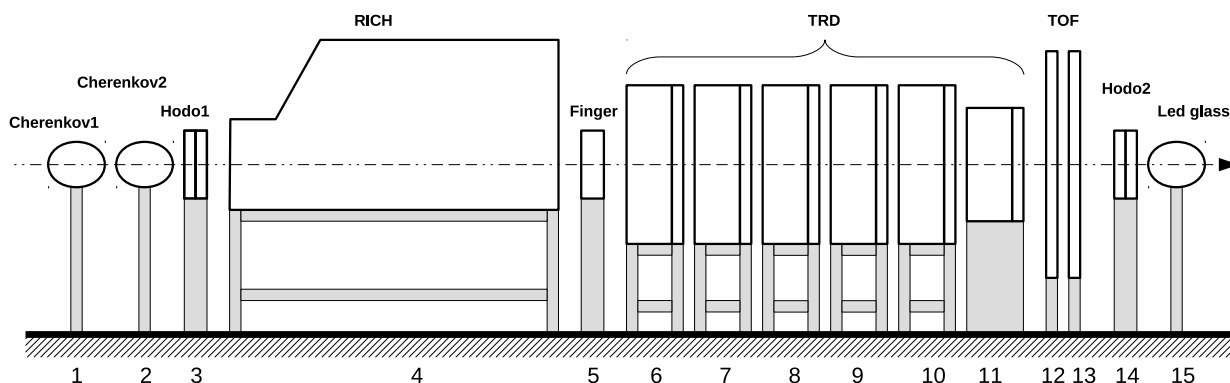


Рис. 7: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции прототипа детектора переходного излучения; 12-13 — станции прототипа время-пролётного детектора; 15 — электромагнитный калориметр из свинцового стекла.

Вывод пучка T9 ускорителя PS [35] в ЦЕРНе представляет собой смешанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов с 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 CBM представлена на рис. 8.

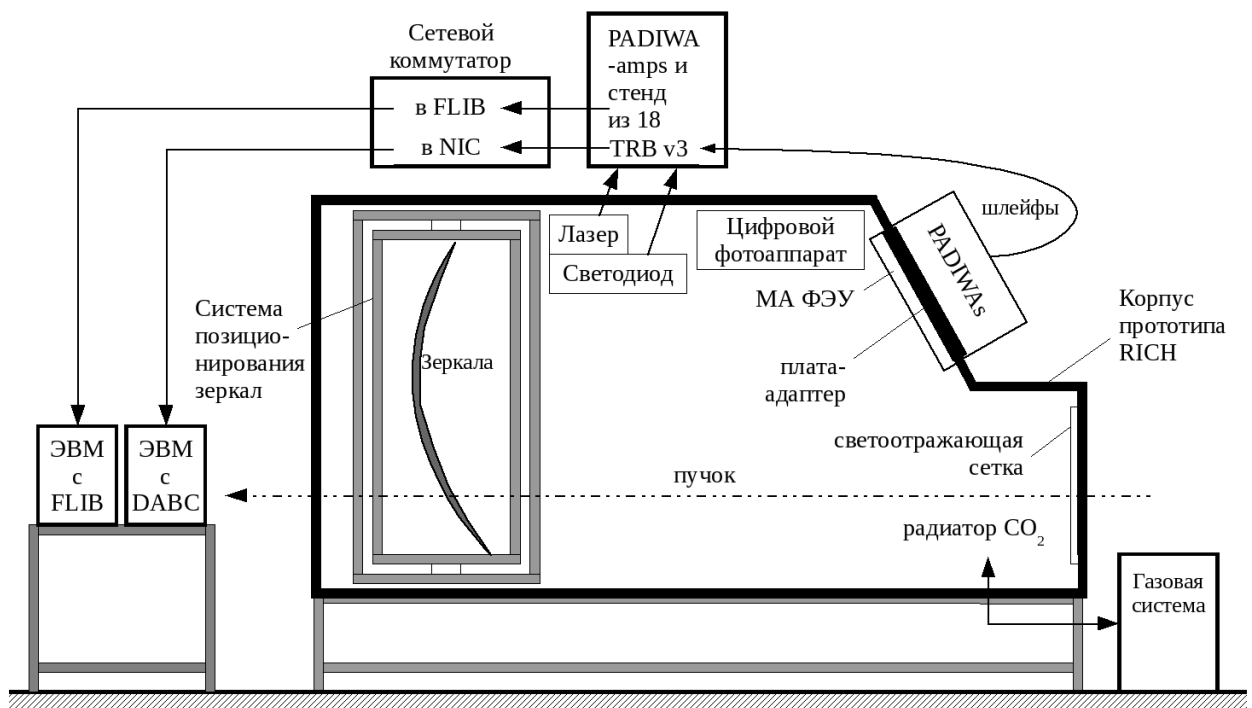


Рис. 8: Схема прототипа детектора RICH.

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 $n=1.00045$. Очистка газа и стабилизация его давления с точностью 0.1 мбар обеспечивались газовой системой, описанной в [36]. 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 [37].

Система диагностики положения зеркал [38] состоит из светотражающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светодиода Roithner UVTOP240 [39] 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. [40]. 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 [41] 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 помимо концентратора данных также являлась генератором и распределителем триггера считывания

381 для всех плат TRB v3. Импульсы с генераторов, управляющих лазером и
 382 светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались пла-
 383 тами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая измерять
 384 амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число каналов [25])
 385 и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3 также нестан-
 386 дартной конфигурации, совмещающей ВЦП и концентратор данных. Па-
 387 раллельно функционировало две системы сбора данных — одна принима-
 388 ла данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с
 389 каждой платы TRB v3 по медному носителю, а другая через FLIB с одной
 390 (18-й) платы TRB v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка
 391 представлена на рис. 9. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой
 392 FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH,
 393 но и от других детекторов.

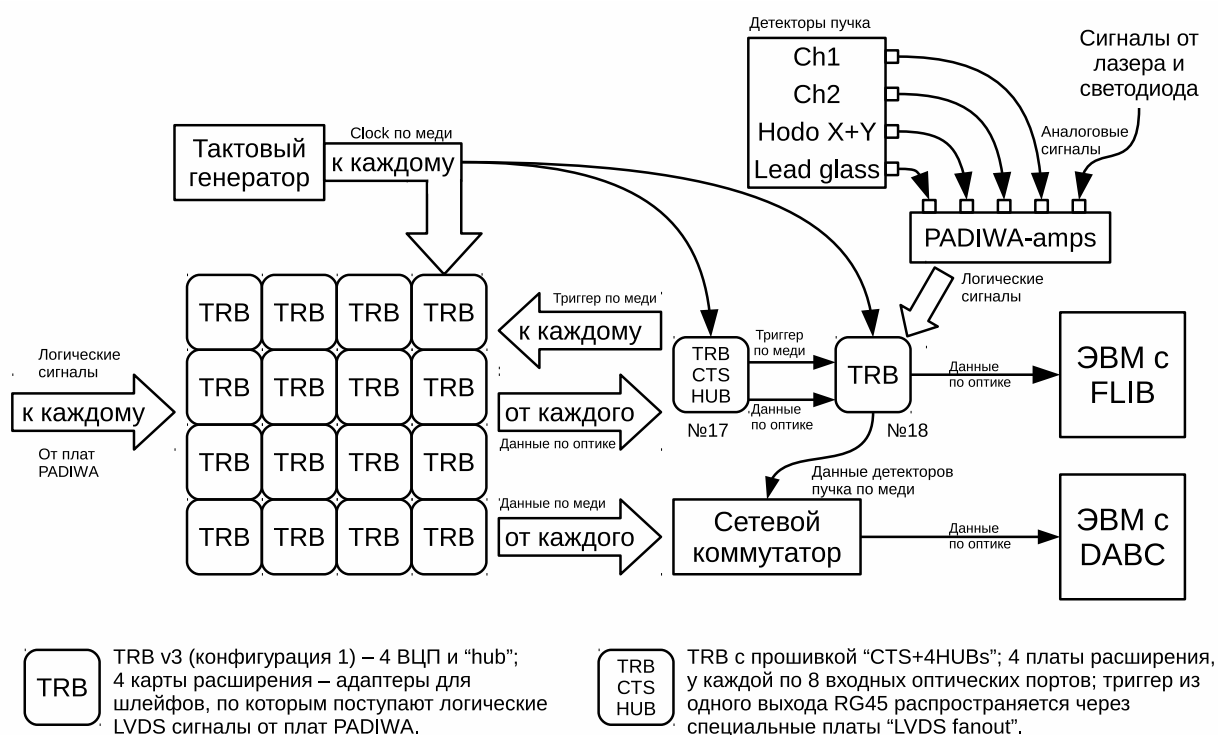


Рис. 9: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

394 3.2 Лабораторный стенд

395 Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась
 396 на пучковых тестах СВМ в ноябре 2014 г. Простейший анализ набранных
 397 данных показал, что некоторые распределения временных отметок не под-
 398 даются очевидному объяснению. В связи с этим потребовалось собрать ла-
 399 бораторный стенд, позволяющий более подробно исследовать особенности
 400 работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в
 401 разделе 2.1. В некоторых измерениях выходной LVDS сигнал с PADIWA не
 402 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 [42] к ЭВМ. Для считывания одного МА ФЭУ достаточно 64 каналов, то есть половины каналов одной платы передней электроники.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 10.

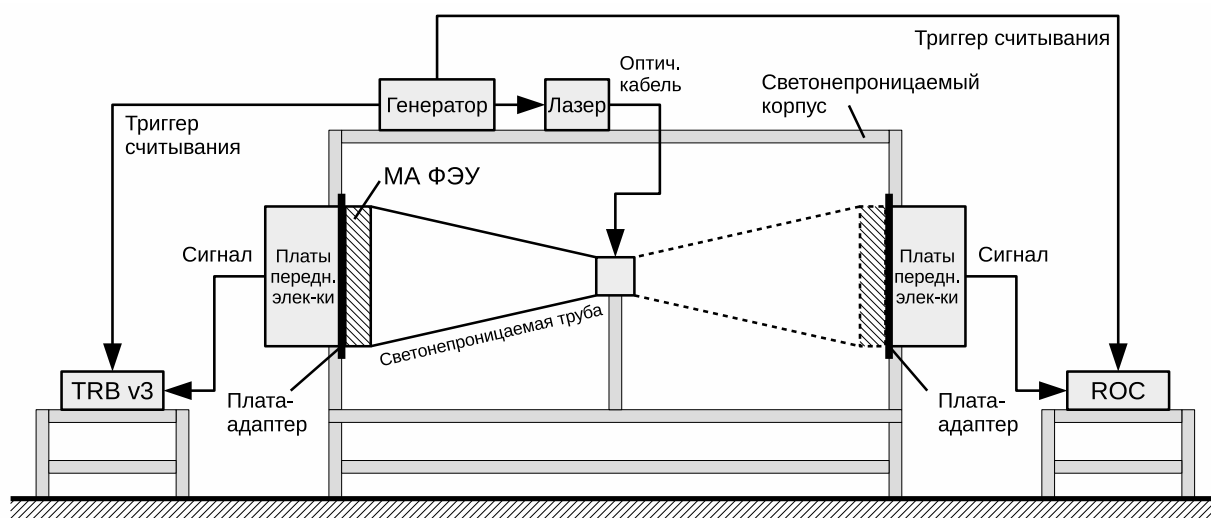


Рис. 10: Схема лабораторной установки.

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 [41] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [41], 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

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

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

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

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

460 4 Программное обеспечение

461 Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа
462 CBM RICH представляет собой набор модулей приема, первичной обработ-
463 ки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса
464 CbmRoot [43]. CbmRoot вместе с FLESnet [44] образуют инфраструктуру,
465 позволяющую выполнять приём данных, моделирование, реконструкцию и
466 анализ данных эксперимента CBM.

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

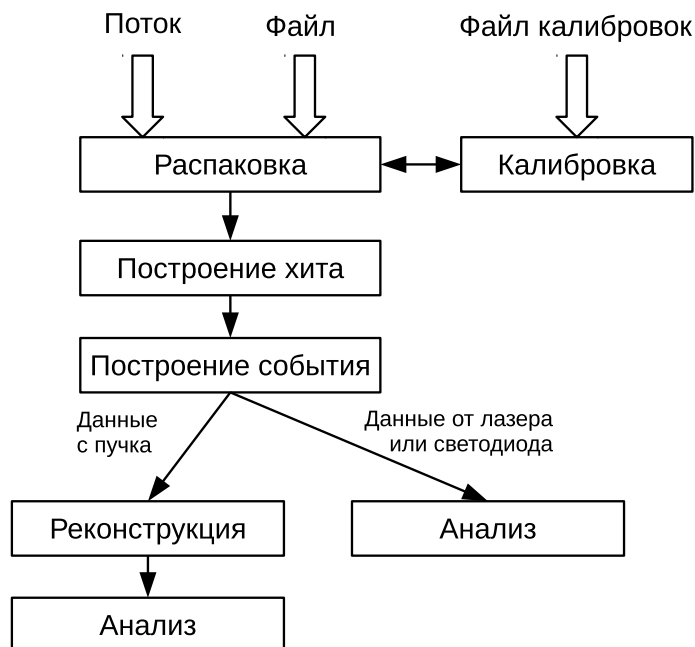


Рис. 11: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

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 [45]). 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*. 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 [46], 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 .

530 4.4 Построение хита

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

539 Для каждого входного канала был реализован буфер сообщений, ко-
540 торый наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее,
541 как только приходил задний фронт, из буфера выбирался наиболее близ-
542 кий по временной отметке передний фронт внутри заданного допустимого
543 временного окна. На рис. 12 приведён пример буфера передних фронтов
544 для заданной пары каналов ВЦП в момент прихода одного заднего фрон-
545 та. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий об амплитуде
546 сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок заднего и пе-
547 реднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как положительные,
548 так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны накладывается
549 ограничение.

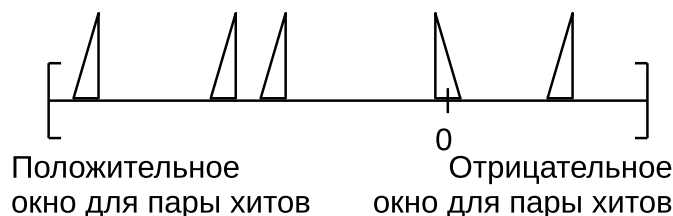


Рис. 12: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

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

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

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

565 4.5 Построение события

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

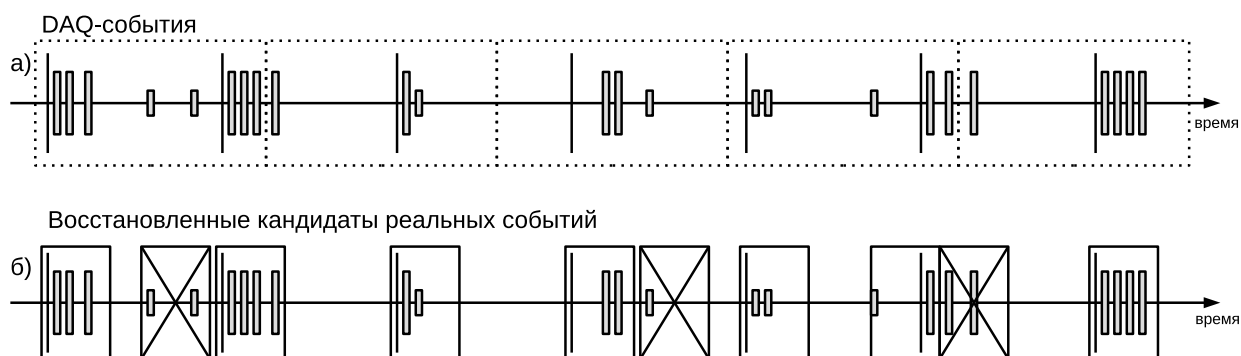


Рис. 13: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

571 Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 13, в
572 течение которого поступают:

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

578 Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-событий,
579 следовательно, необходимо при построении реальных событий учитывать
580 несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей электроники не гаран-
581 тируется, что входная информация поступает упорядоченной во времени.
582 Поэтому периодически случается, что хиты реального события, пришедше-
583 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. 14 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.

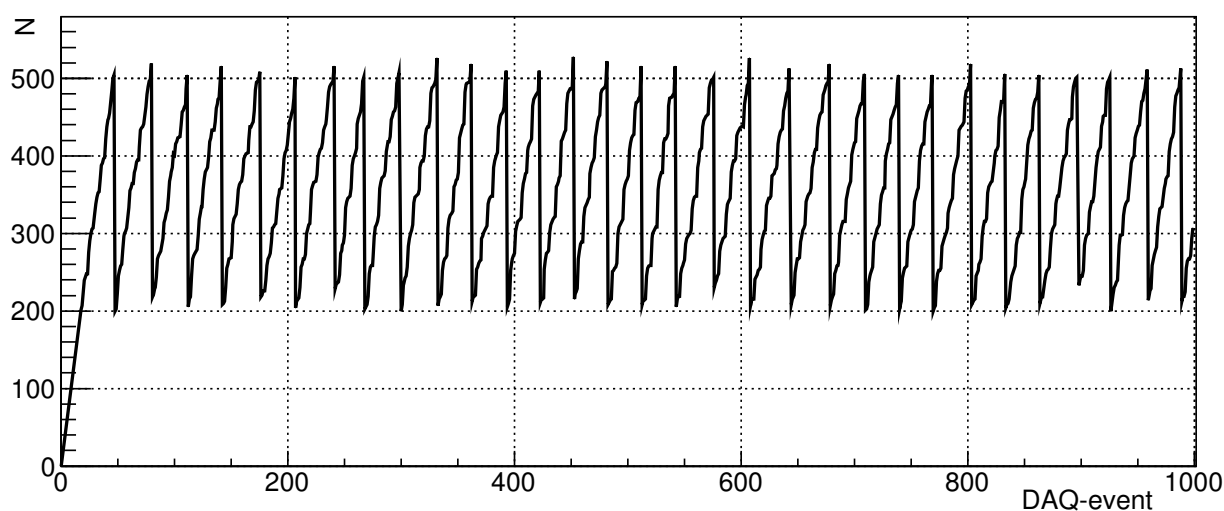


Рис. 14: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

607 4.6 Реконструкция

608 Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости
609 реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит как
610 загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, после фоку-
611 сировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствительной камеры,
612 которая в общем случае может состоять из нескольких плоскостей. Первый
613 этап реконструкции — перевод хитов из плоскостей камеры в плоскость ре-
614 конструкции. Затем выполняется поиск колец по хитам. В CbmRoot есть
615 реализации нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практиче-
616 ский интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского
617 излучения, основанный на проеобразовании Хафа и описанный в рабо-
618 тах [47, 48]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована
619 для данных пучковых тестов, в которых ожидается одно кольцо на событие.
620 Данный алгоритм реализован в классе *CbmRichProtRingFinderHoughImpl*,
621 унаследованном от *CbmRichProtRingFinderHough* и далее от *CbmRichRingFinder*.
622 После этого определяются параметры кольца и далее осуществляется ре-
623 конструкция треков частиц с применением информации с других детекто-
624 ров.

625 5 Результаты

626 5.1 Испытание системы сбора данных с использовани- 627 ем FLIB

628 Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами
629 сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов распа-
630 ковки обоих потоков. На массиве составляющем примерно 10^7 сообщений
631 расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована работоспо-
632 собность концепции формирования временных интервалов и ввода данных
633 в компьютер с использованием FLIB. Приведённые в следующих разде-
634 лах результаты получены на основе данных, принятых через стандартный
635 сетевой интерфейс с применением DAQ ПО на основе DABC [31].

636 5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

637 Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных ла-
638 бораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 15. По оси абсцисс
639 откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — зна-
640 чение точного времени в наносекундах. Вид графика не зависит от того,
641 по каким данным он был построен, так как он определяется архитектурой
642 время-цифрового преобразователя. Обратим внимание, что в показанном

643 примере в диапазоне значений десятибитного счетчика точного времени
644 интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс, соответствуют от-
645 счеты от 30 до 520. Точные границы интервала определяются значениями
646 задержек на элементах цифровой линии задержки. Эти величины индиви-
647 дуальны и зависят от флуктуаций технологического процесса.

648 С целью понимания особенностей работы счётчиков точного времени,
649 каждая таблица калибровки точного времени была аппроксимирована кусочно-
650 линейной функцией. На рис. 16 показан пример разности значений функ-
651 ции калибровки точного времени и линейной функции. Видно, что откло-
652 нения не превышают 60 пс.

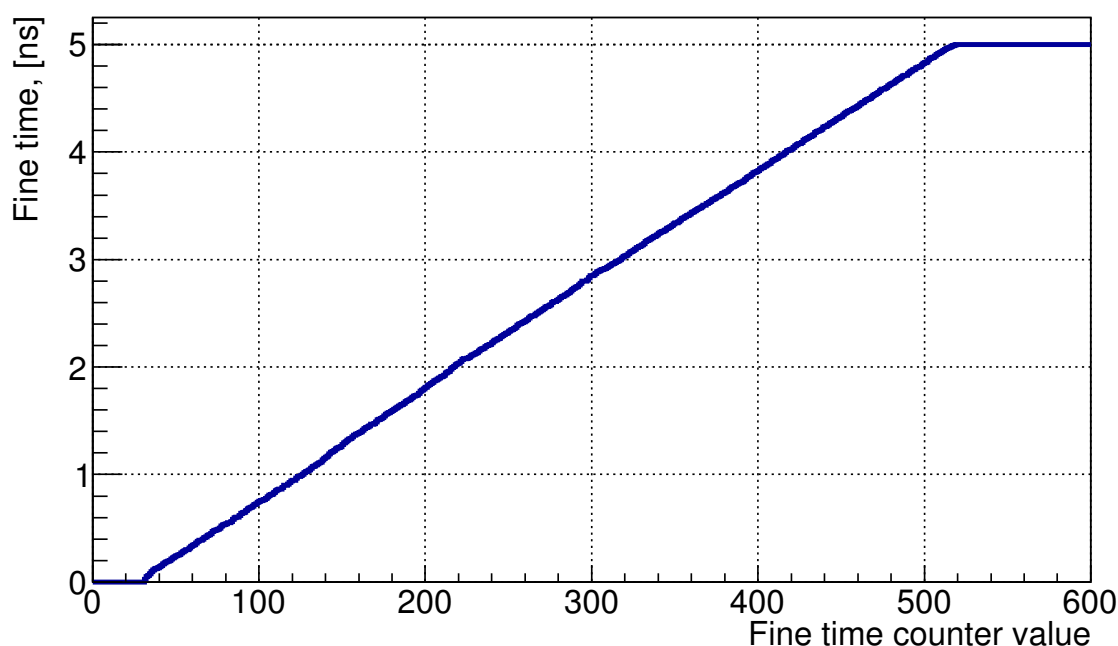


Рис. 15: Пример калибровочной кривой.

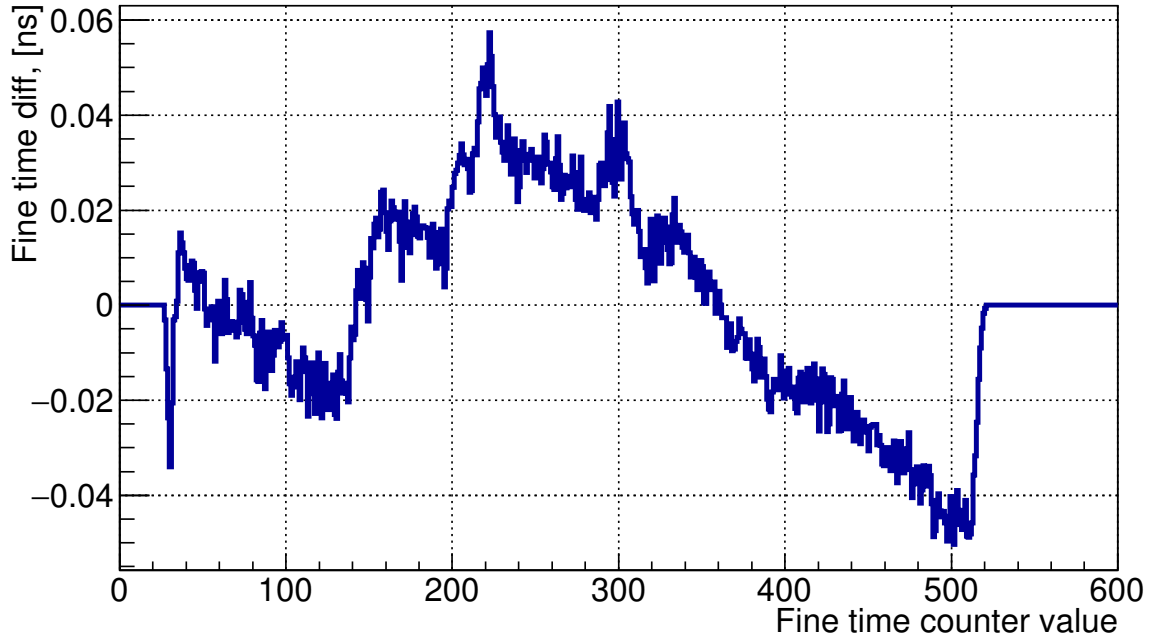


Рис. 16: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

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. 17. 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 [49] 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. 17 сплошным квадратом). Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом входном канале показаны на рис. 18. Там же показаны результаты без калибровки.

Видно, что использование точной калибровочной таблицы необходимо 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

увеличению ширины на полувысоте до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах. Отметим, что использование усреднённой линейной функции для 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.

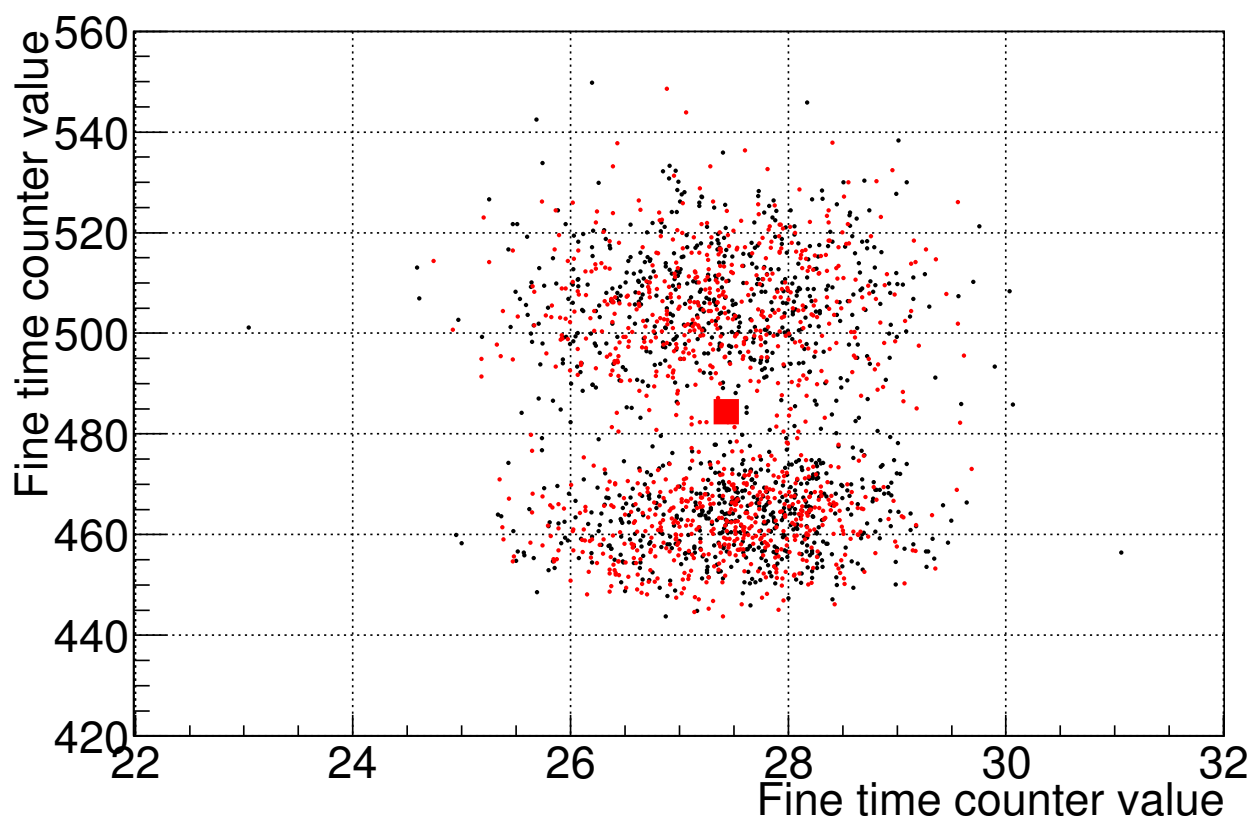


Рис. 17: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для усредненной линейной функции.

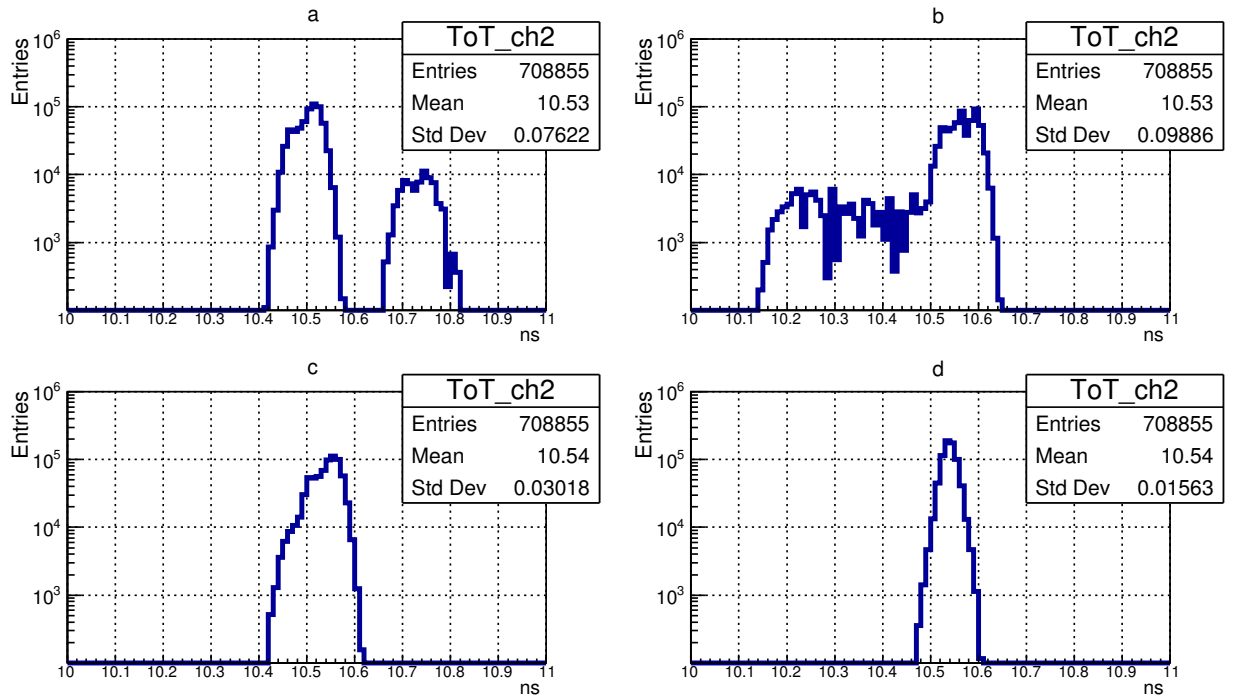


Рис. 18: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (а) без калибровки точного времени; (b) с применением усреднённой калибровочной функции; (с) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (d) с применением полноценной калибровочной функции.

Приведённые выше таблицы калибровки были построены по массиву данных, содержащихся в семи файлах. Каждый файл соответствует двум минутам 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. 19 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.

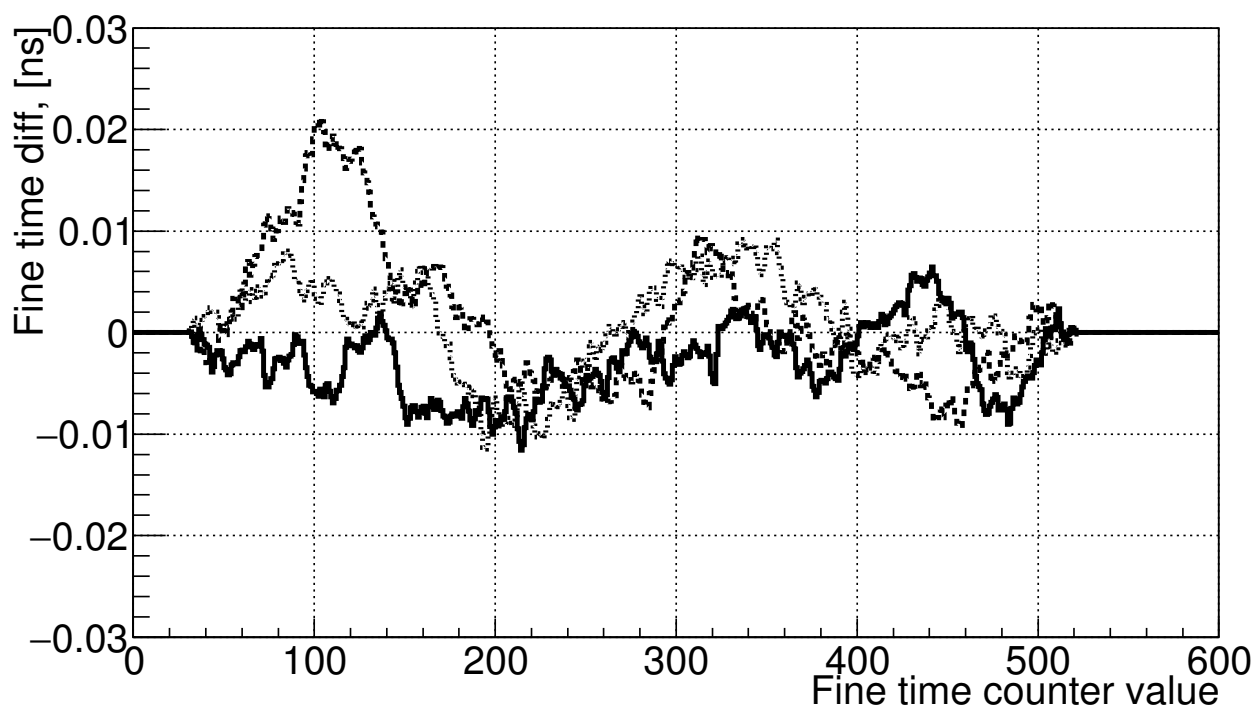


Рис. 19: Стабильность калибровок.

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. 20. 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. 20. См., например, рис. 21. 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-

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

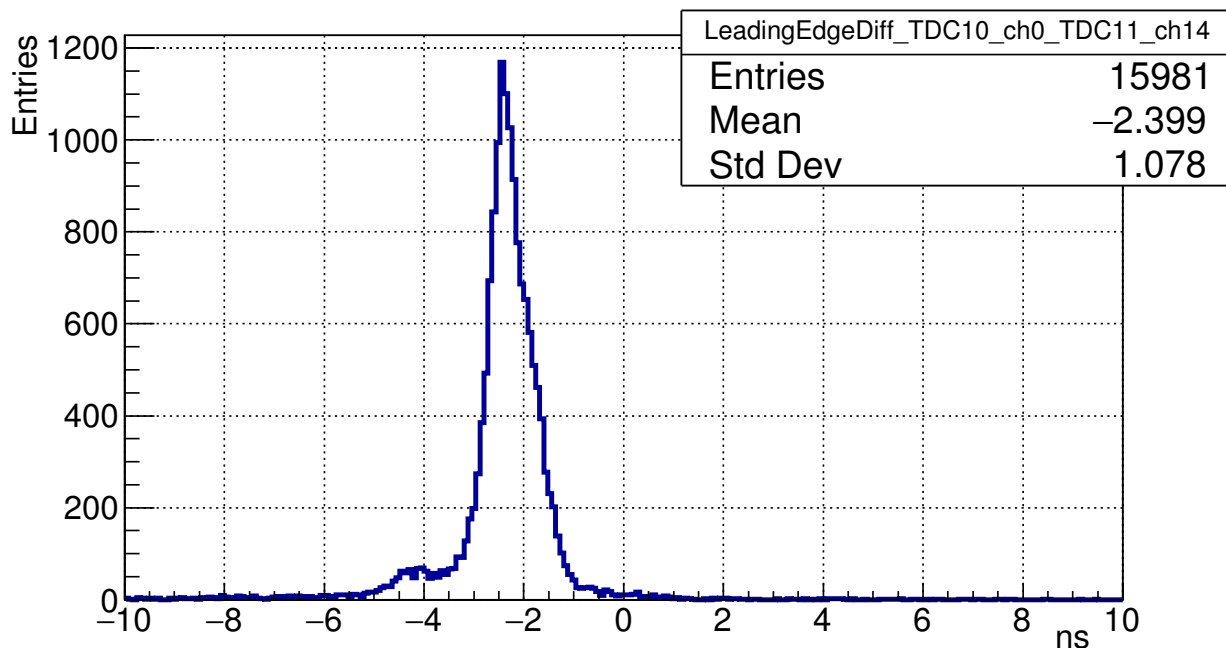


Рис. 20: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

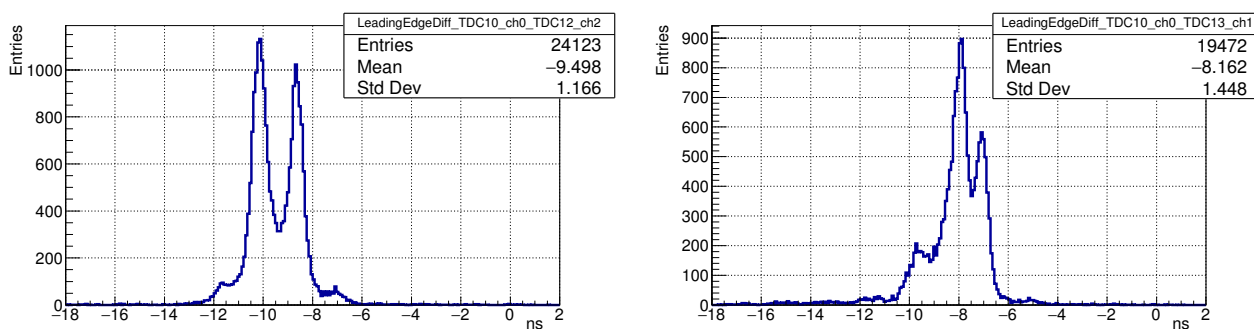


Рис. 21: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

731 5.4 Временное разрешение

732 В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых
 733 регистрируются несколько практически одновременно испущенных фото-
 734 нов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой ≈ 40 пс, т.е.

735 на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через МА ФЭУ.
736 Второй тип — черенковские кольца. Разброс времени прихода фотонов на
737 МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и 70 пс для вспышек лазера,
738 что определяется в первую очередь наклоном плоскости в которой распо-
739 ложены фотокатоды. Анализ таких событий позволяет охарактеризовать
740 временное разрешение всей системы считывания, начиная от окна МА ФЭУ
741 и кончая формированием отметок времени. Временное разрешение одного
742 канала определяется разбросом зарегистрированных временных отметок
743 относительно времени прилёта фотона при многократных измерениях. По-
744 скольку точное время прилёта фотона измерить нельзя, нам приходится
745 исследовать разброс разностей временных отметок в паре каналов при ре-
746 гистрации одновременно пришедших фотонов. Временные отметки в каж-
747 дом из каналов подвержены независимым флуктуациям по одинаковому
748 закону, следовательно, измеренная ширина распределения будет в $\sqrt{2}$ раз
749 больше, чем временное разрешение каждого канала. После применения
750 коррекций задержек и калибровки точного времени в двух каналах, ни
751 один из которых не является дефектным, получается распределение ана-
752 логичное показанному на рис. 20, отличающееся лишь тем, что положение
753 центра находится в нуле.

754 Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения состав-
755 ляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное
756 значение превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ
757 примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравнимыми
758 вкладками: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции момента
759 пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации
760 такой коррекции необходимо надёжное измерение времени над порогом,
761 что в нашем случае невозможно, см. секцию 5.6.

762 Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в це-
763 лом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновремен-
764 ные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать ка-
765 налов, считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принадлежа-
766 щих одному МА ФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырём сосед-
767 ним МА ФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и калибровки
768 точного времени, отбирались все хиты, принадлежащие одному событию,
769 и гистограммировались разности временных отметок по всем возможным
770 парам каналов. Так как в анализе были отброшены дефектные каналы,
771 а черенковское кольцо, сфокусированное на область из четырёх соседних
772 МА ФЭУ, проецируется лишь на часть пикселей, фактическое число ка-
773 налов в случае черенковских колец отличается. В таблице 2 показано, как
774 эволюционирует среднеквадратичное отклонение и FWHM в зависимости
775 от числа каналов. Отметим, что для событий от лазера среднеквадратич-
776 ное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличением числа
777 каналов, одновременно с тем, что распределение последовательно принима-

778 ет форму, более близкую к распределению Гаусса. Такое поведение можно
 779 интерпретировать как размывание индивидуальных особенностей каналов
 780 в процессе усреднения. Для хитов, принадлежащих одному черенковско-
 781 му кольцу (см. рис. 22), и FWHM !!! и RMS !!! **Это нужно исправить?**
 782 возрастают с увеличением числа каналов, причем форма спектра харак-
 783 теризуется широким основанием. Вероятно, отличия между этими двумя
 784 случаями связаны с тем, что распределения фотонов во времени для че-
 785 ренковского кольца и вспышки лазера отличаются друг от друга.

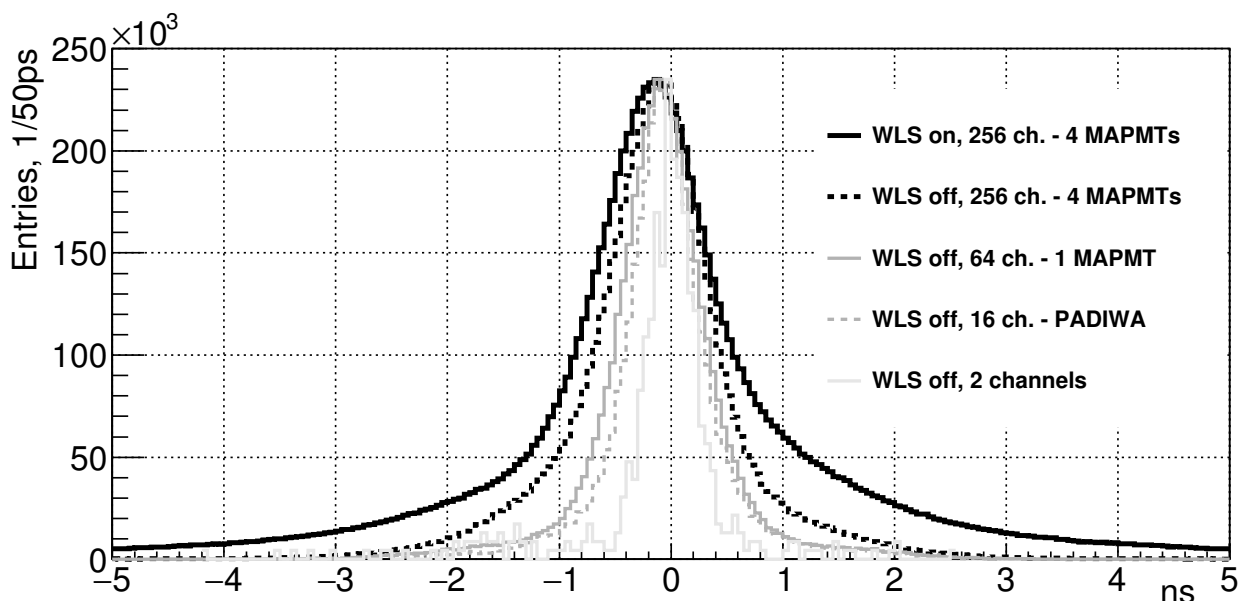


Рис. 22: Распределения для четырёх различных наборов каналов для со-
 бытий от черенковских колец. Сплошной чёрной линией показано анало-
 гичное распределение для 4-х МА ФЭУ со слоем сместителя спектра.

Таблица 2: FWHM и RMS распределений при различных наборах исследу-
 емых каналов.

Анализируемая область	Пара каналов	Плата PADIWA	Один МА ФЭУ	Четыре МА ФЭУ
Кол-во каналов, кольца	2	14	39	160
FWHM, кольца, нс	0.40	0.60	0.80	1.05
RMS, кольца, нс	0.66	0.58	0.62	0.79
FWHM, лазер, нс	0.7	1.05	1.30	1.55
RMS, лазер, нс	0.83	0.79	0.85	1.04

786 5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя 787 спектра

788 Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черен-
 789 ковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя

790 спектра. Анализу подлежит распределение разностей временных отметок
 791 хитов каждого кольца относительно первого по времени хита в данном
 792 кольце. В зависимости от длины волны черенковский фотон может с той
 793 или иной вероятностью либо поглотиться сместителем спектра и вызвать
 794 его свечение, либо пройти сквозь слой сместителя спектра без взаимодей-
 795 ствия и попасть фотокатод. В результате, даже при наличии слоя сместите-
 796 ля спектра, часть хитов подчиняется временной зависимости характерной
 797 для чистого ФЭУ. Таким образом, для получения кривой высвечивания
 798 сместителя спектра необходимо из распределения разностей времен, по-
 799 лученного со сместителем спектра, вычесть должным образом отнормиро-
 800 ванное в максимуме распределение разностей времён, полученное с чистым
 801 ФЭУ.

802 Нормированные в максимуме кривые высвечивания со сместителем спек-
 803 тра и без него показаны на рис. 23, а разность этих распределений — на
 804 рис. 24. Видно, что за исключением небольшой выпуклости в области 7 нс,
 805 связанной с особенностями работы данного семейства МА ФЭУ, кривая
 806 выглядит похоже на сумму нескольких экспонент.

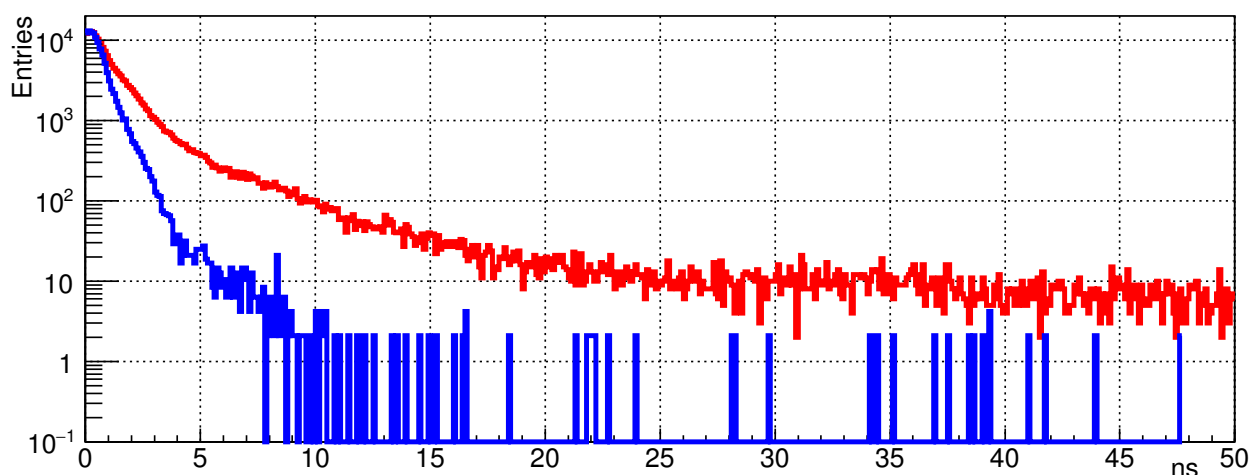


Рис. 23: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечива-
 ния со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

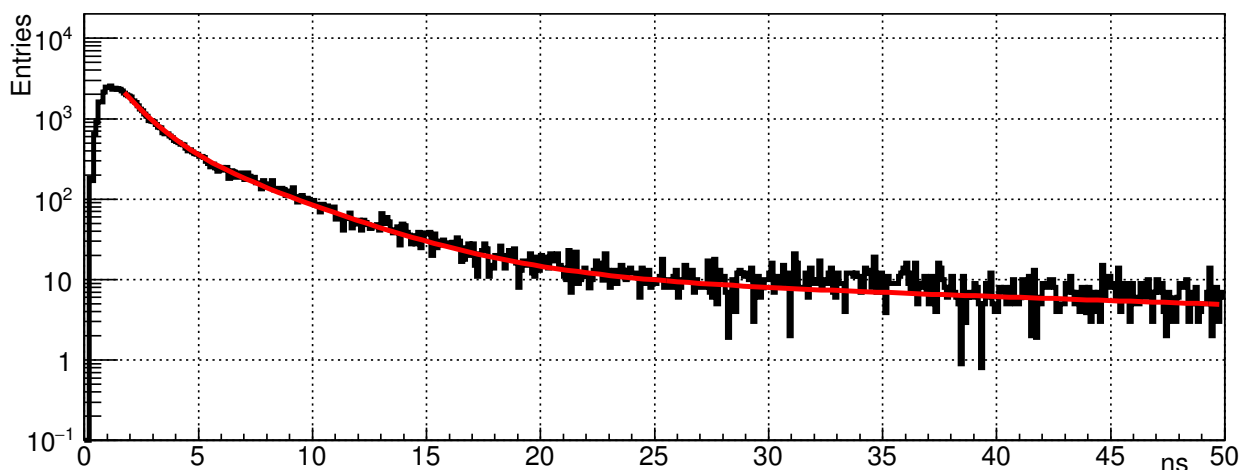


Рис. 24: Разница распределений со сместителем спектра и без него и кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную кривую с результатами флюориметрических исследований. Стеклопластина 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 [50]. Были получены 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. 24 суммой трёх 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 счёта единичных фотонов [51]. 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 относительно первого хита в кольце было подогнано тремя

836 экспонентами со свободными параметрами. Если начать фитирование по-
837 лучившейся зависимости, отступив 4 нс от начала высвечивания, величи-
838 ны постоянных распада экспонент воспроизводятся с точностью лучше 5%,
839 а соответствующие относительные интенсивности несколько искажаются,
840 что естественно, в силу существования начального неэкспоненциального
841 участка кривой. Таким образом, подтверждена корректность применённо-
842 го метода определения времён высвечивания.

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

850 5.6 Время над порогом

851 Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найденного
852 хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об ампли-
853 туде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных
854 CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения временного раз-
855 решения путём коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды
856 (walk correction), а также для повышения качества отделения однофото-
857 электронного сигнала от шума. На рис. 25 показано типичное распределе-
858 ние ToT, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки
859 ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура,
860 согласно [52], может быть объяснена наличием периодической наводки как
861 на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и вхо-
862 дом ВЦП. На рис. 26 показан экран цифрового осциллографа в режиме
863 накопления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к
864 выходу PADIWA. Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдае-
865 мым пикам в распределении ToT; имеет место проблема недостаточности
866 амплитуды одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логиче-
867 ской единицы; имеется периодическая наводка на выходе дискриминато-
868 ра, но ее недостаточно для объяснения наблюдаемой картины; преобла-
869 дание определенных длительностей логических сигналов позволяет пред-
870 положить наличие периодической структуры во входном сигнале. Все это
871 говорит о необходимости подстройки аналоговой части для формирования
872 на входе PADIWA более чистого сигнала большей амплитуды и о защите
873 соединения между дискриминатором и ВЦП от наводок. Подобные измене-
874 ния будут, с учетом результатов данной работы, реализованы в следующем
875 прототипе платы передней электроники, называемом DIRICH [30].

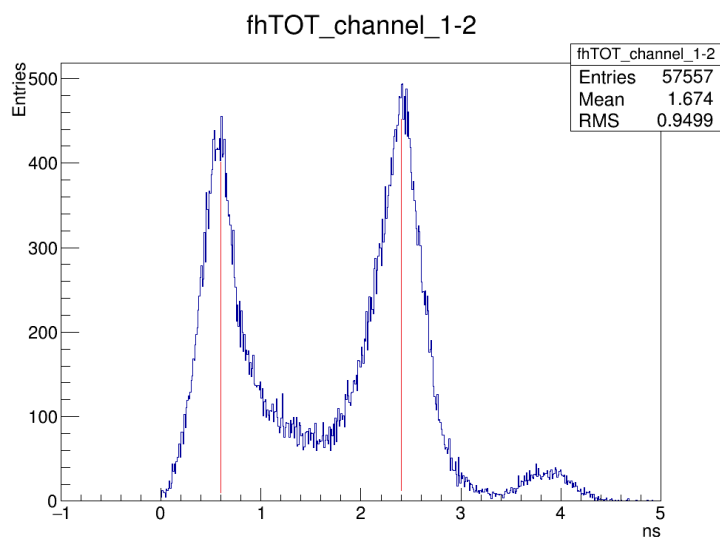


Рис. 25: Типичное распределение ToT.

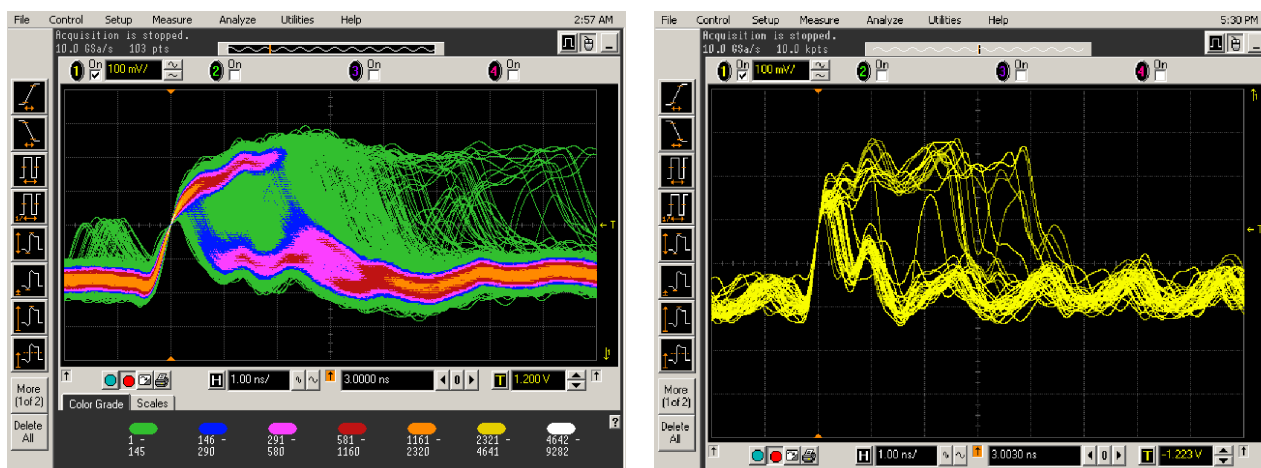


Рис. 26: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту. Правая и левая панели рисунка отличаются временем накопления сигналов.

Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в случае СВМ RICH, и продемонстрированные в данной работе параметры достаточно точны 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.

5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в секции 1, у МА ФЭУ H12700 имеются особенности, которые могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фото-

887 электронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для прояснения
888 этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределе-
889 ний с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XYTER,
890 см. описание лабораторного стенда в секции 3.2. Далее, результаты ампли-
891 тудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью
892 платы PADIWA.

893 Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали нали-
894 чие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелирован-
895 ных с источником света. Также были выполнены специальные измерения
896 с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см.
897 пикселя. Эти измерения позволили установить, что событие с малой ам-
898 плитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале,
899 находящемся в том же ряду диодной системы, был зарегистрирован фото-
900 электрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с
901 низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выгля-
902 дит как на рис. 27.

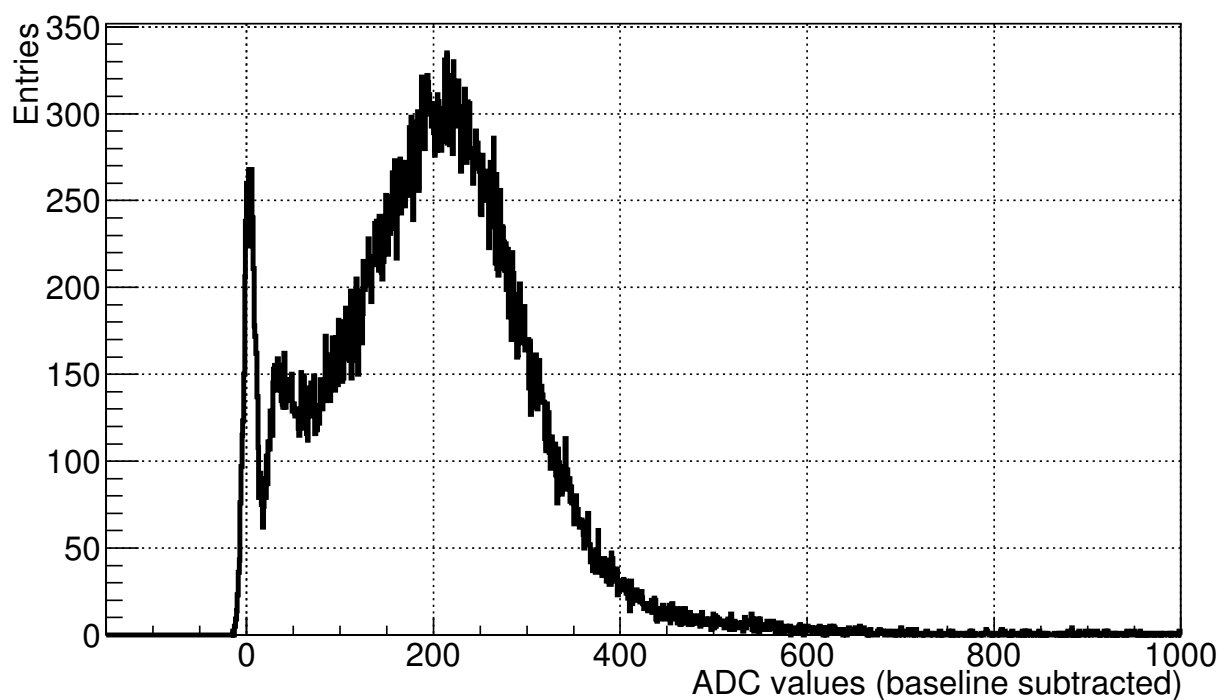


Рис. 27: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ Н12700.

903 Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, рас-
904 положенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный
905 сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одно-
906 электронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в секции 1
907 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется от опти-
908 мального пути от динода к диноду. Отметим, что в большинстве каналов
909 уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения низкоампли-

910 тудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного сигнала. Таким
911 образом, попытка получить максимальную эффективность регистрации за
912 счет снижения порога приводит к возрастанию паразитных хитов, локали-
913 зованных не в тех пикселях, где родился фотоэлектрон. Для снижения
914 числа паразитных хитов мы ставили порог регистрации в ложбине меж-
915 ду низко- и высоко-амплитудными частями одноэлектронного спектра. По-
916 скольку формы одноэлектронных спектров во всех каналах подобны, ана-
917 лиз формы спектра на рис. 27 позволяет заключить, что выбранный нами
918 порог приводит к потере 12 % одноэлектронных импульсов.

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

926 Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с по-
927 мощью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена
928 в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях, по-
929 строенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут быть
930 получены из анализа потока данных, набранных при различных значени-
931 ях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализо-
932 ванного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 2.1, позволяет
933 получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но позво-
934 ляет достичь максимальных частот, достаточных для локализации базовой
935 линии. На рис. 28 показана зависимость частоты триггеров от порога реги-
936 страции. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более по-
937 дробно исследованному ниже, а быстро возрастающие границы вокруг вер-
938 тикальной штриховой линии ограничивают локализацию базовой линии.
939 Точность локализации базовой линии мы оцениваем как ± 200 отсчетов по
940 шкале, использованной на рис. 28 и рис. 29B,D.

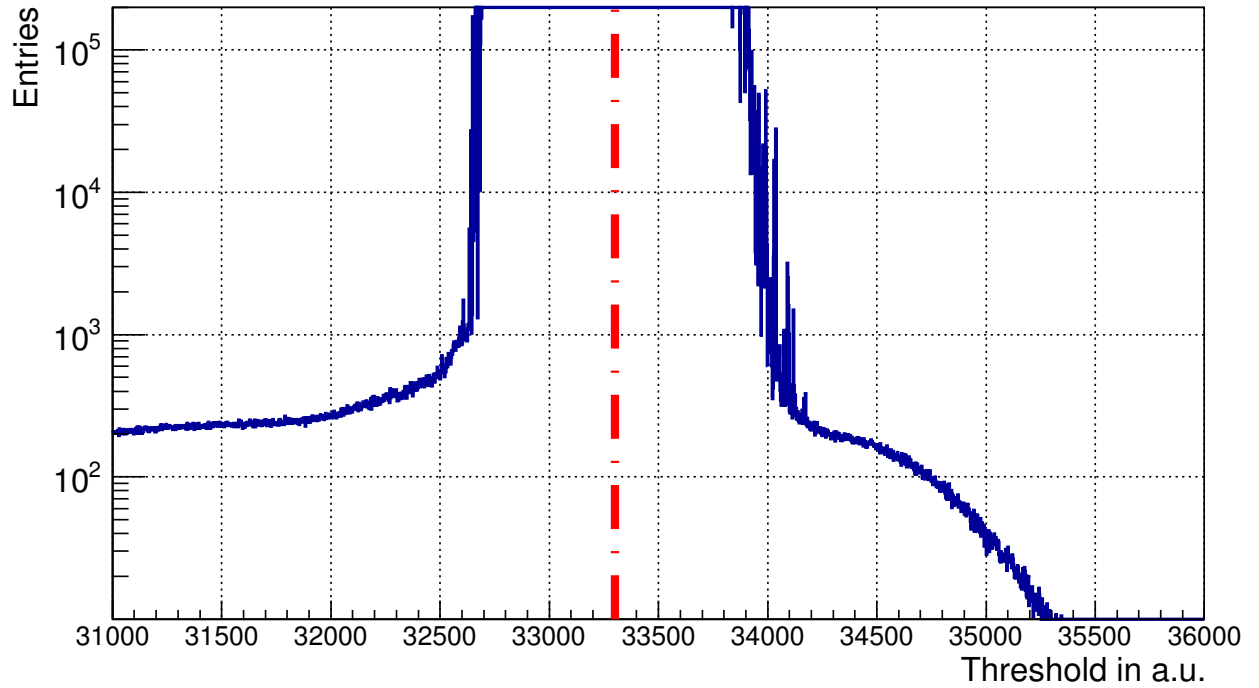


Рис. 28: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

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. 29. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 29(с). Соответственно, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, показанным на рис. 29(а). Сплошная линия на рис. 29(б) получена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 29(д) 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 RADIWA 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.

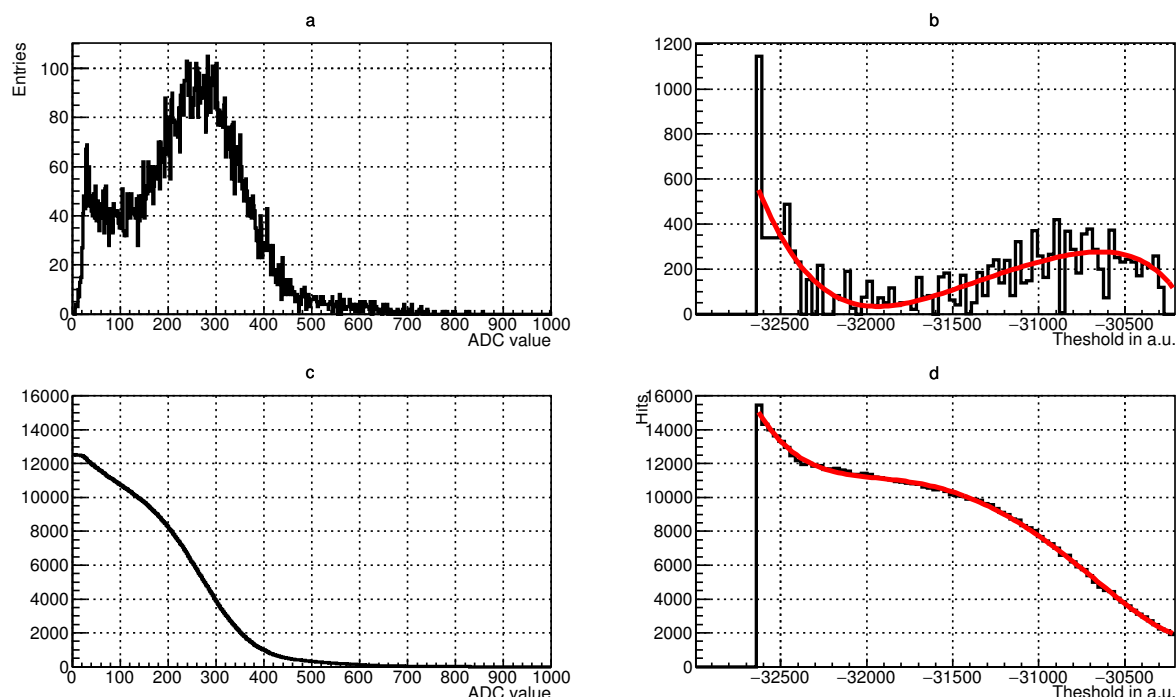


Рис. 29: Сравнение (а) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (б) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе RADIWA и TRB v3; сравнение (с) интеграла одноэлектронного спектра и (д) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

Заключение

Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных детектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный модуль, состоящий из МА ФЭУ 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 21 пс (FWHM) при использовании калибровки точного времени. Применение поканальной кусочно-линейной псевдо-калибровки ухудшает временное разрешение до 50 пс (FWHM), а единой для всех каналов усреднённой псевдо-калибровки приводит к значению временного разрешения 64 пс (FWHM) в наиболее неблагоприятных случаях. Обсуждена процедура калибровки задержек между каналами а также стабильность полученных задержек. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс за все время измерений. Рассмотрена возможность использования спектров “времени над порогом” (ToT) для отбора корректных хитов и коррекции временной привязки. Выявлено, что спектр ToT имеет многопиковую структуру по причине периодических наводок. Это препятствует использованию этого параметра в анализе. Выявленные схемотехнические недостатки будут устранены в сле-

983 дующей версии плат считывающей электроники. Исследованы временные
 984 свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации
 985 черенковских колец. Наиболее интенсивная быстрая компонента характе-
 986 ризуется временем высвечивания 1.1 нс, но имеются также компоненты с
 987 характерными временами 3.8 нс и 45 нс. Проведено сравнение медленного
 988 аналогового и быстрого временного считывания МА ФЭУ. Выявлено про-
 989 явление особенностей одноэлектронного спектра в том, как эффективность
 990 регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов за-
 991 висят от порога дискриминатора. Исследовано временное разрешение все-
 992 го канала считывания для различных по величине множеств каналов: от
 993 одной пары до 256 штук. Наихудшее из полученных значений составляет
 994 1.2 нс, что определяется в первую очередь отсутствием коррекции времен-
 995 ной отметки в зависимости от амплитуды сигнала и дрейфом задержек
 996 между каналами. Полученные результаты достаточны для использования
 997 исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM,
 998 однако устранение выявленных недостатков позволит создать запас по эф-
 999 фективности и повысить надежность системы при долговременной эксплу-
 1000 атации.

1001 Список литературы

- 1002 [1] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6,
1003 2006.
- 1004 [2] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and*
1005 *P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in
1006 laboratory experiments, Lect. Notes Phys. **814** (2011) pp. 980.
- 1007 [3] *P. Senger and V. Friese* // The CBM Collaboration: Nuclear Matter
1008 Physics at SIS-100, GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- 1009 [4] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. GSI,
1010 Darmstadt (2005) 406 p.
- 1011 [5] *V. Friese and C. Sturm* // CBM Progress Report 2014, ISBN: 978-3-
1012 9815227-2-3, 2015.
- 1013 [6] *A. Malakhov and A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM
1014 Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- 1015 [7] *M. Koziel* // MVD Status: Integration, 25th CBM Collaboration Meeting,
1016 Darmstadt, 20-24 April 2015. [https://indico.gsi.de/getFile.py/](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960)
1017 [access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960)
1018 [confId=2960](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.

- 1051 [23] Photomultiplier tubes, Basics and Applications, Hamamatsu Photonics
1052 K.K.
- 1053 [24] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal.
- 1054 [25] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>
- 1055 [26] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, and M. Traxler* // A novel
1056 approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS)
1057 TDC in an FPGA, 2016 JINST 11 C01046.
- 1058 [27] TRB v3 documentation, [http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
1059 [docu/trb3docu.pdf](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
- 1060 [28] *W. M. Zabołotny and G. Kasprowicz* // Data processing boards design for
1061 CBM experiment, Proc. SPIE 9290, Photonics Applications in Astronomy,
1062 Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014,
1063 929023 (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2073377;
- 1064 [29] *J de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM
1065 Experiment at FAIR, 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006.
- 1066 [30] *J. Michel, M. Faul, J. Friese, C. Höhne, K.-H. Kampert, V. Patel,*
1067 *C. Pauly, D. Pfeifer, P. Skott, M. Traxler, and C. Ugur* // Electronics for
1068 the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, 2017 JINST 12
1069 C01072.
- 1070 [31] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Data acquisition and online monitoring
1071 software for CBM test beams, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001.
- 1072 [32] *C. Bergmann et al.* // Common CBM beam test of the RICH, TRD and
1073 TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014, CBM Progress
1074 Report 2014, p.9.
- 1075 [33] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector and
1076 radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress Report
1077 2014, p.78.
- 1078 [34] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the
1079 basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real
1080 conditions, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.
- 1081 [35] Information about the T9 beam line and experimental facilities,
1082 [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)
1083 [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)
1084 [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)

- 1085 [36] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS
1086 SYSTEM.
- 1087 [37] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror
1088 displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector,
1089 doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- 1090 [38] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment
1091 control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- 1092 [39] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/
1093 datasheets/led-deepuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led-deepuv/uvtop240.pdf)
- 1094 [40] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on
1095 multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21
1096 May 2015, Pages 43–50.
- 1097 [41] Alphalas Picopower-LD series datasheet, [http://www.alphalas.
1098 com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_
1099 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)
- 1100 [42] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- 1101 [43] <http://cbmroot.gsi.de/>
- 1102 [44] FLESnet development repository, [https://github.com/cbm-fles/
1103 flesnet](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
- 1104 [45] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, and C. Ugur* //
1105 HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41,
1106 GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- 1107 [46] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of the
1108 integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE Transactions
1109 on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April 1997.
- 1110 [47] *С.А. Лебедев, Г.А. Ососков* // Быстрые алгоритмы распознавания
1111 колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента
1112 CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- 1113 [48] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring
1114 Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment
1115 at FAIR, ACAT2010 proceedings.
- 1116 [49] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout
1117 and DAQ prototype, PEPAN letters.

- 1118 [50] M. Dürr, private communication.
- 1119 [51] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon Counting,
1120 Academic Press, London 1984.
- 1121 [52] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the
1122 presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.