

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. Deveaux^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	3
1 Фотоэлектронный умножитель	6
2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH	8
2.1 64-канальный модуль считывания	8
2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ	14
3 Экспериментальные установки	15
3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах	15
3.2 Лабораторный стенд	20
4 Программное обеспечение	22
4.1 Распаковка	23
4.2 Калибровка точного времени	23
4.3 Коррекция задержек между каналами	23
4.4 Построение хита	24
4.5 Построение события	25
4.6 Реконструкция	27
5 Результаты	28
5.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB .	28
5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)	28
5.3 Определение коррекций задержек между каналами	33
5.4 Временное разрешение	35
5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра .	37
5.6 Время над порогом	40
5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и ам- плитудном считывании	42
Заключение	45

*eovchar@jinr.ru

Аннотация

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приёма данных, состоящий из 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 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 Matter) [2, 3, 4, 5]. Физическая программа CBM нацелена на всестороннее изучение фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи и уравнения состояния вещества при экстремально высоких плотностях барионной материи, получаемых при столкновении релятивистских ядер в эксперименте с фиксированной мишенью.

Для реализации программы необходимы измерения выходов и распределений в фазовом пространстве частиц, рождающихся в области взаимодействия. Для этого в каждом событии требуются:

- восстановление короткоживущих частиц, включая очень редкие, по продуктам их распадов;

- 39 • идентификация долгоживущих продуктов взаимодействия;
- 40 • измерение центральности соударения;
- 41 • определение плоскости реакции.

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

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

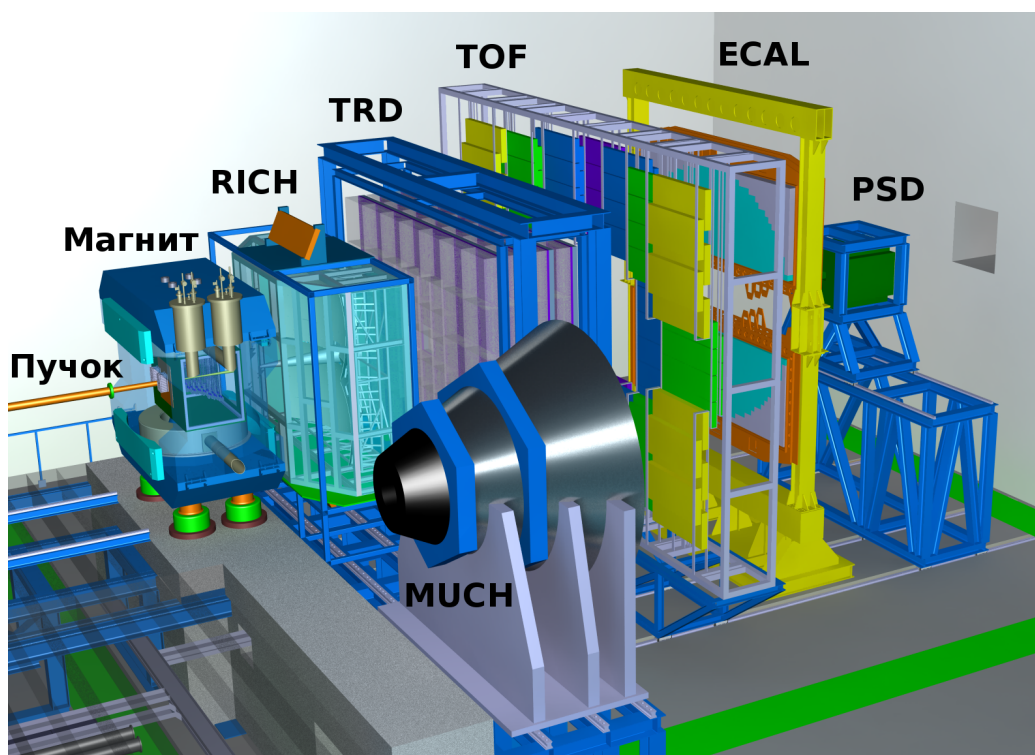


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH.

46 Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [6] распо-
47 ложена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микро-
48 детектор (MVD) [7], выполненный на основе монолитного пиксельного
49 детектора типа MAPS. Ниже по пучку также между полюсами, но уже
50 вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой си-
51 стемы (STS) [8], собранные из двухсторонних микроstriповых сенсоров.

52 Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для ре-
53 конструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импуль-
54 сов с точностью не хуже 1% и нахождения вторичных вершин в условиях
55 высокой множественности и плотности частиц.

56 Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детек-
57 тор черенковских колец (RICH) [9], предназначенный для идентифика-
58 ции электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до
59 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов
60 и J/ψ частиц. Этот детектор, разработке которого посвящена данная
61 статья, имеет радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под неболь-
62 шим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментирован-
63 ных сферических зеркал радиуса 3 м и общей площадью 13 кв.м. В ка-
64 честве позиционно-чувствительного фотодетектора используется много-
65 анодный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H12700.

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

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

73 Для идентификации адронов используется время-пролётный детек-
74 тор (TOF) [13].

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

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

82 Эксперимент характеризуется высокой множественностью частиц, боль-
83 шой густотой треков под малыми углами и высокой частотой взаимодей-
84 ствий. Вследствие этого детекторы содержат десятки тысяч плотно упа-
85 кованных каналов считывания, работающих по бестриггерной схеме, с
86 которых необходимо собирать и анализировать “на лету” большой поток
87 данных.

88 В данной статье описаны результаты тестов прототипа систем ре-
89 гистрации фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных.
90 Были реализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и
91 программные, соответствующих систем разрабатываемого детектора че-
92 ренковских колец эксперимента CBM. Тесты проводились как в лабо-

93 раторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа
94 детектора RICH на пучке PS в ЦЕРН.

95 1 Фотоэлектронный умножитель

96 Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фир-
97 мы Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарак-
98 теризован в работах [17, 18]. Он обладает следующими достоинствами:
99 большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочув-
100 ствительные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без
101 потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время
102 прохождения однофотоэлектронного сигнала через динодную систему,
103 малый разброс этого времени от события к событию, низкие перекрёст-
104 ные помехи и низкая скорость счета тепловых электронов. Некоторые
105 свойства данного прибора показаны в табл. 1, по большинству парамет-
106 ров 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 электронно-лавины, нс
≈ 10	<1.0	0.64	0.28

107 Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чув-
108 ствительность МА ФЭУ в версии H12700B-03, используемой в настоящей
109 работе, соответствует конфигурации с входным стеклом, прозрачным в
110 ультрафиолетовой области.

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

119 Имеются исследования [20, 21, 22], показывающие, что радиационная
120 стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте СВМ.
121 Также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном по-

122 ле до 2.5 мТл [17] без значительного падения характеристик. Использо-
123 вание магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетек-
124 тора в пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использо-
125 вания в эксперименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют
126 интерес и другие эксперименты, например, он рассматривается и для
127 обновления ЛНСб [17].

128 Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ H12700B-03 име-
129 ет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных ФЭУ и
130 требующие особого внимания при реализации канала считывания. Раз-
131 множение электронов в динодной системе происходит в одном и том же
132 вакуумном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный
133 объём динодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 2, отличается
134 тем, что она довольно компактна, едина для всех каналов и позволя-
135 ет добиться отличных временных свойств. Электронные лавины, соот-
136 ветствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через
137 динодную систему. Имеют место такие эффекты как выбивание элек-
138 тронов из динодов фотонами, прошедшими сквозь фотокатод, и откло-
139 нение электронов от идеальной траектории за счет разброса энергий. По-
140 следняя особенность приводит к попаданию электронов на последующие
141 стадии динодной системы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или
142 части электронной лавины в соседний канал. Перетекание части лавины
143 в соседний канал имеет место в более чем 25% случаев при равномерном
144 освещении всего фотокатода. Величина перетекающего заряда составля-
145 ет от 3% до 7% в зависимости от взаимного расположения пикселей [17].
146 Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьётся в
147 соседнем канале зависит от взаимного расположения каналов и состав-
148 ляет при равномерном освещении от 0.1% до 2% [23]. Кроме того, при на-
149 личии относительно большого сигнала в одном из каналов, наблюдается
150 биполярная наводка в каналах, расположенных в том же ряду. При ин-
151 тегрировании этой наводки возможно формирование низкоамплитудных
152 импульсов в нескольких каналах. В классическом ФЭУ такие эффек-
153 ты отсутствуют из-за отсутствия связи с соседними каналами, наличия
154 развитой системы фокусировки и такой конструкции динодной системы,
155 что диноды имеют большую площадь и последующие стадии полностью
156 экранируются предыдущими.

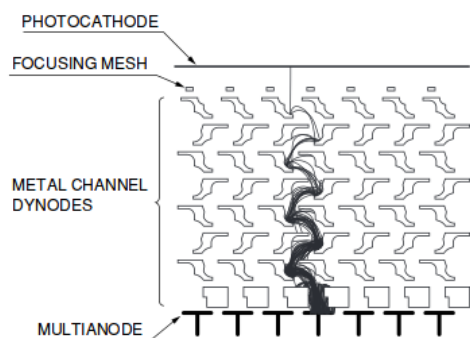


Рис. 2: Схема динодной системы типа “Metal Channel”.

157 Описанные особенности приводят к формированию в одноэлектрон-
 158 ном спектре низкоамплитудной части, сливающейся с шумами и отделен-
 159 ной от основного пика довольно глубокой ложбинкой. Проявления этого
 160 эффекта в наших измерениях обсуждаются в секции 5.7.

161 2 Архитектура системы сбора данных СВМ RICH

162 2.1 64-канальный модуль считывания

163 Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оциф-
 164 ровки данных СВМ RICH может быть сгруппирована в 64-канальные
 165 модули, каждый из которых соответствует одному многоанодному фо-
 166 тоэлектронному умножителю (МА ФЭУ). Схема 64-канального модуля
 167 показана на рис. 3. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату
 168 TRB v3.

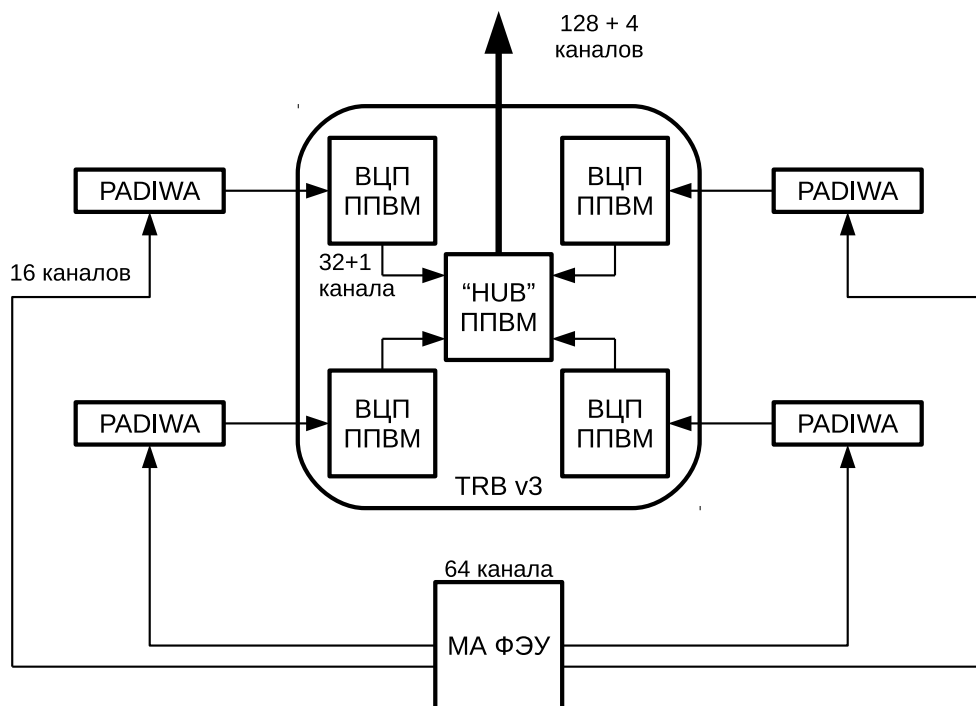


Рис. 3: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

169 PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разрабо-
 170 танная в ГСИ [24]. Общий вид платы PADIWA показан на рис. 4. Плата
 171 устанавливается на МА ФЭУ через плату-адаптер, единственным назна-
 172 чением которой является соединение анодов МА ФЭУ с соответствующи-
 173 ми входами PADIWA. С одной стороны печатной платы PADIWA распо-
 174 ложены 16 сигнальных входов с импедансом 100 кОм. На каждый вход
 175 приходится два контакта — земля и сигнал. Они чередуются таким обра-
 176 зом, чтобы можно было подключить PADIWA к плате-адаптеру любой
 177 стороной. Каждый канал PADIWA имеет собственный фильтр низких
 178 частот с полосой пропускания около 100 МГц и предусилитель, которые
 179 образуют аналоговую часть канала. После усиления сигнал поступает в
 180 программируемую пользователем вентильную матрицу (ППВМ). Обыч-
 181 но ППВМ применяются для обработки цифровых (логических) сигналов,
 182 однако, в нашем случае на входные цифровые линии подаётся аналого-
 183 вый сигнал. В ППВМ для каждой входной линии можно задать свой
 184 порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким обра-
 185 зом, настраиваемые входы ППВМ могут использоваться как дискрими-
 186 наторы. На выходе каждого канала формируется логический ноль, когда

187 входной сигнал в этом канале ниже установленного порога, и логиче-
188 ская единица, когда входной сигнал выше этого порога, см. рис. 5. Далее
189 расположены выходные порты и порты настройки ППВМ, объединён-
190 ные в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для управле-
191 ния платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS линий —
192 выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен стан-
193 дартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения
194 источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого име-
195 ется датчик температуры, подключённый к ППВМ. Сигналы с датчика
196 могут использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев,
197 если такая возможность заложена в программе ППВМ.

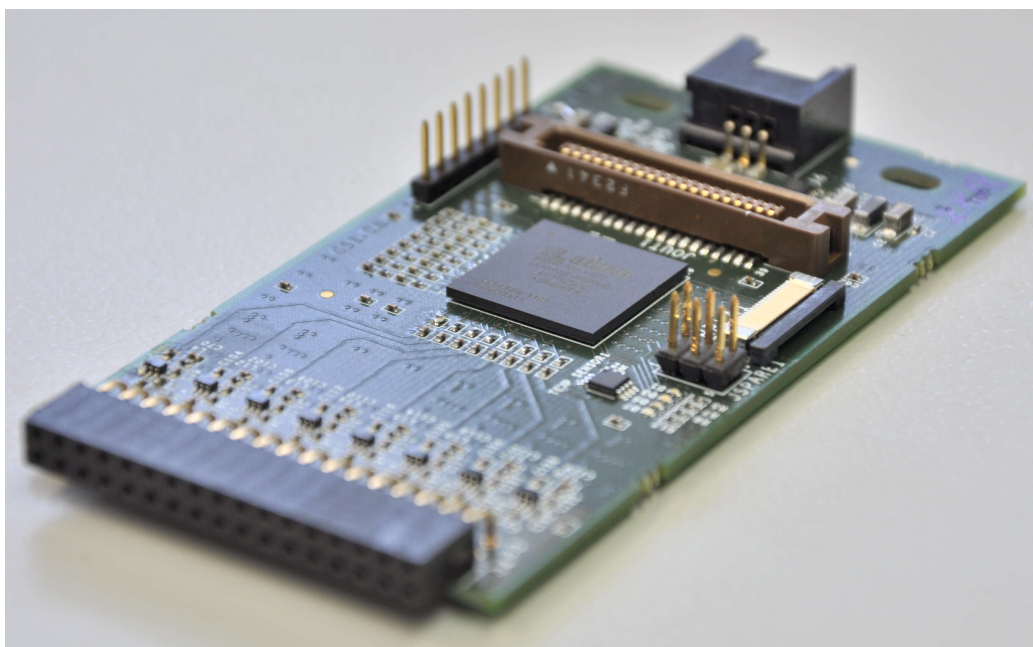


Рис. 4: Общий вид платы PADIWA.

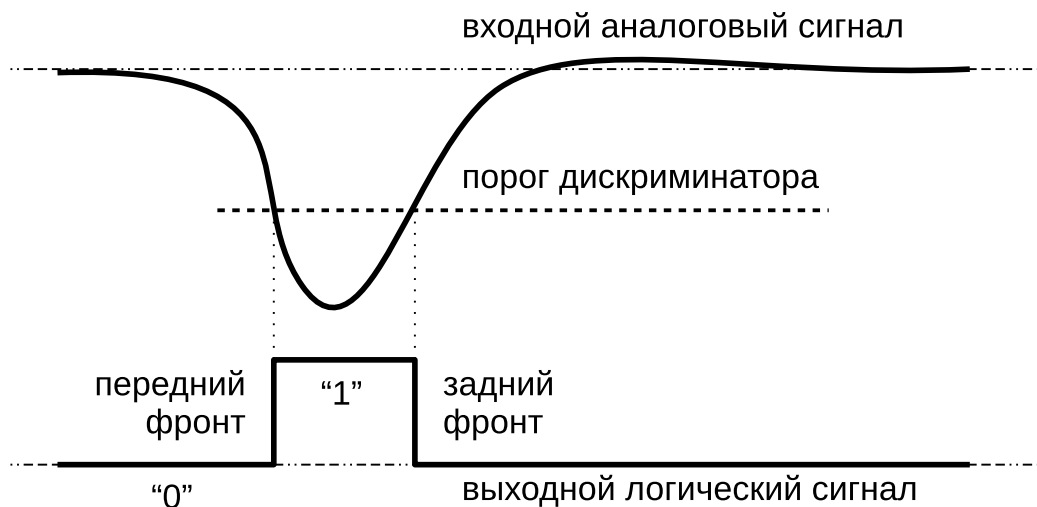


Рис. 5: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

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

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

210 Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 6. Рядом с каждой пери-
 211 ферийной ППБМ имеются специальные порты, к которым можно присо-
 212 единить платы расширения. В частности, существует специальная пла-
 213 та расширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате
 214 TRB v3 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, ко-
 215 торые используются для двусторонней связи с другими платами TRB v3
 216 или с компьютером.

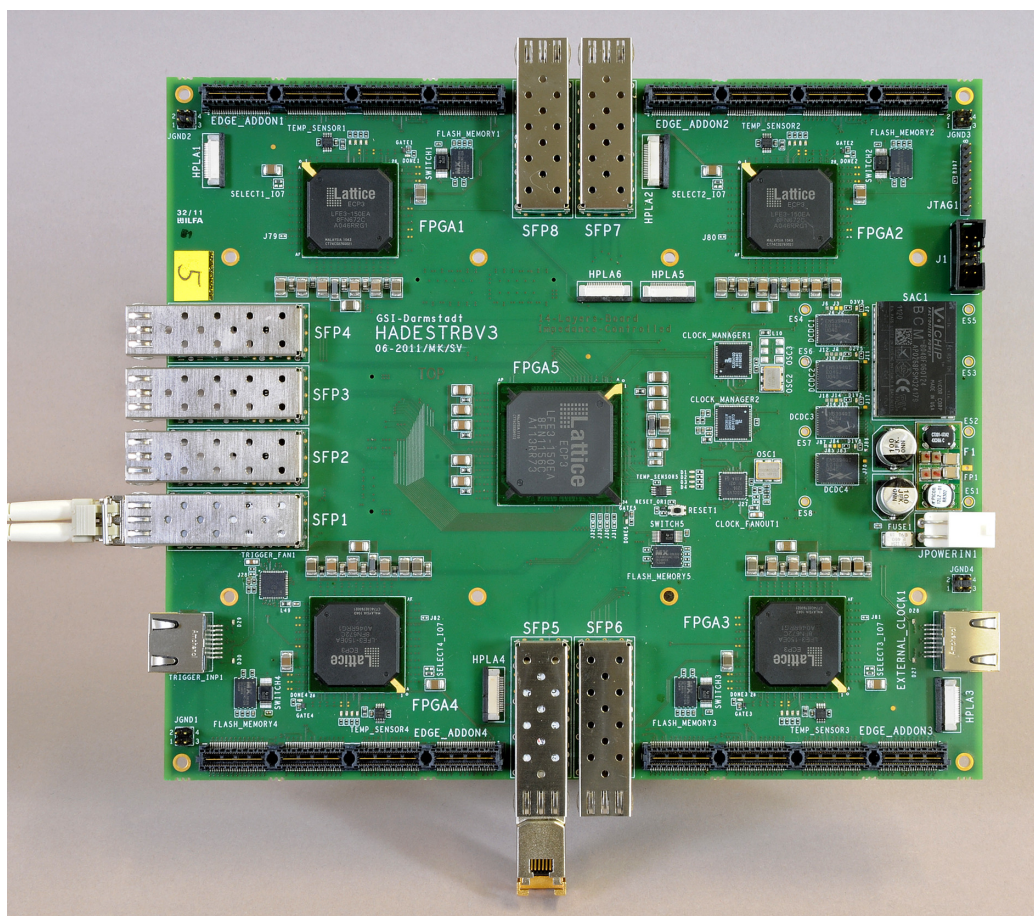


Рис. 6: Общий вид платы TRB v3.

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,

231 для получения зависимости скорости счёта от порога дискриминатора с
232 целью определения оптимального порога.

233 Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа.
234 Грубое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управ-
235 ляется от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов
236 счетчика называются эпохой (*epoch*), а 11 младших разрядов называются
237 грубым временем (*coarse*) [25]. При регистрации момента времени вход-
238 ного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой
239 и собственно так называемой временной отметкой (*timestamp*). Чтобы
240 уменьшить поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивается
241 каждые 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных
242 отметок, принадлежащих данной эпохе.

243 Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный
244 регистр точного времени (*fine*). В регистр пишется значение счётчика
245 точного времени, реализованного с помощью технологии Tapped delay
246 line (TDL) на 512-ти элементах. Теоретически, если все элементы за-
247 держки идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный
248 5 нс, можно разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной вре-
249 менной отметки была бы равна 9.9 пс, а полное время рассчитывалось
250 бы как $T = (epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

251 Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс па-
252 раметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калиб-
253 ровка результатов измерения точного времени относительно диапазона
254 значений регистра. Процедура калибровки и анализ ее качества обсуж-
255 даются в секциях 4 и 5.2 соответственно.

256 Находящиеся на TRB v3 ППБМ формируют 4-байтовые сообщения
257 одного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER,
258 TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика фор-
259 мирования сообщений подробно описана в документации [26].

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

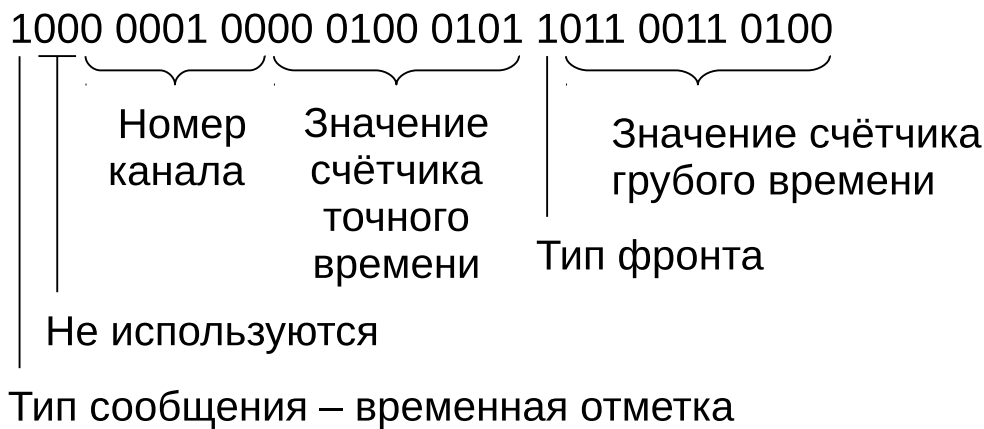


Рис. 7: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

264 Старший бит (левый) указывает на то, что данное сообщение является
 265 временной отметкой. Следующие два бита не используются. Следую-
 266 щие 7 бит указывают номер канала 4. Затем 10 бит указывают значение
 267 счётчика точного времени 0x45. Далее вспомогательный бит edge, ко-
 268 торый на данный момент не используется. Последние 11 бит кодируют
 269 значение счётчика грубого времени 0x334. Далее отсюда вычисляется
 270 полное значение времени в наносекундах (2681319745539.841309).

271 Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризу-
 272 ется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения
 273 фотоэлектрона и значением отметки времени переднего фронта. Эта за-
 274 держка определяется временем развития электронной лавины в динод-
 275 ной системе, временем распространения сигнала по проводникам и вре-
 276 менем переключения логических элементов. Процедура коррекции за-
 277 держек и ее особенности описаны далее в секциях 4 и 5.3.

278 2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

279 В концепции системы сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено
 280 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответст-
 281 вующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата передней
 282 электроники (FEB — front-end board), где осуществляются аналоговые
 283 преобразования и оцифровка сигналов. Далее, данные в виде электриче-
 284 ских цифровых сигналов поступают в плату считывания (ROB — readout
 285 board), где происходит концентрация данных и их пересылка по оптиче-
 286 скому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки дан-
 287 ных (DPB — data processing board). DPB уплотняют данные с различных

288 детекторов за счет удаления избыточной информации специфическим
289 для каждого детектора способом и группируют эти данные в пакеты,
290 называемые срезами времени (time slice). В каждый срез времени по-
291 падают сообщения со всех детекторов, имеющие временную отметку в
292 заданном интервале. Далее они передаются по меньшему числу оптиче-
293 ских каналов с более высокой пропускной способностью [27]. После этого
294 данные поступают в память, доступную центральному процессору ЭВМ
295 по высокоскоростной шине через платы интерфейса, называемые FLIB.
296 Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface Board, а FLES [28], в свою
297 очередь, обозначает First Level Event Selector, т.е. специализированный
298 аппаратно-программный комплекс для построения событий “на лету” и
299 их отбора по заданным критериям. Плата FLIB может быть реализо-
300 вана, например, путем программирования коммерческой PCI-E платы
301 HTG K-7.

302 В случае пучковых тестов RICH плата передней электроники реали-
303 зована как пара RADIWA-TRB v3 (конфигурация 1). В будущем плани-
304 руется объединение функционала этих плат на одной плате DIRICH [29].
305 В качестве ROB используется плата TRB v3, сконфигурированная как
306 концентратор. Плата DPB находится в стадии разработки прототипа, а
307 плата FLIB была впервые применена в одном из протестированных ва-
308 риантов системы сбора данных. При этом значительная часть измерений
309 была выполнена с использованием стабильной системы сбора данных на
310 основе DABC [30] и обычной сетевой карты.

311 **3 Экспериментальные установки**

312 **3.1 Экспериментальная установка на пучковых те-** 313 **стах**

314 Исследование системы считывания и сбора данных проводилось в со-
315 ставе полнофункционального прототипа детектора RICH эксперимента
316 CBM в ходе комплексных пучковых испытаний прототипов нескольких
317 детекторов того же эксперимента [31]. Подробности реализации прото-
318 типов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора
319 содержатся в работах [32] и [33] соответственно. Схема установки пред-
320 ставлена на рис. 8.

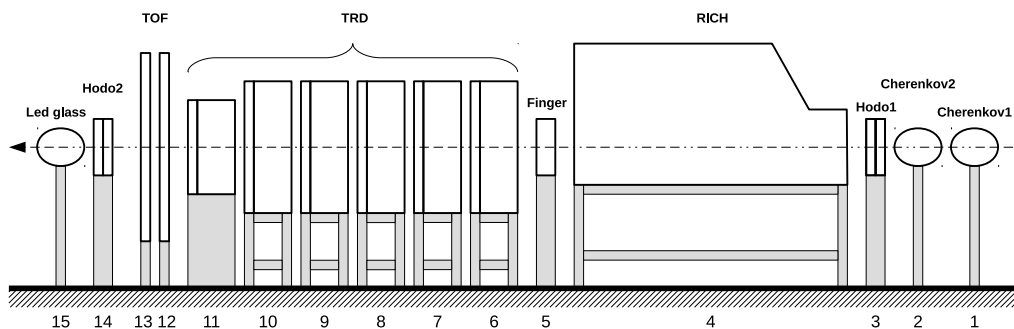


Рис. 8: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции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

321 Вывод пучка Т9 ускорителя PS [34] в ЦЕРНе представляет собой сме-
 322 шанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов импульсом, на-
 323 страиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых
 324 тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность
 325 вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрирова-
 326 лось в среднем 500 электронов.

327 Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена
 328 на рис. 9.

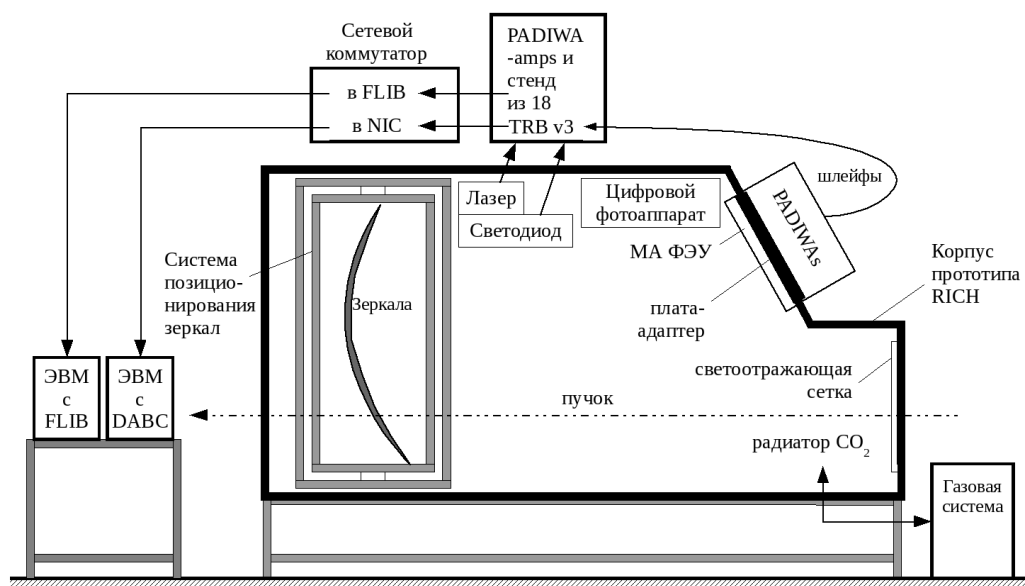


Рис. 9: Схема прототипа детектора RICH.

329 Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину,
 330 1.2 м в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в
 331 радиаторе до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ
 332 под избыточным давлением 2 мбар при комнатной температуре. Пока-
 333 затель преломления газа для ближнего ультрафиолета составляет при
 334 этом $n=1.00045$. Стабилизация избыточного давления газа с точностью
 335 0.1 мбар и его чистота обеспечивались газовой системой, описанной в [35].
 336 Абсолютное давление газовой смеси и температура мониторируются си-
 337 стемой медленного управления. Актуальное значение показателя пре-
 338 ломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

339 Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхне-
 340 го уровня, вставляющуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соеди-
 341 нённую с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение
 342 вокруг вертикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложен-
 343 ной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг гори-
 344 зонтальной оси. Сферическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит
 345 из 4 долей 40 см на 40 см. Каждая из долей крепится к внутренней ра-
 346 ме через три моторизированных актуатора. Перечисленные двигатели
 347 позволяют удалённо, после установки детектора на пучке, позициониро-
 348 вать зеркало. Более подробно система позиционирования зеркал описана
 349 в [36].

350 Система диагностики положения зеркал [37] состоит из светоотра-
 351 жающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа,

352 светодиода Roithner UVTOP240 [38] с длиной волны 245 нм и фотоаппа-
353 рата, считываемого удаленно. Сетка сделана из полос ретрорефлектора
354 шириной 10 мм и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизон-
355 тали и 110 мм по вертикали. Эта система позволяет контролировать точ-
356 ность поворота зеркал и, при наличии удалённого управления зеркала-
357 ми, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок
358 координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным пози-
359 циированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от
360 светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив
361 фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распозна-
362 вания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал
363 от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять
364 из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, мож-
365 но определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения
366 поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций ко-
367 ординат хитов.

368 Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувстви-
369 тельную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 МА ФЭУ, шесть из кото-
370 рых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu
371 H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть
372 фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спек-
373 тра толщиной 150-200 нм. В качестве сместителя спектра использовал-
374 ся паратерфенил ($\approx 40\%$ по массе) в полимерной матрице Paraloid B72.
375 Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компо-
376 нентов покрытия в дихлорметане, см. [39]. В определённый момент во
377 время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило
378 в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность
379 регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принад-
380 лежащих одному кольцу. Для мониторинга системы считывания и
381 калибровки относительных задержек между каналами, наряду со све-
382 тодиодом, использовался лазер Alphalas Picopower LD405 [40] с длиной
383 волны 405 нм и длительностью импульса по паспорту менее 40 пс. Ча-
384 стота срабатывания лазера, так же как и светодиода, составляла 100 Гц.
385 Интенсивность лазера была подобрана так, чтобы частота срабатывания
386 каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

387 Считывание с каждого МА ФЭУ осуществлялось модулем, описан-
388 ным в разделе 2.1. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на
389 плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку вы-
390 сокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы
391 предусилителей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат
392 PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих

393 длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпу-
 394 се прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA
 395 и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Данные с 16 плат TRB v3 посту-
 396 пали на ещё одну, 17-ю плату TRB v3 особой конфигурации, которая
 397 также являлась генератором и распределителем триггера считывания
 398 для всех плат TRB v3. Импульсы с генераторов, управляющих лазером
 399 и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались
 400 платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая из-
 401 мерять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число ка-
 402 налов [24]) и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3
 403 также нестандартной конфигурации, совмещающей ВЦП и concentra-
 404 тор данных. Параллельно функционировало две системы сбора данных
 405 — одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (се-
 406 теевой концентратор) с каждой платы TRB v3 по медному носителю, а
 407 другая через FLIB с одной (18-й) платы TRB v3. Схема считывания всей
 408 камеры и детекторов пучка представлена на рис. 10. Отметим, что ЭВМ
 409 с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных
 410 не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

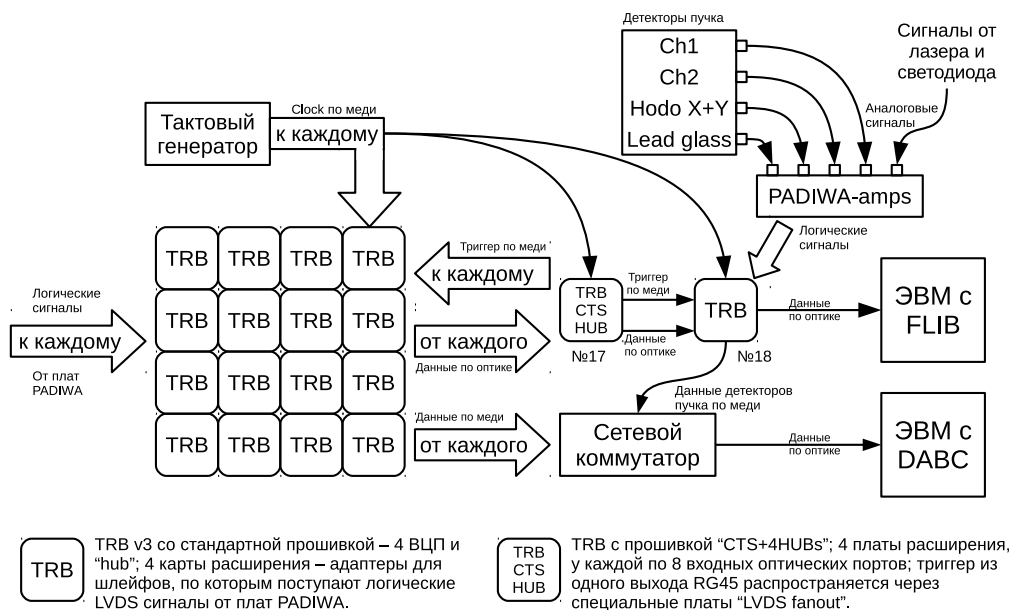


Рис. 10: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

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-XUTER, 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.

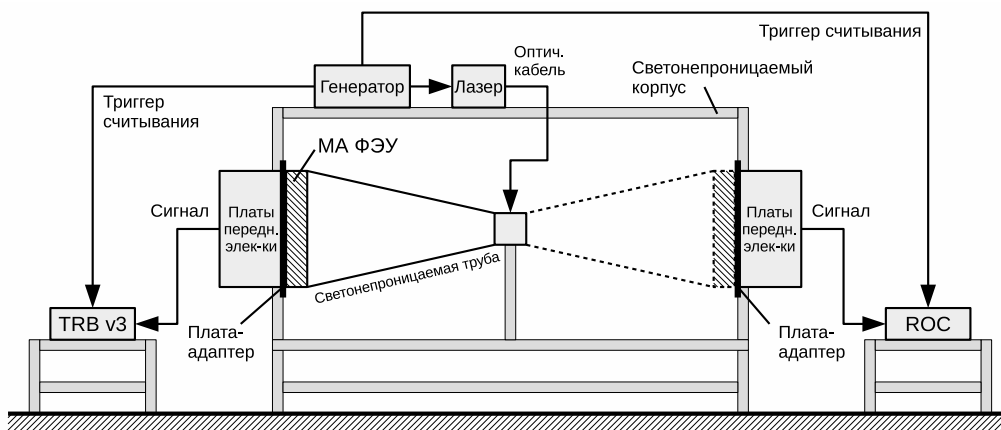


Рис. 11: Схема лабораторной установки.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picorower LD405 [40] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [40], как и в пучковых тестах. Свет от лазера по-

ступал 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 Н12700. Для того чтобы обеспечить максимально чистые измерения, выполнена тщательная изоляция МА ФЭУ от внешнего света. Рассеивающее стекло и МА ФЭУ были помещены в черную, специально изготовленную на 3D принтере, пластиковую трубу, которая, в свою очередь, была помещена в светоизолированный корпус.

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

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

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

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

477 сбора данных осуществлялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой
478 интерфейс ЭВМ.

479 4 Программное обеспечение

480 Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прото-
481 типа CBM RICH представляет собой набор модулей приема, первичной
482 обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программно-
483 го каркаса CbmRoot [42]. CbmRoot вместе с FLESnet [43] образуют ин-
484фраструктуру, позволяющую выполнять приём данных, моделирование,
485 реконструкцию и анализ данных эксперимента CBM.

486 Соответствующим образом сконфигурированное приложение, напи-
487 санное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный
488 случай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считы-
489 вания до анализа могут быть выполнены “на лету”, без записи промежу-
490 точных результатов на диск. В ходе описываемых в данной статье тестов
491 использовалась последовательность обработки данных, изображённая на
492 рис. 12. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдель-
493 ных блоков описаны ниже.

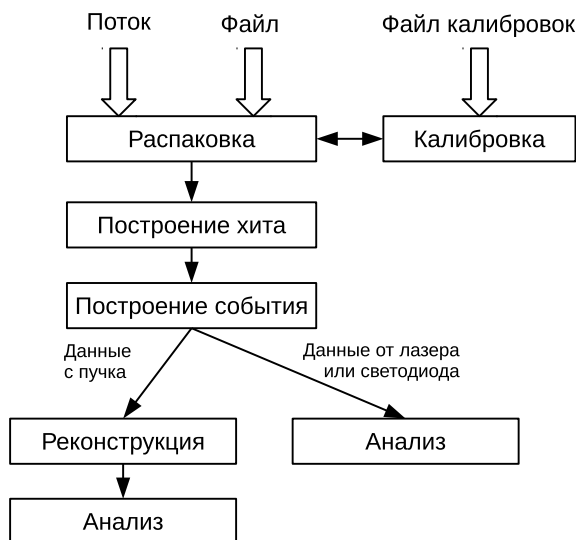


Рис. 12: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

494 4.1 Распаковка

495 Распаковка — это первый этап обработки данных, поступающих с элек-
496 троники. В CbmRoot есть возможность обрабатывать данные как по-
497 ступающие напрямую с детекторов, так и сохранённые в файле (с по-
498 мощью DABC в формате HLD — HADES list mode data format [44]).
499 При использовании FLIB распаковке предшествует запуск небольшого
500 интерфейсного модуля, который выделяет из поступающего от FLESnet
501 потока данных в формате временных интервалов (TSA — Time Slice
502 Archive), сообщения, относящиеся к детектору RICH. Распаковка ре-
503 лизована как task-класс *CbmRichTrbUnpack* и в результате выполнения
504 каждой итерации на выходе формируется *TClonesArray* с объектами
505 класса *CbmTrbRawMessage*.

506 4.2 Калибровка точного времени

507 В процедуре калибровки точного времени воплощена известная техника
508 калибровки счётчика цифровой линии задержки, реализованного с помо-
509 щью технологии Tapped delay line [45], основанная на том, что распреде-
510 ление времен прихода сигналов должно быть равномерным по временно-
511 му интервалу, занимаемому всеми элементами задержки. В результате
512 анализа набранной порции данных для каждого канала строится дис-
513 кретная функция $f_{calib}(Fine)$, называемая таблицей перехода от значе-
514 ния счётчика к значению точного времени в наносекундах. При использо-
515 вании таблицы калибровки точного времени полное время вычисляется
516 как $T = Epoch \cdot 2048 \cdot 5 + Coarse \cdot 5 - f_{calib}(Fine)$ нс.

517 Процедура калибровки точного времени реализована в singleton-классе
518 *CbmTrbCalibrator*, который не является частью конвейера обработки дан-
519 ных — обращение к объекту данного класса может производиться из лю-
520 бого места в программе. Присутствует возможность сохранения таблиц
521 калибровки в отдельном файле, что ускоряет многократные расчёты за
522 счёт повторного использования однократно рассчитанных таблиц.

523 4.3 Коррекция задержек между каналами

524 Для коррекции задержек между каналами в классе *CbmTrbCalibrator* ре-
525 ализована возможность импорта таблицы коррекций, построенной пред-
526 варительно с помощью CmbRoot-макросов “ExtractDelays” и “BuildDeltaTable”
527 на основе результатов первого прогона анализа. Первый макрос извле-
528 кает параметры гистограмм в текстовом виде из многочисленных фай-
529 лов результатов анализа, полученных с помощью CbmRoot, возможно,

530 с применением параллельных расчётов. Второй макрос стоит таблицу
531 коррекций по данным параметрам.

532 Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введём сплош-
533 ную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоя-
534 щей из множества МА ФЭУ. Полное число пикселей $M = 64 \cdot N$, где
535 N — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты,
536 имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно
537 относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение ок-
538 на зависят от экспериментальной установки (например, разницы длин
539 кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и под-
540 бираются в соответствии с распределением, построенным по конкретно-
541 му набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая
542 граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных
543 данных строятся гистограммы разности временных отметок i -го и j -го
544 каналов, где i и j пробегают значения от 1 до M . В качестве меры раз-
545 ности задержек между каналами можно взять по выбору пользователя
546 либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полу-
547 ченные значения заполняют кососимметричную матрицу A размерности
548 $M \cdot M$. В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, от-
549 носительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по
550 сути, столбцом матрицы A .

551 4.4 Построение хита

552 Сигнал от каждого зарегистрированного фотона, называемый хитом, со-
553 стоит из двух сообщений, содержащих временные отметки переднего и
554 заднего фронтов. Т.к. разные каналы имеют разные задержки и вероят-
555 ность регистрации отдельных фронтов не равна 100%, необходимо было
556 в анализе данных реализовать алгоритм подбора пар фронтов. Данная
557 процедура реализована в task-классе *CbmTrbEdgeMatcher*, который сто-
558 ит в конвейере после распаковки и фактически выполняется после при-
559 менения всех калибровок.

560 Для каждого внешнего канала был реализован буфер сообщений, ко-
561 торый наполнялся передними фронтами по мере их поступления. Далее,
562 как только приходил задний фронт, из буфера выбирался наиболее близ-
563 кий по временной отметке передний фронт внутри заданного допустимо-
564 го временного окна. На рис. 13 приведён пример буфера передних фрон-
565 тов для заданной пары внутренних каналов в момент прихода одного
566 заднего фронта. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий
567 об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок
568 заднего и переднего фронтов в подобранной паре. Допускаются как по-

569 ложительные, так и отрицательные значения ToT , однако в обе стороны
570 накладывается ограничение.

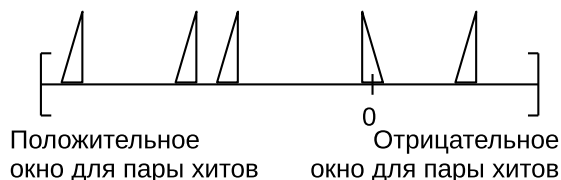


Рис. 13: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

571 Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный (передний ли-
572 бо задний) фронт, буфер постепенно наполняется и его необходимо очи-
573 щать, чтобы избежать переполнения. Если для поступившего заднего
574 фронта нет кандидата переднего фронта в буфере это означает, что
575 передний фронт не был зарегистрирован. В таком случае этот задний
576 фронт отбрасывается. Количество найденных фронтов сильно зави-
577 сит от нагруженности входного канала ВЦП, которая в свою очередь
578 зависит от порога дискриминатора. При низком пороге регистрирует-
579 ся высокочастотный шум электроники, что приводит к формированию
580 огромного потока выходных сообщений, которые не могут быть переданы
581 из-за ограниченной пропускной способности выходного тракта системы
582 считывания.

583 Предусмотрена возможность допускать одиночные передние фронты
584 в качестве хитов, однако практика показала, что в этом нет смысла,
585 т.к. в нормальном режиме найденные пары в основном обусловлены
586 ошибками ВПЦ и доля таких сообщений пренебрежимо мала — менее
587 $2 \cdot 10^{-4}$.

588 4.5 Построение события

589 В силу того, что электроника бестриггерная и приём данных осуществ-
590 ляется порциями, называемыми DAQ-событиями, никак не связанными с
591 реальными событиями, для формирования корректной входной инфор-
592 мации для реконструкции и дальнейшего анализа данных необходимо
593 выполнять процедуру построения события.

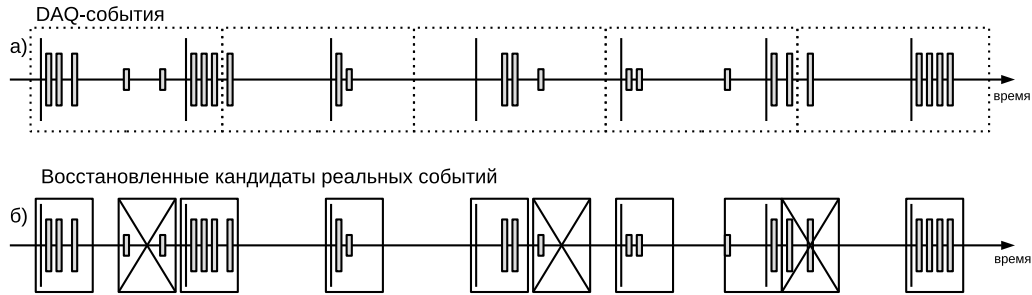


Рис. 14: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные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

594 Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 14, в
595 течение которого поступают:

- 596 • Триггерные сигналы — импульсы с генератора, питающего лазер,
597 либо сигналы с детекторов пучка;
- 598 • Сигналы, скоррелированные с импульсами с генератора или детек-
599 торами пучка, т.е. связанные со светом;
- 600 • Шумовые сигналы, распределённые равномерно во времени.

601 Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-
602 событий, следовательно, необходимо при построении реальных событий
603 смотреть на несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей элект-
604 троники не гарантируется, что входная информация поступает упоря-
605 доченной во времени. Поэтому периодически случается, что хиты ре-
606 ального события, пришедшего по большей части в i -м DAQ-событии,
607 обнаруживаются в $i + 1$, реже $i + 2$, и даже $i + 3$ и последующих DAQ-
608 событиях. Следовательно, требуется сначала распознать кластеры хитов
609 в достаточно широком интервале времени — потенциальные события, а
610 затем по наличию заданного типа триггера выбрать реальные события,
611 содержащие либо черенковские кольца, либо вспышки лазера.

612 Реализован данный алгоритм с помощью буфера хитов. По мере рас-
613 паковки входных сообщений, построенные хиты заносятся в буфер. На
614 каждой итерации осуществляется распознавание кандидатов событий в
615 буфере и определяется их количество N . Когда N достигает заданного

616 минимального уровня, на каждой итерации, помимо приёма одного вход-
 617 ного DAQ-события, осуществляется выброс выходного кандидата реаль-
 618 ного события. Так как одно DAQ-событие может содержать несколько
 619 кандидатов, буфер будет расти. Для того, чтобы избежать переполне-
 620 ния, устанавливается верхний предел. Когда N достигает этого предела,
 621 осуществляется сброс событий на выход по принципу FIFO до заданного
 622 минимального уровня. На рис. 15 приведён отрывок диаграммы напол-
 623 ненности буфера по мере обработки входного потока. В данном примере
 624 были установлены следующие параметры: минимальное кол-во событий
 625 в буфере 200, максимальное — 500. Отметим, что кол-во событий в бу-
 626 фере может превышать заданное максимальное значение, если в одном
 627 DAQ-событии содержится более одного реального события. По оконча-
 628 нии входного потока содержимое буфера обрабатывается полностью и
 629 все распознанные события подаются на выход.

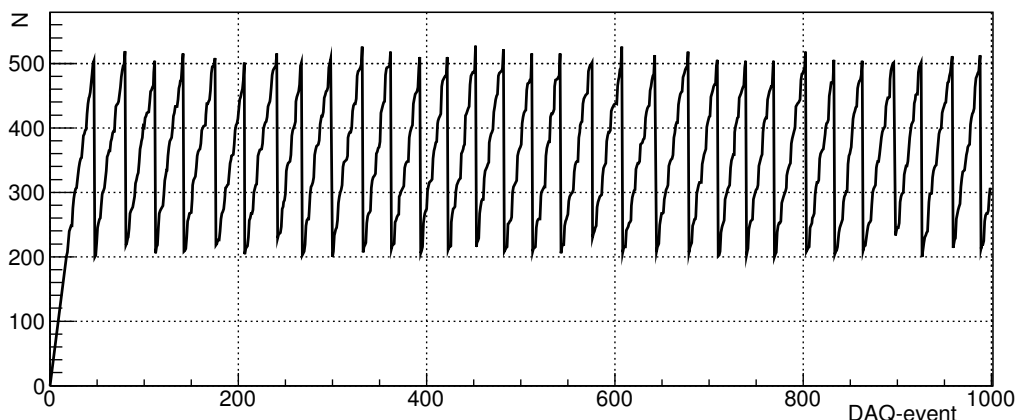


Рис. 15: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зави-
 симости от номера обработанного входного DAQ-события.

630 4.6 Реконструкция

631 Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости
 632 реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит
 633 как загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, по-
 634 сле фокусировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствитель-
 635 ной камеры, которая в общем случае может состоять из нескольких
 636 плоскостей. Первый этап реконструкции — перевод хитов из плоско-
 637 стей камеры в плоскость реконструкции. Затем выполняется поиск ко-
 638 лец по хитам. В CbmRoot есть реализации нескольких алгоритмов по-

иска колец. Наибольший практический интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского излучения, основанный на проеоб-разовании Хафа, описанный в работах [46, 47]. Реализация данного алгоритма была специально адаптирована для данных пучковых тестов, в которых ожидается одно кольцо на событие. Данный алгоритм реализован в классе *CbmRichProtRingFinderHoughImpl*, унаследованном от *CbmRichProtRingFinderHough* и далее от *CbmRichRingFinder*. После этого определяются параметры кольца и далее реконструкция с применением информации с других детекторов.

5 Результаты

5.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB

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

5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration)

Пример таблицы калибровки точного времени, полученной на данных лабораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 16. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах. Вид графика не зависит от того, по каким данным он был построен, так как он определяется архитектурой время-цифрового преобразователя. Обратим внимание, что в показанном примере в диапазоне значений десятибитного счетчика точного времени интервалу равному периоду грубого счетчика, т.е. 5 нс, соответствуют отсчеты от 30 до 520. Точные границы интервала определяются значениями задержек на элементах цифровой линии задержки. Эти величины индивидуальны и зависят от флуктуаций технологического процесса.

673 С целью понимания особенностей работы счётчиков точного времени,
674 каждая таблица калибровки точного времени была аппроксимирована
675 кусочно-линейной функцией. На рис. 17 показан пример разности значе-
676 ний функции калибровки точного времени и линейной функции. Видно,
677 что отклонения не превышают 60 пс.

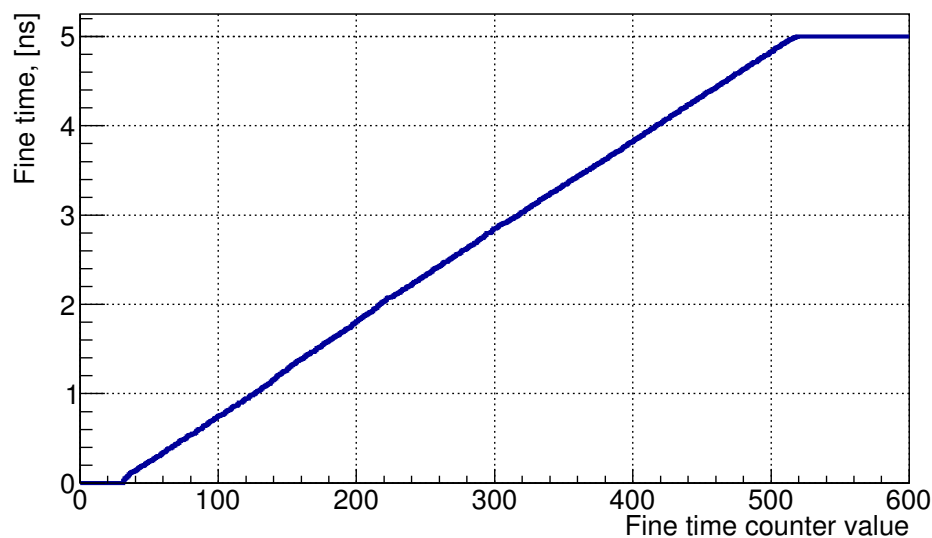


Рис. 16: Пример калибровочной кривой.

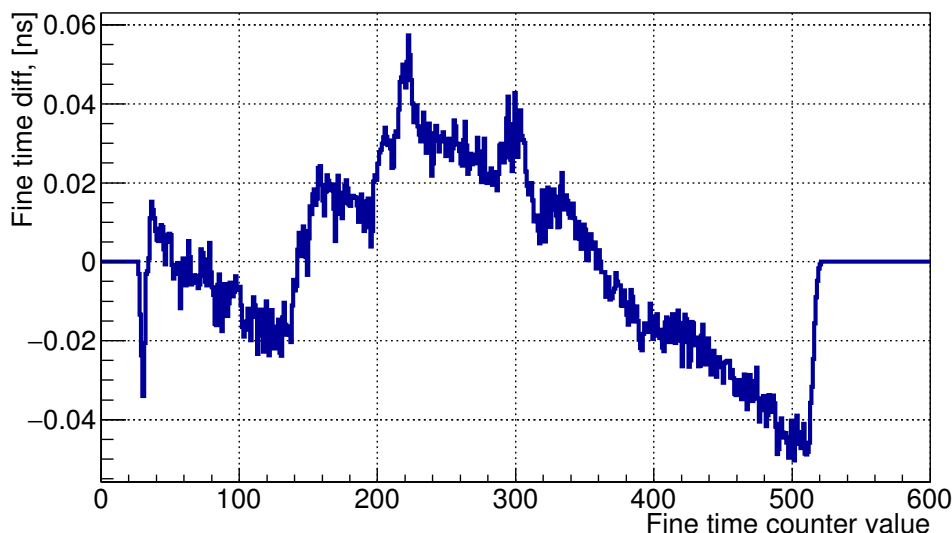


Рис. 17: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

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

701 ВЦП составляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разре-
 702 шению 21 пс. Использование индивидуальной линейной функции приво-
 703 дит к увеличению ширины до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наи-
 704 более неблагоприятных каналах. Отметим, что применение усредненной
 705 калибровки устраняет двухпиковую форму, характерную для распреде-
 706 ления без калибровки, но в некоторых случаях приводит при этом к
 707 увеличению ширины.

708 Таким образом, при невозможности выполнить калибровку точного
 709 времени, например, из-за недостаточного массива данных, предоставлен-
 710 ных для анализа, в условиях нашей задачи, когда характерное временное
 711 разрешение составляет несколько сотен пикосекунд, возможно применение
 712 усредненной линейной функции без заметного снижения точности.

713 Использование усреднённой калибровки может быть особенно полез-
 714 но при измерении разности временных отметок, полученных ВЦП раз-
 715 личного типа, поскольку тогда, в отличие от нашего случая, не происхо-
 716 дит сокращения начального сдвига кусочно-линейной функции относи-
 717 тельно нуля регистра точного времени.

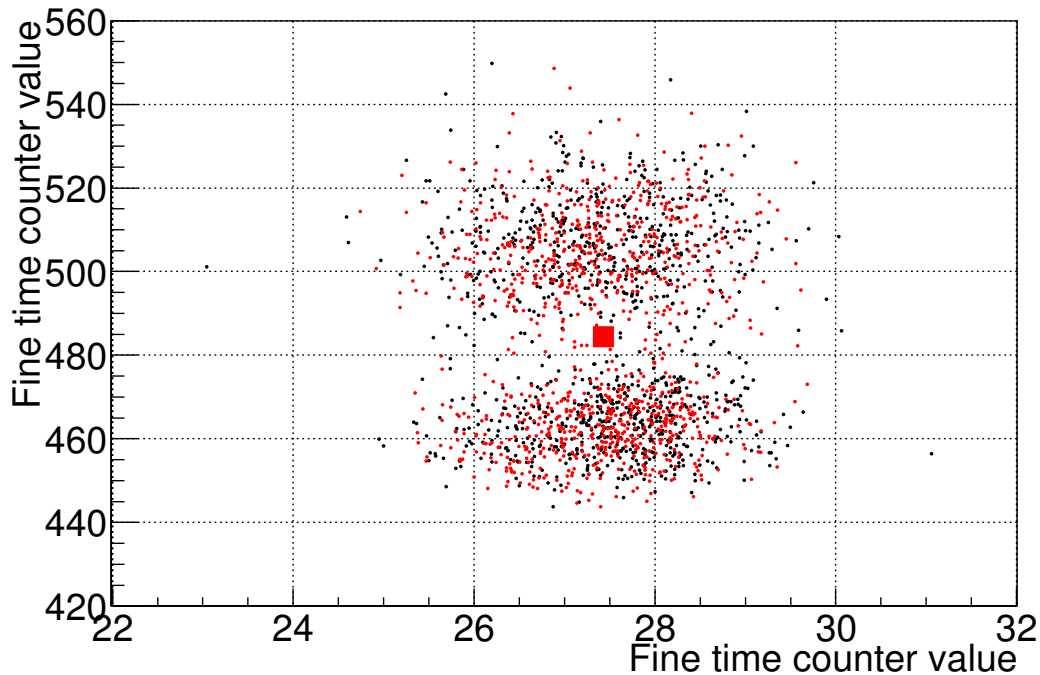


Рис. 18: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для глобальной псевдокалибровки.

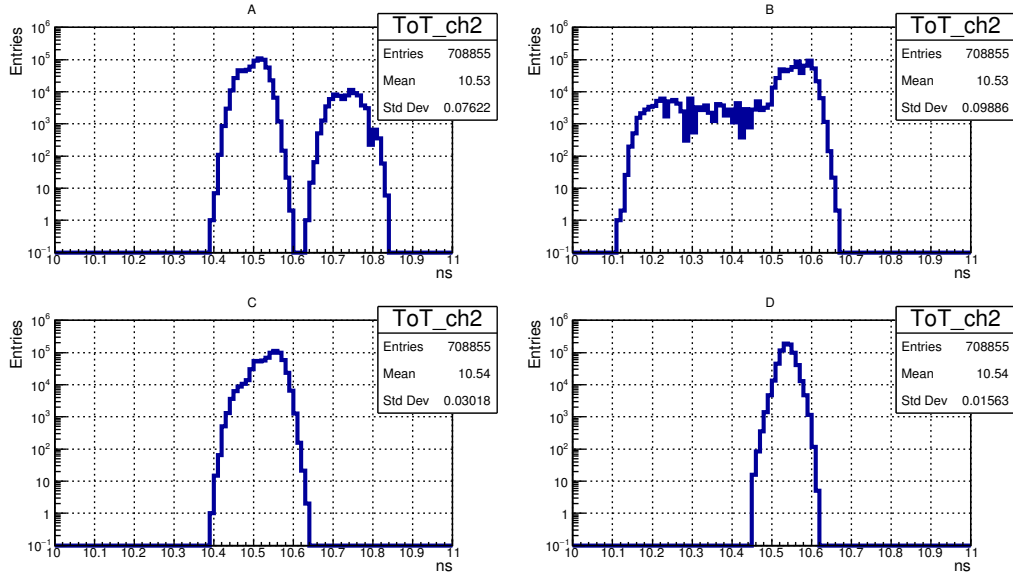


Рис. 19: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (А) без калибровки точного времени; (В) с применением усреднённой калибровочной функции; (С) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (D) с применением полноценной калибровочной функции.

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

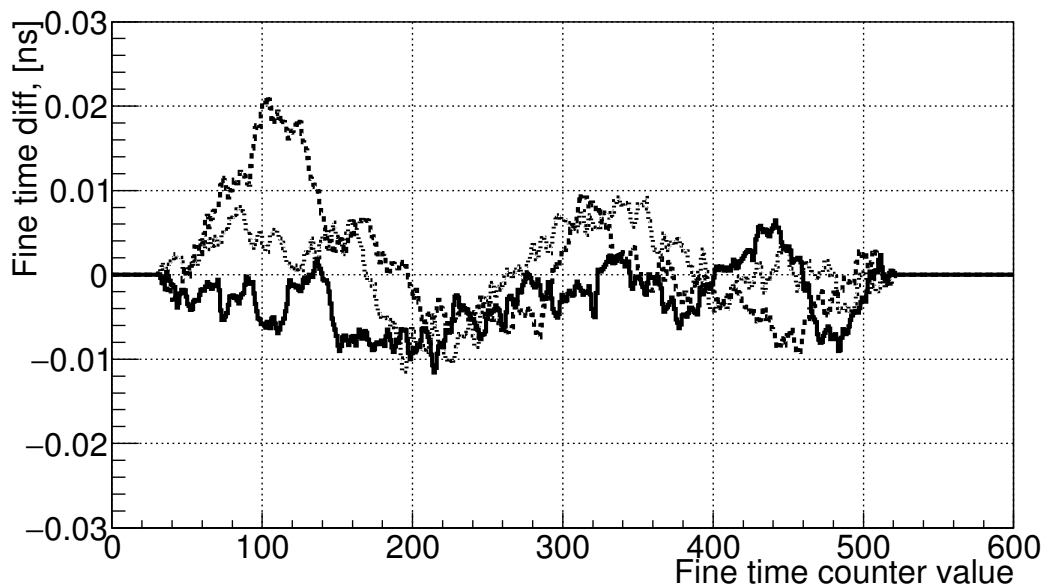


Рис. 20: Стабильность калибровок.

730 5.3 Определение коррекций задержек между кана- 731 лами

732 Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов,
733 соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрирован-
734 ных в заданной паре каналов, показана на рис. 21. Такие гистограммы
735 позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести коррек-
736 цию задержки. Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 нс значе-
737 ний задержек, полученных таким образом, что даёт заметный вклад во
738 временное разрешение системы считывания (см. секцию 5.4).

739 Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в i -м ка-
740 нале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже
741 400 пс как сумма задержки в j -м канале относительно опорного и задерж-
742 ки в i -м канала относительно j -го. Для некоторых пар каналов вид ги-
743 стограммы отличается от показанной на рис. 21. См., например, рис. 22.
744 Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов
745 является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала
746 подмешивается возбужденный или наведённый колебательный сигнал.
747 Такая гипотеза подтверждается тем фактом, что форма гистограммы
748 зависит от порога дискриминатора на плате PADIWA. При построении
749 аналогичной гистограммы для пары дефектных каналов наблюдается до
750 5 пиков. Дальнейшее исследование проводилось с исключением дефект-

751 ных каналов. Доля дефектных каналов составляет около 10% от полного
 752 числа каналов. При разработке следующей версии передней электроники
 753 для CBM RICH особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте
 754 каналов, а гистограммы, подобные обсуждаемым в данном разделе,
 755 будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

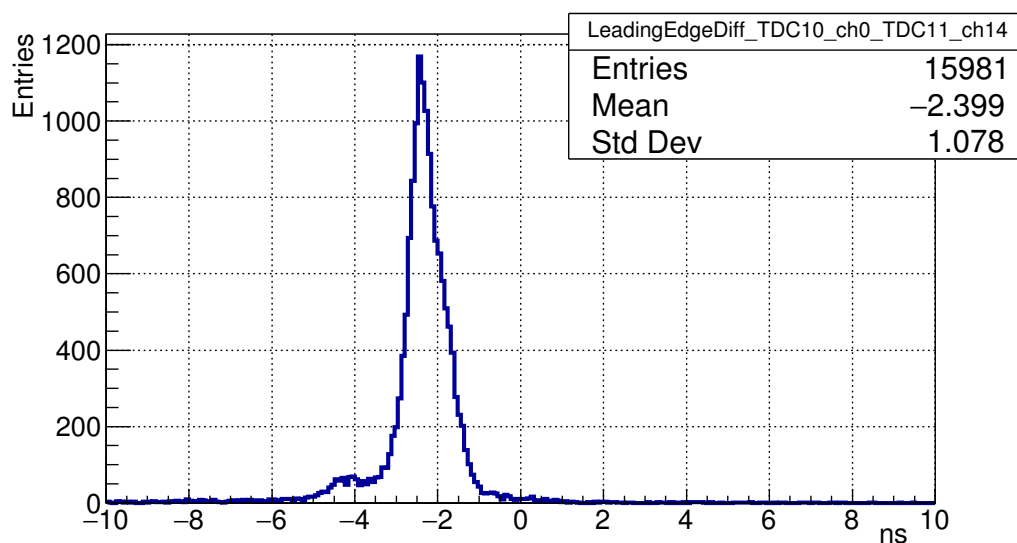


Рис. 21: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

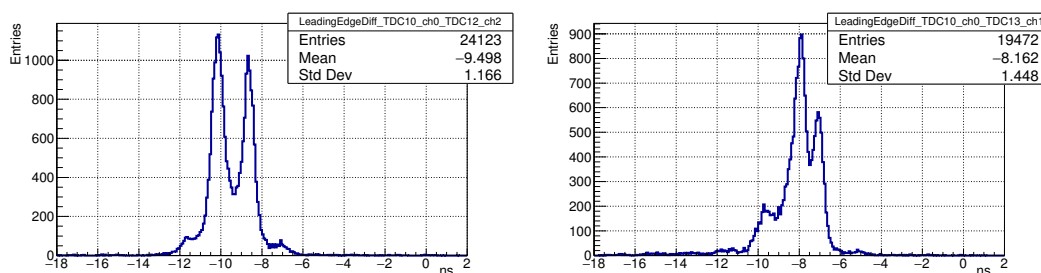


Рис. 22: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

756 5.4 Временное разрешение

757 В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в ко-
758 торых регистрируются несколько практически одновременно испущен-
759 ных фотонов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой
760 ≈ 40 пс, т.е. на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала
761 через МА ФЭУ. Второй тип — черенковские кольца. Разброс време-
762 ни прихода фотонов на МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и
763 70 пс для вспышек лазера, что определяется в первую очередь наклоном
764 плоскости в которой расположены фотокатоды. Анализ таких событий
765 позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы счи-
766 тывания, начиная от окна МА ФЭУ и кончая формированием отметок
767 времени. Временное разрешение одного канала определяется разбросом
768 зарегистрированных временных отметок относительно времени прилёта
769 фотона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилёта
770 фотона измерить нельзя, нам приходится исследовать разброс разностей
771 временных отметок в паре каналов при регистрации одновременно при-
772 шедших фотонов. Временные отметки в каждом из каналов подвержены
773 независимым флуктуациям по одинаковому закону, следовательно, из-
774 меренная ширина распределения будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем временное
775 разрешение каждого канала. После применения коррекций задержек и
776 калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых не яв-
777 ляется дефектным, получается распределение аналогичное показанному
778 на рис. 21, отличающееся лишь тем, что положение центра находится в
779 нуле.

780 Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения состав-
781 ляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное
782 значение превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ
783 примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравни-
784 мыми вкладками: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции
785 момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для
786 реализации такой коррекции необходимо надёжное измерение времени
787 над порогом, что в нашем случае невозможно, см. секцию 5.6.

788 Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в
789 целом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновре-
790 менные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать
791 каналов, считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принад-
792 лежащих одному МА ФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырём
793 соседним МА ФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и ка-
794 либровки точного времени, отбирались все хиты, принадлежащие одному
795 событию, и гистограммировались разности временных отметок по всем

796 возможным парам каналов. Результаты для вспышек лазера показаны
 797 на рис. 23. В таблице 2 показано, как эволюционирует среднеквадратич-
 798 ное отклонение и FWHM в зависимости от числа каналов. Отметим, что
 799 для событий от лазера среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а
 800 FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно с тем, что
 801 распределение последовательно принимает форму, более близкую к рас-
 802 пределению Гаусса. Такое поведение можно интерпретировать как раз-
 803 мывание индивидуальных особенностей каналов в процессе усреднения.
 804 Для хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу (см. рис. 24),
 805 и FWHM и RMS возрастают с увеличением числа каналов. Вероятно,
 806 отличия связаны с тем, что распределения фотонов во времени для че-
 807 ренковского кольца и вспышки лазера отличаются друг от друга.

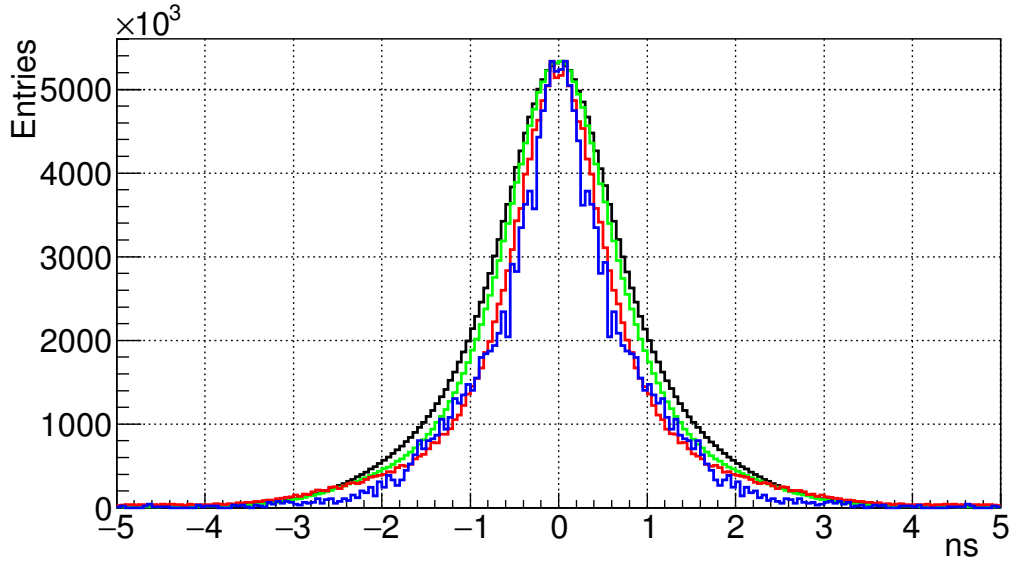


Рис. 23: Распределения для четырёх различных наборов каналов для
 событий от лазера.

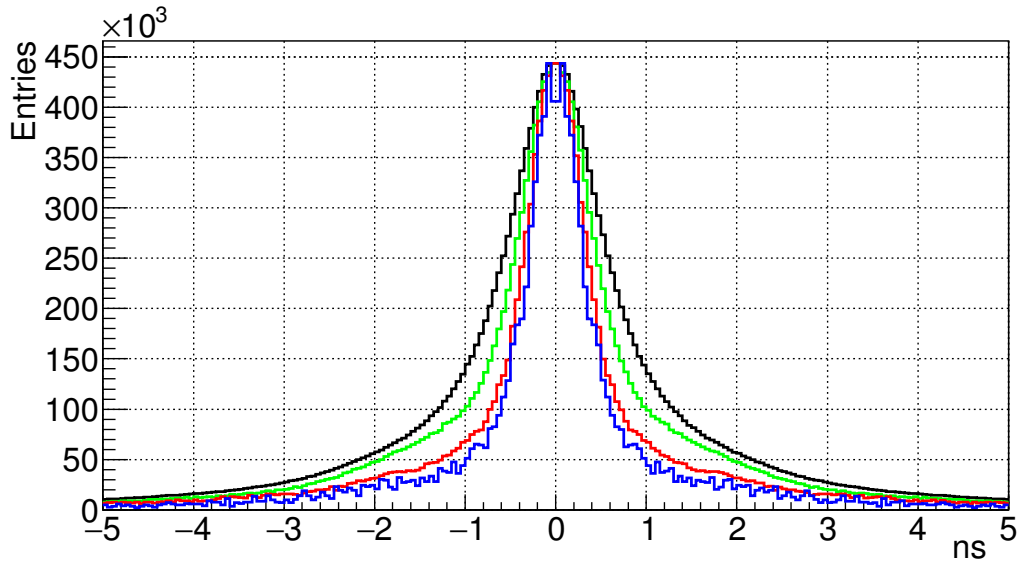


Рис. 24: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от черенковских колец.

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

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

5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра

Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя спектра. Анализу подлежит распределение разностей временных отметок хитов каждого кольца относительно первого по времени хита в данном кольце. В зависимости от длины волны черенковский фотон может с той или иной вероятностью либо поглотиться сместителем спектра и вызвать его свечение, либо пройти сквозь слой сместителя спектра без

817 взаимодействия и попасть фотокатод. В результате, даже при наличии
818 слоя сместителя спектра, часть хитов подчиняется временной зависимо-
819 сти характерной для чистого ФЭУ. Таким образом, для получения кри-
820 вой высвечивания сместителя спектра необходимо из распределения раз-
821 ностей времен, полученного со сместителем спектра, вычесть должным
822 образом отнормированное в максимуме распределение разностей времён,
823 полученное с чистым ФЭУ.

824 Нормированные в максимуме кривые высвечивания со сместителем
825 спектра и без него показаны на рис. 25, а разность этих распределений —
826 на рис. 26. Видно, что за исключением небольшой выпуклости в области
827 7 нс, связанной с особенностями работы данного семейства МА ФЭУ,
828 кривая выглядит похоже на сумму нескольких экспонент.

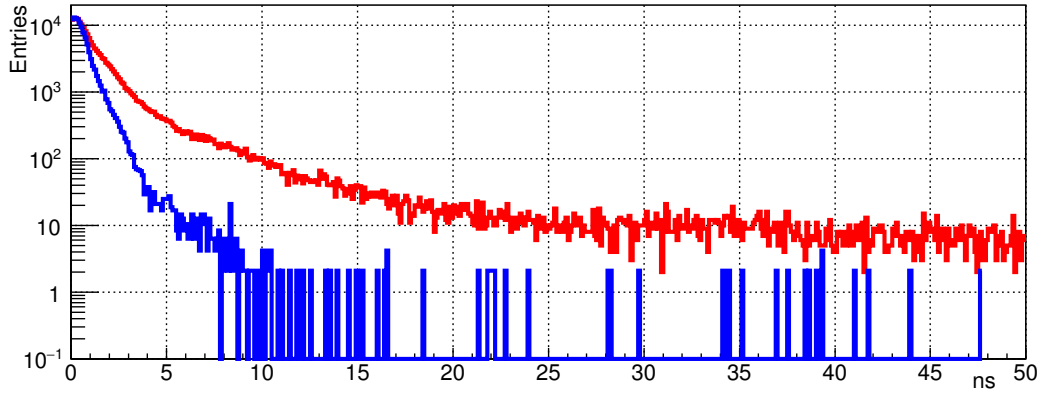


Рис. 25: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечи-
вания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

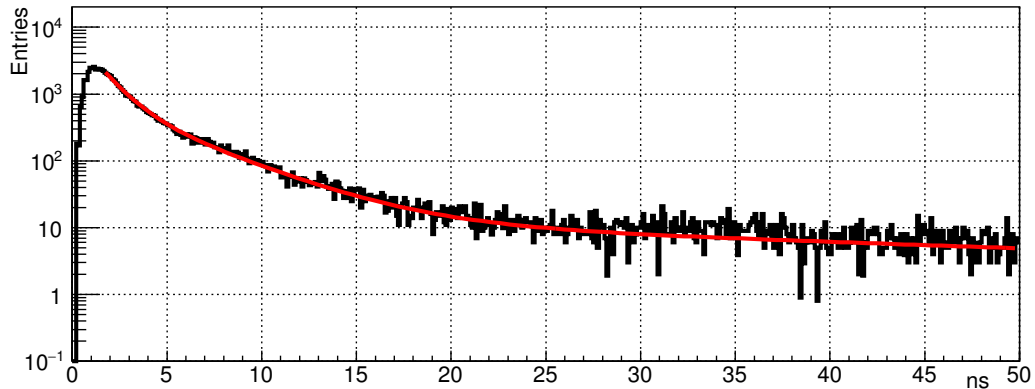


Рис. 26: Разница распределений со сместителем спектра и без него и
кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

829 Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные
830 времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную
831 кривую с результатами флюориметрических исследований. Стеклянная
832 пластина со слоем сместителя спектра, нанесённым точно таким же мето-
833 дом, как и на МА ФЭУ, была исследована с помощью классического ме-
834 тода счёта фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Бы-
835 ли получены ([49]) значения времён высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и
836 соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000,
837 и 0.8364.

838 Подгонка кривой с рис. 26 суммой трех экспонент с соответствую-
839 щими временами показывает разумное согласие для времен превышаю-
840 щих 5 нс. Начальный участок лучше подгоняется с характерным време-
841 нем $\tau_1=1.1$ нс. Сравнение интенсивностей наиболее быстрой компонен-
842 ты с флюориметрическими измерениями затруднено из-за начального
843 неэкспоненциального участка, а относительный вклад наиболее медлен-
844 ной компоненты в полную интенсивность в нашем случае оказывается в
845 3.8 раз ниже. Это можно объяснить влиянием способа возбуждения на
846 заселение разных типов центров высвечивания.

847 В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами ме-
848 тод переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем
849 счёта единичных фотонов [50]. Однако в нашем случае существует неко-
850 торая случайная задержка между моментом попадания черенковского
851 фотона на поверхность МА ФЭУ и временем прихода первого хита. С
852 целью выявления влияния метода на измеренные времена высвечивания
853 было проведено Монте Карло моделирование.

854 В модели были заложены разброс времени прохода лавины в МА ФЭУ
855 300 пс (RMS), три экспоненциальные компоненты с характерными вре-
856 менами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17,
857 1.00, 0.22 и средним числом хитов в кольце равным 18. Получившееся
858 распределение времён относительно первого хита в кольце было по-
859 догнано тремя экспонентами со свободными параметрами. Если начать
860 фитирование получившейся зависимости, отступив 4 нс от начала вы-
861 свечивания, величины постоянных распада экспонент воспроизводятся с
862 точностью лучше 5%, а соответствующие относительные интенсивности
863 несколько искажаются, что естественно, в силу существования началь-
864 ного неэкспоненциального участка кривой. Таким образом, подтверждена
865 корректность применённого метода определения времён высвечивания.

866 Практическая ценность проведенного исследования состоит в том,
867 что может быть оптимизирована длительность окна, в пределах которо-
868 го хиты принимаются одновременными и могут быть приписаны одному
869 событию. Для этого необходимо найти баланс между числом дополни-

870 тельных хитов, полученных благодаря сместителю спектра и вероятно-
871 стью наложения сигналов друг на друга или подхвата в кольцо темно-
872 вого хита. Например, прирост хитов в 19% может быть достигнут при
873 длительности окна 15 нс.

874 5.6 Время над порогом

875 Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найден-
876 ного хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об
877 амплитуде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбо-
878 ра данных CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения
879 временного разрешения путём коррекции времени пересечения порога с
880 учетом амплитуды (walk correction), а также для повышения качества
881 отделения однофотоэлектронного сигнала от шума. На рис. 28 показано
882 типичное распределение ToT, измеренное с помощью лазера в лаборатор-
883 ных условиях. Вопреки ожиданиям, это распределение имеет несколько
884 пиков. Такая структура, согласно [51], может быть объяснена наличи-
885 ем периодической наводки как на входе дискриминатора, так и между
886 выходом дискриминатора и входом ВЦП. На рис. 27 показан экран циф-
887 рового осциллографа в режиме накопления сигналов, полученных путем
888 подключения активного зонда к выходу PADIWA. Видно, что сгущение
889 сигналов соответствует наблюдаемым пикам в распределении ToT; имеет
890 место проблема недостаточности амплитуды одноэлектронного сигнала
891 для устойчивой генерации логической единицы; имеется периодическая
892 наводка на выходе дискриминатора, но ее недостаточно для объясне-
893 ния наблюдаемой картины; преобладание определенных длительностей
894 логических сигналов позволяет предположить наличие периодической
895 структуры во входном сигнале. Все это говорит о необходимости под-
896 стройки аналоговой части для формирования на входе PADIWA более
897 чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между дис-
898 криминатором и ВЦП от наводок. Подобные изменения будут, с учетом
899 результатов данной работы, реализованы в следующем прототипе платы
900 передней электроники, называемом DIRICH [29].

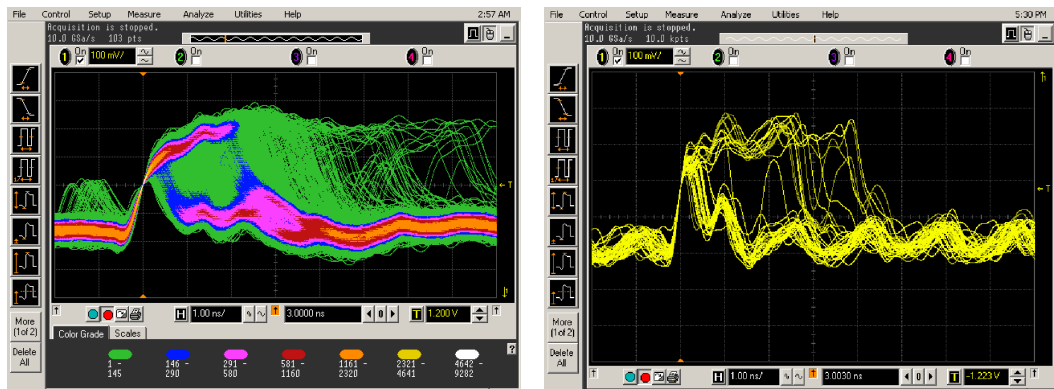


Рис. 27: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту.

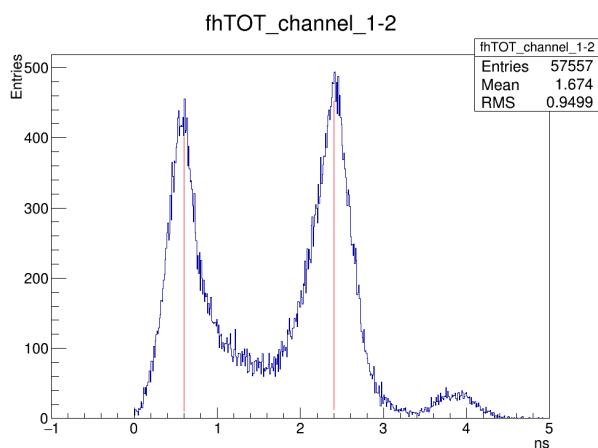


Рис. 28: Типичное распределение ToT.

901 Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в слу-
 902 чае CBM RICH, и продемонстрированные в данной работе параметры
 903 достаточны для уверенного поиска колец. Тем не менее, улучшение раз-
 904 деления сигналов и шумов и повышение эффективности регистрации по-
 905 может создать необходимый запас надежности для долговременной ра-
 906 боты детектора в условиях постепенной деградации оптических свойств
 907 радиатора, зеркал и фотодетекторов.

5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в секции 1, у МА ФЭУ Н12700 имеются особенности, которые могут оказать влияние на эффективность регистрации единичных фотоэлектронов и вероятность возникновения ложных хитов. Для прояснения этих особенностей были выполнены измерения амплитудных распределений с помощью многоканальной платы на основе микросхемы n-XYTER, см. описание лабораторного стенда в секции 3.2. Далее, результаты амплитудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью платы PADIWA.

Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали наличие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелированных с источником света. Также были выполнены специальные измерения с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см. пикселя. Эти измерения позволили установить, что событие с малой амплитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале, находящемся в том же ряду диодной системы, был зарегистрирован фотоэлектрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выглядит как на рис. 29.

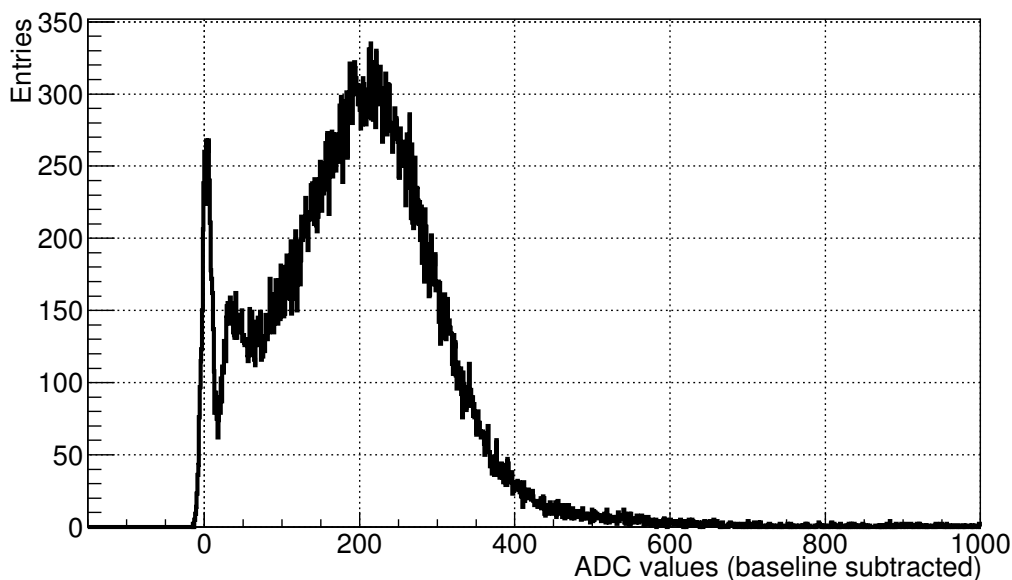


Рис. 29: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ Н12700.

928 Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, рас-
929 положенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный
930 сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одно-
931 электронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в сек-
932 ции 1 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется
933 от оптимального пути от динода к диноду. Отметим, что в большинстве
934 каналов уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения
935 низкоамплитудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного
936 сигнала. Таким образом, попытка получить максимальную эффектив-
937 ность регистрации за счет снижения порога приводит к возрастанию па-
938 разитных хитов, локализованных не в тех пикселях, где родился фото-
939 электрон. Для снижения числа паразитных хитов мы ставили порог ре-
940 гистрации в ложбине между низко- и высоко-амплитудными частями од-
941 ноэлектронного спектра. Поскольку формы одноэлектронных спектров
942 во всех каналах подобны, анализ формы спектра на рис. 29 позволяет
943 заключить, что выбранный нами порог приводит к потере 12 % одно-
944 электронных импульсов.

945 Одно из отличий канала считывания в плате RADIWA — это зна-
946 чительно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-
947 XYTER осуществляется формирование со временем интегрирования 190 нс,
948 то в RADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что
949 соответствует характерному времени нарастания сигнала несколько на-
950 носекунд. Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов
951 и наводок при регистрации сигналов с помощью RADIWA.

952 Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с
953 помощью канала на основе плат RADIWA и TRB v3 может быть получе-
954 на в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях,
955 построенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут
956 быть получены из анализа потока данных, набранных при различных зна-
957 чениях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, ре-
958 ализованного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 2.1, позво-
959 ляет получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но
960 позволяет достичь максимальных частот, достаточных для локализации
961 базовой линии. На рис. 30 показана зависимость частоты триггеров от
962 порога регистрации. Плечо слева соответствует одноэлектронному спек-
963 тру, более подробно исследованному ниже, а быстровозрастающие грани-
964 цы вокруг вертикальной штриховой линии ограничивают локализацию
965 базовой линии. Точность локализации базовой линии мы оцениваем как
966 ± 200 отсчетов по шкале, использованной на рис. 30 и рис. 31B,D.

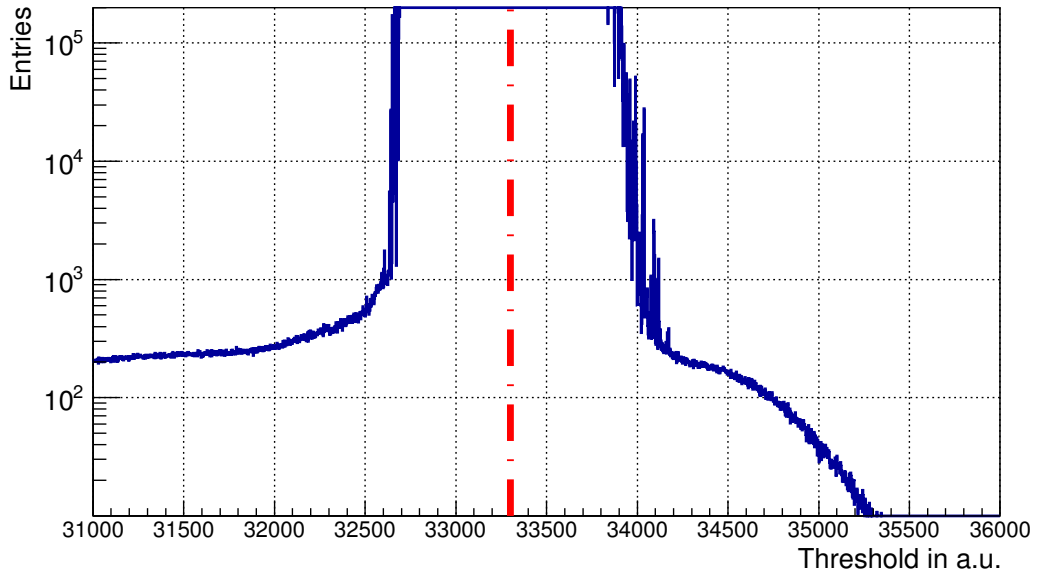


Рис. 30: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

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. 31. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 31C. Соответственно, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, показанным на рис. 31A. Сплошная линия на рис. 31B получена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 31D и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени. Отметим, что мы оцениваем равенство световых потоков как $\pm 5\%$. Видно, что скорости счёта в области ложбины и максимума одноэлектронного спектра приблизительно совпадают. Амплитуды, соответствующие максимуму и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом, в случае PADIWA наблюдается, с одной стороны более явно выраженная ложбина, а с другой — избыток счёта в малых амплитудах, что предполагает больший относительный вклад наводок и, следовательно, невозможность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра и нецелесооб-

989 разность повышения эффективности за счёт установления порога ниже
990 ложбины.

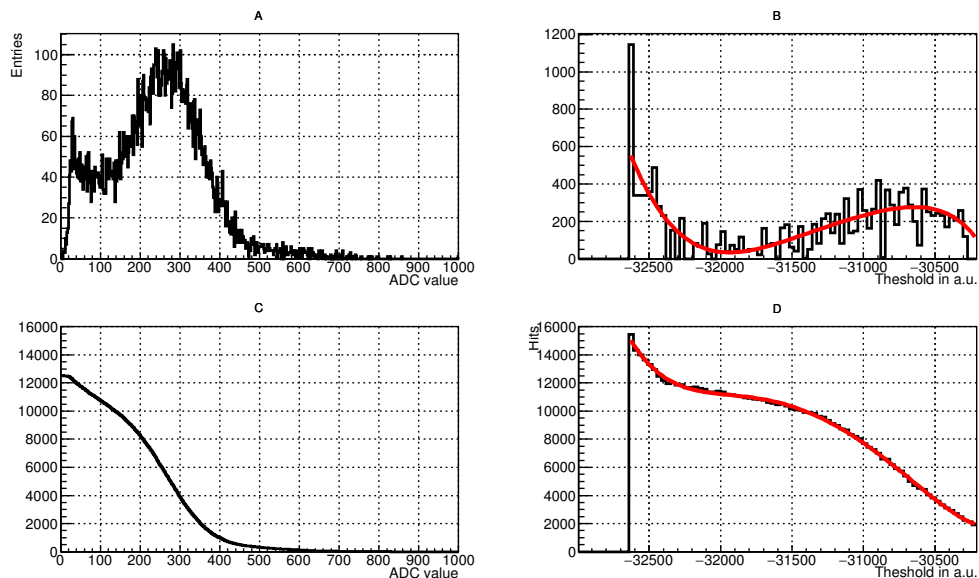


Рис. 31: Сравнение (А) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (В) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRB v3; сравнение (С) интеграла одноэлектронного спектра и (D) зависимости скорости счёта от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

991 Заключение

992 Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных
993 детектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный
994 модуль, состоящий из МА ФЭУ Н12700, четырёх плат предусилителей-
995 дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функции
996 ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы
997 прототипа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют времен-
998 ное разрешение 21 пс (FWHM) при использовании калибровки точного
999 времени. Применение поканальной кусочно-линейной псевдо-калибровки
1000 ухудшает временное разрешение до 50 пс (FWHM), а единой для всех ка-
1001 налов усреднённой псевдо-калибровки приводит к значению временного
1002 разрешения 64 пс (FWHM) в наиболее неблагоприятных случаях. Об-
1003 суждена процедура калибровки задержек между каналами а также ста-
1004 бильность полученных задержек. Дрейф задержек не превышает 0.5 нс

1005 за все время измерений. Рассмотрена возможность использования спек-
 1006 тров “времени над порогом” (ToT) для отбора корректных хитов и кор-
 1007 рекции временной привязки. Выявлено, что спектр ToT имеет многопи-
 1008 ковую структуру по причине периодических наводок. Это препятствует
 1009 использованию этого параметра в анализе. Выявленные схемотехниче-
 1010 ские недостатки будут устранены в следующей версии плат считыва-
 1011 ющей электроники. Исследованы временные свойства сместителя спек-
 1012 тра и его влияние на эффективность регистрации черенковских колец.
 1013 Наиболее интенсивная быстрая компонента характеризуется временем
 1014 высвечивания 1.1 нс, но имеются также компоненты с характерными
 1015 временами 3.8 нс и 45 нс. Проведено сравнение медленного аналогово-
 1016 го и быстрого временного считывания МА ФЭУ. Выявлено проявление
 1017 особенностей одноэлектронного спектра в том, как эффективность реги-
 1018 страции фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов зави-
 1019 сят от порога дискриминатора. Исследовано временное разрешение все-
 1020 го канала считывания для различных по величине множеств каналов:
 1021 от одной пары до 256 штук. Наихудшее из полученных значений состав-
 1022 ляет 1.2 нс, что определяется в первую очередь отсутствием коррекции
 1023 временной отметки в зависимости от амплитуды сигнала и дрейфом за-
 1024 держек между каналами. Полученные результаты достаточны для ис-
 1025 пользования исследованной схемы считывания и сбора данных в экс-
 1026 перименте CBM, однако устранение выявленных недостатков позволит
 1027 создать запас по эффективности и повысить надежность системы при
 1028 долговременной эксплуатации.

1029 Список литературы

- 1030 [1] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6,
 1031 2006.
- 1032 [2] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and*
 1033 *P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in
 1034 laboratory experiments, Lect. Notes Phys. **814** (2011) pp. 980.
- 1035 [3] *P. Senger and V. Friese* // The CBM Collaboration: Nuclear Matter
 1036 Physics at SIS-100, GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- 1037 [4] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report.
 1038 GSI, Darmstadt (2005) 406 p.
- 1039 [5] *V. Friese and C. Sturm* // CBM Progress Report 2014, ISBN: 978-3-
 1040 9815227-2-3, 2015.

- 1041 [6] *A. Malakhov and A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM
1042 Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- 1043 [7] *M. Koziel* // MVD Status: Integration, 25th CBM Collaboration
1044 Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015. [https://indico.gsi.
1045 de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&
1046 materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960)
- 1047 [8] *J. Heuser et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon
1048 Tracking System (STS), GSI, Darmstadt (2013) 167 p.
- 1049 [9] *C. Höhne et al.* // Technical Design Report for the CBM Ring Image
1050 Cherenkov (RICH), GSI, Darmstadt (2013) 201 p.
- 1051 [10] *S. Chattopadhyay et al.* // Technical Design Report for the CBM Muon
1052 Chambers (MuCh), GSI, Darmstadt (2014) 192 p.
- 1053 [11] *S. Biswas et al.* // Development of a GEM based detector for the CBM
1054 Muon Chamber (MUCH), 2013 JINST 8 C12002.
- 1055 [12] *M. Petris et al.* // TRD detector development for the CBM experiment,
1056 NIM A, Volume 732, 21 December 2013, Pages 375–379.
- 1057 [13] *N. Herrmann et al.* // Technical Design Report for the CBM Time-of-
1058 Flight System (TOF), GSI, Darmstadt (2014) 182 p.
- 1059 [14] *I. Korolko* // CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status), 25th CBM
1060 Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.
1061 [https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&
1062 sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960)
- 1063 [15] *F. Guber et al.* // Technical Design Report for the CBM Projectile
1064 spectator detector (PSD), GSI, Darmstadt (2014) 78 p.
- 1065 [16] Hamamatsu H12700 manual, [https://www.hamamatsu.com/
1066 resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf)
- 1067 [17] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and
1068 R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes, 2015 JINST 10 P09021.
- 1069 [18] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03
1070 multi-anode photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade, LHCb-
1071 INT-2015-006.

- 1072 [19] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf)
1073 [TPMH1327E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf)
- 1074 [20] T. Mahmoud RICH2016 proceedings.
- 1075 [21] *C. Pauly et al.* // The CBM RICH project, NIM A 2016, doi:
1076 10.1016/j.nima.2016.05.102.
- 1077 [22] *S. Reinecke et al.* // The CBM-RICH detector, JINST 11 (2016) no.05,
1078 C05016.
- 1079 [23] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal.
- 1080 [24] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>
- 1081 [25] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, and M. Traxler* // A novel
1082 approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS)
1083 TDC in an FPGA, 2016 JINST 11 C01046.
- 1084 [26] TRB v3 documentation, [http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
1085 [de/docu/trb3docu.pdf](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)
- 1086 [27] *W. M. Zabołotny and G. Kasprowicz* // Data processing boards
1087 design for CBM experiment, Proc. SPIE 9290, Photonics
1088 Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-
1089 Energy Physics Experiments 2014, 929023 (November 25, 2014);
1090 doi:10.1117/12.2073377;
- 1091 [28] *J de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM
1092 Experiment at FAIR, 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006.
- 1093 [29] *J. Michel, M. Faul, J. Friese, C. Höhne, K.-H. Kampert, V. Patel,*
1094 *C. Pauly, D. Pfeifer, P. Skott, M. Traxler, and C. Ugur* // Electronics
1095 for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, 2017
1096 JINST 12 C01072.
- 1097 [30] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Data acquisition and online monitoring
1098 software for CBM test beams, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001.
- 1099 [31] *C. Bergmann et al.* // Common CBM beam test of the RICH, TRD and
1100 TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014, CBM Progress
1101 Report 2014, p.9.
- 1102 [32] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector
1103 and radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress
1104 Report 2014, p.78.

- 1105 [33] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the
 1106 basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real
 1107 conditions, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.
- 1108 [34] Information about the T9 beam line and experimental facilities,
 1109 [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)
 1110 [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)
 1111 [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)
- 1112 [35] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS
 1113 SYSTEM.
- 1114 [36] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror
 1115 displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector,
 1116 doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- 1117 [37] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment
 1118 control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- 1119 [38] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
 1120 [datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
- 1121 [39] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on
 1122 multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21
 1123 May 2015, Pages 43–50.
- 1124 [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)
 1125 [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)
 1126 [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)
- 1127 [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- 1128 [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- 1129 [43] FLESnet development repository, [https://github.com/cbm-fles/](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
 1130 [flesnet](https://github.com/cbm-fles/flesnet)
- 1131 [44] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, and C. Ugur* //
 1132 HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41,
 1133 GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- 1134 [45] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of
 1135 the integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE
 1136 Transactions on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April
 1137 1997.

- 1138 [46] *C.A. Лебедев, Г.А. Ососков* // Быстрые алгоритмы распознавания
1139 колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента
1140 CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- 1141 [47] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring
1142 Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment
1143 at FAIR, ACAT2010 proceedings.
- 1144 [48] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout
1145 and DAQ prototype, PEPAN letters.
- 1146 [49] M. Dürr, private communication.
- 1147 [50] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon
1148 Counting, Academic Press, London 1984.
- 1149 [51] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the
1150 presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.