

# Разработка системы считывания и приёма данных детектора RICH эксперимента CBM

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

<sup>a</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, D-64291  
Darmstadt, Germany

<sup>b</sup>Department of Physics, University Wuppertal, D-42097  
Wuppertal, Germany

<sup>c</sup>SSC RF Institute for Theoretical and Experimental Physics  
(ITEP), 117218 Moscow, Russia

<sup>d</sup>Institute of Physics II and Institute of Applied Physics, Justus  
Liebig University Giessen, D-35392 Giessen, Germany

<sup>e</sup>National Research Centre - Kurchatov Institute,  
B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, 188300  
Gatchina, Russia

<sup>f</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow  
Engineering Physics Institute), 115409 Moscow, Russia

<sup>g</sup>Institut für Kernphysik, Goethe University Frankfurt, D-60438  
Frankfurt am Main, Germany

<sup>h</sup>Laboratory of Information Technologies, Joint Institute for  
Nuclear Research (JINR-LIT), 141980 Dubna, Russia

<sup>i</sup>St. Petersburg State Polytechnic University (SPbSPU), 195251  
St. Petersburg, Russia

<sup>j</sup>Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow,  
Russia

13 февраля 2017 г.

## Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Фотоэлектронный умножитель</b>	<b>5</b>
<b>2 Архитектура системы сбора данных CBM RICH</b>	<b>7</b>
2.1 64-канальный модуль считывания . . . . .	7
2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ . . . . .	12
<b>3 Экспериментальные установки</b>	<b>13</b>
3.1 Экспериментальная установка на пучковых тестах . . . . .	13
3.2 Лабораторный стенд . . . . .	16
<b>4 Программное обеспечение</b>	<b>18</b>
4.1 Распаковка . . . . .	19
4.2 Калибровка точного времени . . . . .	19
4.3 Коррекция задержек между каналами . . . . .	19
4.4 Построение хита . . . . .	20
4.5 Построение события . . . . .	21
4.6 Реконструкция . . . . .	22
<b>5 Результаты</b>	<b>23</b>
5.1 Испытание системы сбора данных с использованием FLIB . .	23
5.2 Калибровка точного времени (Fine time calibration) . . . . .	23
5.3 Определение коррекций задержек между каналами . . . . .	27
5.4 Временное разрешение . . . . .	28
5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра . .	31
5.6 Время над порогом . . . . .	33
5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании . . . . .	34
<b>Заключение</b>	<b>37</b>
<b>Список литературы</b>	<b>38</b>

### Аннотация

Подробно охарактеризован 64-канальный модуль считывания и приём данных, состоящий из МА ФЭУ Н12700, 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 (полчаса). 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

17 влияние особенностей одноэлектронного спектра на эффективность  
18 регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хи-  
19 тов. Временное разрешение совокупности из 256 каналов составляет  
20 1.2 нс. Полученные результаты достаточны для использования иссле-  
21 дованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте CBM,  
22 однако устранение выявленных недостатков позволит создать запас  
23 по эффективности и повысить надежность системы при долговремен-  
24 ной эксплуатации.

## 25 Введение

26 В настоящее время на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility  
27 for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) [1] ведутся рабо-  
28 ты по созданию экспериментальной установки CBM (Compressed Baryonic  
29 Matter) [2, 3, 4, 5]. Физическая программа CBM нацелена на всестороннее  
30 изучение фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи и уравне-  
31 ния состояния вещества при экстремально высоких плотностях барионной  
32 материи, получаемых при столкновении релятивистских ядер в экспери-  
33 менте с фиксированной мишенью.

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

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

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

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

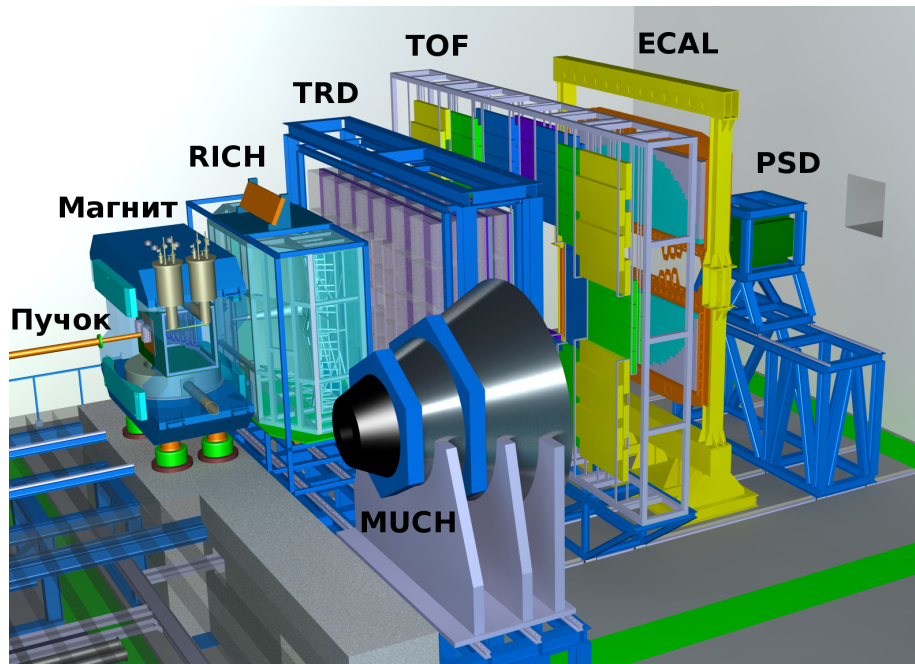


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки СВМ в конфигурации с RICH.

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  $J/\psi$  частиц. Этот детектор, разработке которого посвящена данная статья, имеет радиатор длиной 1.7 м из углекислого газа под небольшим избыточным давлением, систему фокусировки из сегментированных сферических зеркал радиуса 3 м и общей площадью 13 кв.м. В качестве позиционно-чувствительного фотодетектора используется многоанодный фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H12700.

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

Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструк-

ции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от пионов [12].

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

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

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

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

В данной статье описаны результаты тестов прототипа систем регистрации фотонов, считывания, сбора и первичной обработки данных. Были реализованы все принципиальные узлы, как аппаратные, так и программные, соответствующих систем разрабатываемого детектора черенковских колец эксперимента CBM. Тесты проводились как в лабораторных условиях, так и в составе полнофункционального прототипа детектора RICH на пучке PS в ЦЕРН.

## 1 Фотоэлектронный умножитель

Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фирмы Hamamatsu [16], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризован в работах [17, 18]. Он обладает следующими достоинствами: большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочувствительные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время прохождения однофотозлектронного сигнала через диодную систему, малый разброс этого времени от события к событию, низкие перекрёстные помехи и низкая скорость счета тепловых электронов. Некоторые свойства данного прибора показаны в табл. 1, по большинству параметров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ H8500 [19].

Таблица 1: Свойства МА ФЭУ H12700B-03.

Темновой счёт на канал, Гц	Темновой счёт на весь МА ФЭУ, кГц	Время нарастания сигнала, нс	Разброс времени развития электронно-лавины, нс
$\approx 10$	$<1.0$	0.64	0.28

Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чувствительность МА ФЭУ в версии H12700B-03, используемой в настоящей

108 работе, соответствует конфигурации с входным стеклом, прозрачным в ультрафиолетовой области.  
109

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

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

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

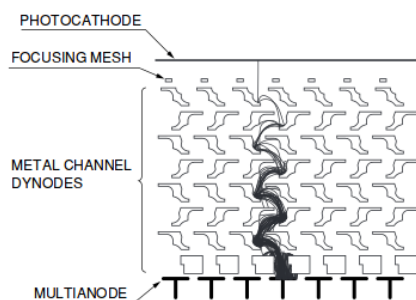


Рис. 2: Схема динодной системы типа “Metal Channel”.

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

## 157    2    Архитектура системы сбора данных CBM RICH

### 158    2.1    64-канальный модуль считывания

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

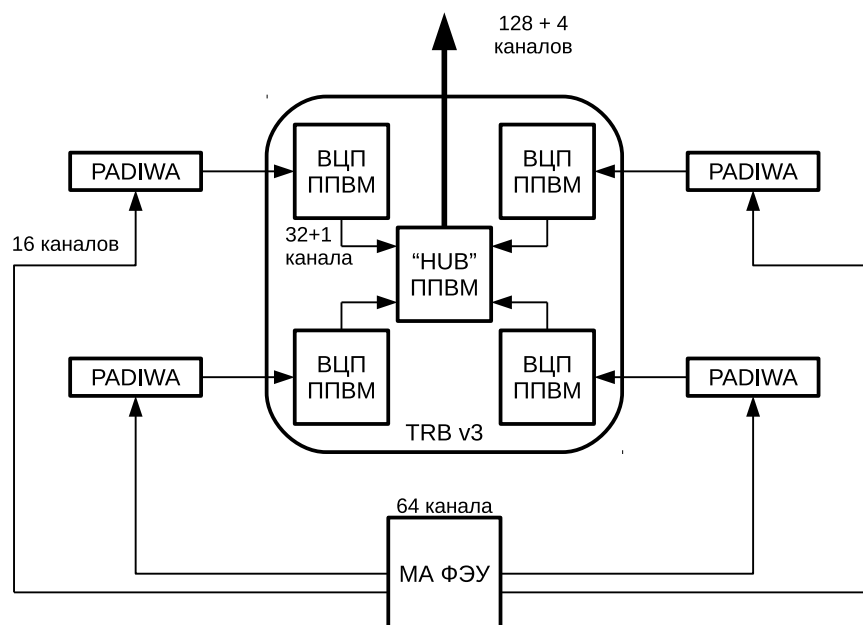


Рис. 3: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

164 PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [24]. 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 подается аналоговый сигнал. В ППВМ для каждой входной линии можно задать свой порог, разделяющий логические уровни входного сигнала. Таким образом, настраиваемые входы ППВМ могут использоваться как дискриминаторы. На выходе каждого канала формируется логический ноль, когда входной сигнал в этом канале ниже установленного порога, и логическая единица, когда входной сигнал выше этого порога, см. рис. 5. Далее расположены выходные порты и порты настройки ППВМ, объединенные в разъем, позволяющий подключить 20 LVDS линий. Для управления платой используются 4 LVDS линии, остальные 16 LVDS линий — выходные. Для программирования ППВМ на плате предусмотрен стандартный JTAG порт. Также на плате имеется порт для подключения источника низкого напряжения для питания платы. Помимо этого имеется датчик температуры, подключенный к ППВМ. Сигналы с датчика могут



190 использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев, если та-  
191 кая возможность заложена в программе ППВМ.

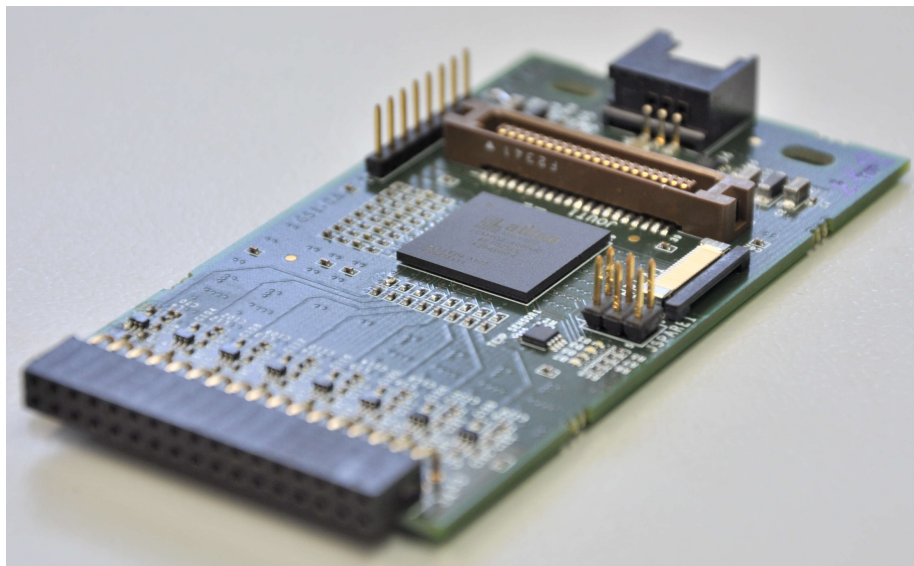


Рис. 4: Общий вид платы PADIWA.

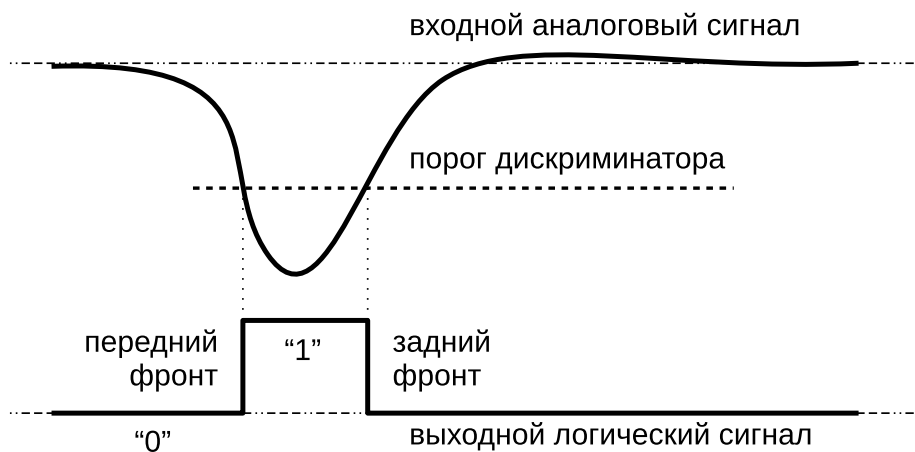


Рис. 5: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

192 Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППВМ, каждую из  
193 которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 центральную  
194 ППВМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППВМ запро-  
195 граммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а центральная  
196 ППВМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию платы будем на-  
197 зывать TRB v3 (конфигурация 1).

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

204 Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 6. Рядом с каждой периферий-  
205 ной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоединить  
206 платы расширения. В частности, существует специальная плата расшире-  
207 ния для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате TRB v3 имеют-  
208 ся порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые используются  
209 для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с компьютером.

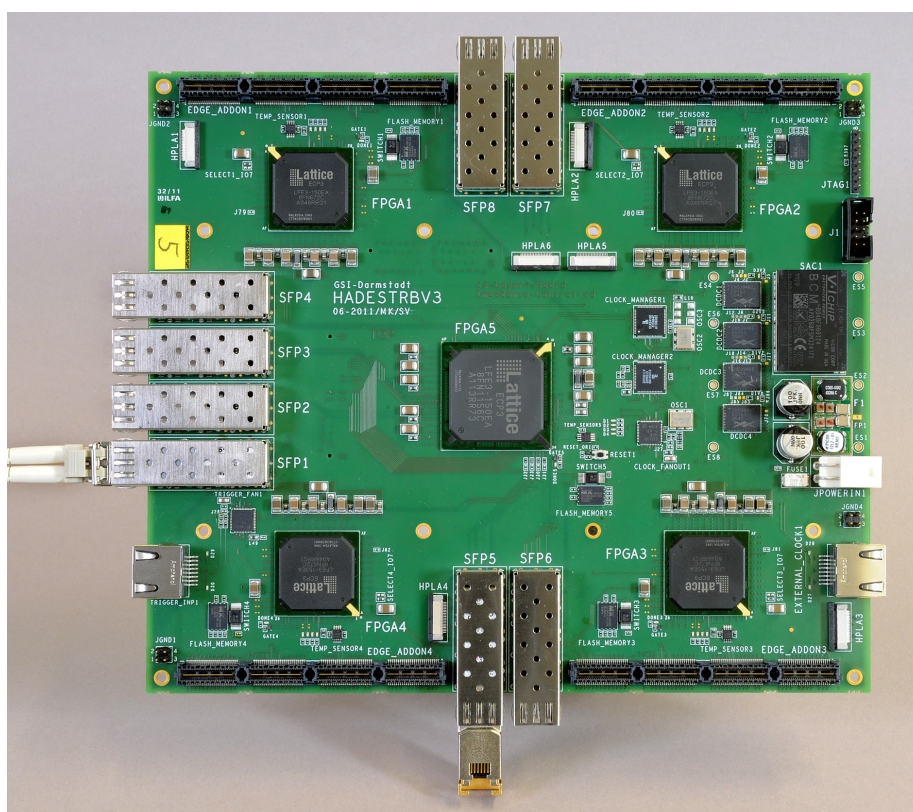


Рис. 6: Общий вид платы TRB v3.

210 Каждая периферийная ППВМ, разбивается на 32 области, в каждой из  
211 которых программируется одна и та же схема канала ВЦП. Каналы рас-  
212 положены в разных областях матрицы, поэтому каждый канал ВЦП имеет  
213 свою величину пути, проходимого сигналом внутри ППВМ. Нечетные кан-  
214 налы настроены на положительный перепад напряжения, т.е. на передний  
215 фронт, а четные каналы — на отрицательный перепад напряжения, т.е. на  
216 задний фронт. Обработка импульса из одного входного канала выполняется  
217 двумя каналами ВЦП, относительная задержка между которыми должна

218 быть прокалибрована с помощью точного генератора прямоугольных им-  
219 пульсов. Особенности такой калибровки обсуждаются в 5.2. Отметим, что  
220 в ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик коли-  
221 чества зарегистрированных временных отметок, значение которого может  
222 быть опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик мо-  
223 жет быть использован, например, для получения зависимости скорости счё-  
224 та от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

225 Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа. Гру-  
226 бое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется  
227 от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счетчика на-  
228 зываются эпохой (epoch), а 11 младших разрядов называются грубым вре-  
229 менем (coarse) [25]. При регистрации момента времени входного фронта зна-  
230 чение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой и собственно так  
231 называемой временной отметкой (timestamp). Чтобы уменьшить поток вы-  
232 ходных данных значение эпохи, которое увеличивается каждые 10.24 мкс,  
233 передаётся однократно для группы временных отметок, принадлежащих  
234 данной эпохе.

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

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

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

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

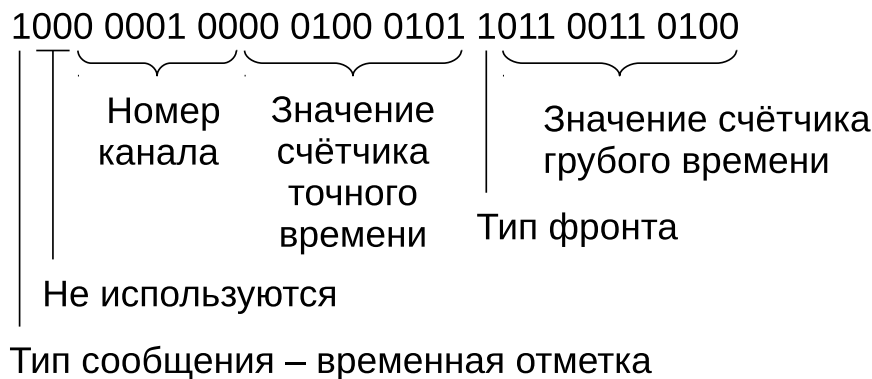


Рис. 7: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

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

Необходимо отметить, что каждый канал считывания характеризуется некоторой индивидуальной задержкой между моментом рождения фотоэлектрона и значением отметки времени переднего фронта. Эта задержка определяется временем развития электронной лавины в диодной системе, временем распространения сигнала по проводникам и временем переключения логических элементов. Процедура коррекции задержек и ее особенности описаны далее в секциях 4 и 5.3.

## 2.2 Концентрация и ввод данных в ЭВМ

В концепции системы сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответствующими платами. В общем случае к детектору примыкает плата передней электроники (FEB — front-end board), где осуществляются аналоговые преобразования и оцифровка сигналов. Далее, данные в виде электрических цифровых сигналов поступают в плату считывания (ROB — readout board), где происходит концентрация данных и их пересылка по оптическому каналу. На следующем уровне расположены платы обработки данных (DPB — data processing board). DPB уплотняют данные с различных детекторов за счет удаления избыточной информации специфическим для каждого детектора способом и группируют эти данные в пакеты, называемые срезами времени (time slice). В каждый срез времени попадают сообщения со всех детекторов, имеющие временную отметку в заданном интервале. Далее они передаются по меньшему числу оптических каналов с более высокой пропускной способностью [27]. После этого данные поступают в память, доступную центральному процессору ЭВМ по высокоскоростной шине через платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface

Board, а FLES [28], в свою очередь, обозначает First Level Event Selector, т.е. специализированный аппаратно-программный комплекс для построения событий “на лету” и их отбора по заданным критериям. Плата FLIB может быть реализована, например, путем программирования коммерческой PCI-E платы HTG K-7.

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

### 3 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 [31]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [32] и [33] соответственно. Схема установки представлена на рис. 8.

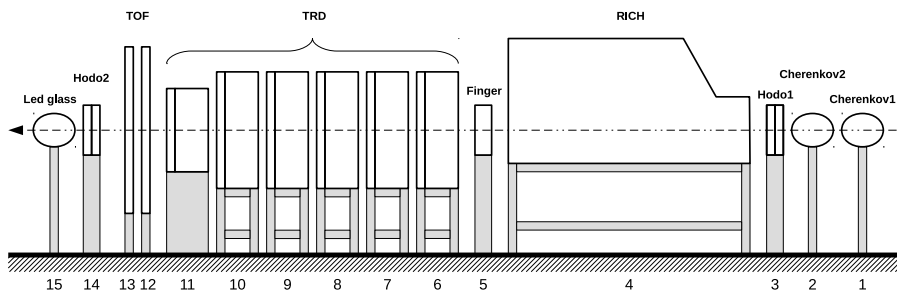


Рис. 8: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции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

Вывод пучка T9 ускорителя PS [34] в ЦЕРНе представляет собой смешанный вторичный пучок электронов, пионов и мюонов импульсом, настраиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение пучковых тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрировалось в среднем

315 500 электронов.

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

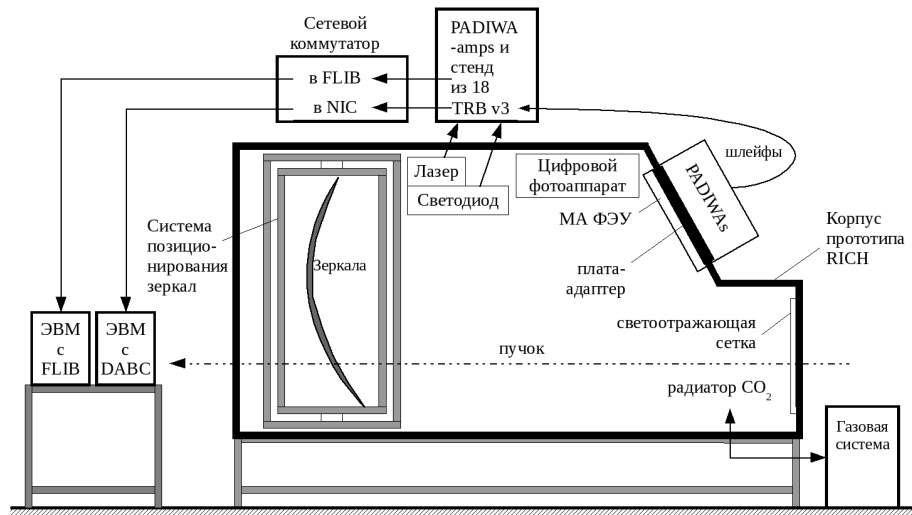


Рис. 9: Схема прототипа детектора RICH.

318 Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину, 1.2 м  
319 в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в радиаторе  
320 до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ под избыточным  
321 давлением 2 мбар при комнатной температуре. Показатель преломления  
322 газа для ближнего ультрафиолета составляет при этом  $n=1.00045$ . Стаби-  
323 лизация избыточного давления газа с точностью 0.1 мбар и его чистота  
324 обеспечивались газовой системой, описанной в [35]. Абсолютное давление  
325 газовой смеси и температура мониторируются системой медленного управ-  
326 ления. Актуальное значение показателя преломления автоматически вы-  
327 числяется и сохраняется в данных.

328 Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхнего  
329 уровня, вставляющуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соединённую  
330 с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг вер-  
331 тикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложенной рамой через  
332 два привода, обеспечивающие вращение вокруг горизонтальной оси. Сфе-  
333 рическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит из 4 долей 40 см на 40 см.  
334 Каждая из долей крепится к внутренней раме через три моторизированных  
335 актуатора. Перечисленные двигатели позволяют удалённо, после установ-  
336 ки детектора на пучке, позиционировать зеркала. Более подробно система  
337 позиционирования зеркал описана в [36].

338 Система диагностики положения зеркал [37] состоит из светотражаю-  
339 щей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светоди-  
340 ода Roithner UVTOP240 [38] с длиной волны 245 нм и фотоаппарата, считы-  
341 ваемого удалённо. Сетка сделана из полос ретрорефлектора шириной 10 мм  
342 и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизонтали и 110 мм по  
343 вертикали. Эта система позволяет контролировать точность поворота зер-

кал и, при наличии удалённого управления зеркалами, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным позиционированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распознавания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, можно определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций координат хитов.

Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувствительную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 МА ФЭУ, шесть из которых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спектра толщиной 150–200 нм. В качестве сместителя спектра использовался паратерфенил ( $\approx 40\%$  по массе) в полимерной матрице Paraloid B72. Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компонентов покрытия в дихлорметане, см. [39]. В определённый момент во время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принадлежащих одному кольцу. Для мониторингирования системы считывания и калибровки относительных задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphalas Picopower LD405 [40] с длиной волны 405 нм и длительностью импульса по паспорту менее 40 пс. Частота срабатывания лазера, так же как и светодиода, составляла 100 Гц. Интенсивность лазера была подобрана так, чтобы частота срабатывания каждого пикселя была на уровне 10% от частоты запуска лазера.

Считывание с каждого МА ФЭУ осуществлялось модулем, описанным в разделе 2.1. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предусилителей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпусе прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Данные с 16 плат TRB v3 поступали на ещё одну, 17-ю плату TRB v3 особой конфигурации, которая также являлась генератором и распределителем триггера считывания для всех плат TRB v3. Импульсы с генераторов, управляющих лазером и светодиодом, а также сигналы от детекторов пучка обрабатывались платами PADIWA-amp (плата, подобная PADIWA, но позволяющая измерять амплитуду сигнала и имеющая в два раза меньшее число каналов [24]) и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3 также нестандартной конфигурации, совмещающей ВЦП и концентратор данных. Параллельно функционировало две системы сбора данных — одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с каждой платы TBR v3 по медному носителю, а другая через FLIB с одной (18-й) платы TBR v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рис. 10. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой

FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

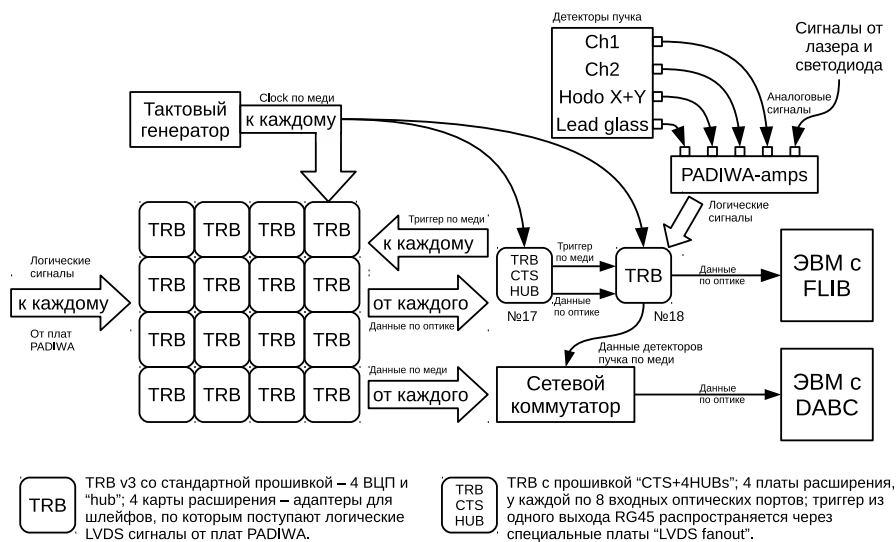


Рис. 10: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

## 3.2 Лабораторный стенд

Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась на пучковых тестах CBM 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.



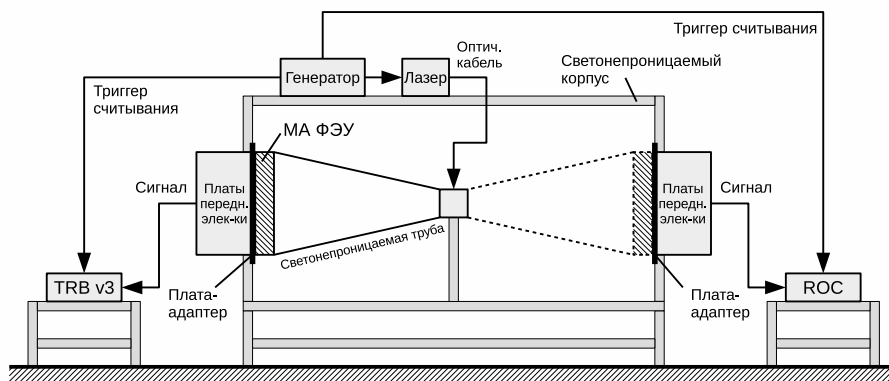


Рис. 11: Схема лабораторной установки.

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

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

Известно, что требуется некоторое время, чтобы МА ФЭУ, находившийся на свету, высветился, поэтому перед началом измерений после закрытия 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 установ-

450 ленного порога, регистрируется и заносится в выходной буфер. Однако для  
 451 того, чтобы данные из выходного буфера были отправлены в ЭВМ, необ-  
 452 ходимо периодически посылать во вспомогательный вход контроллера счи-  
 453 тывания специальный импульс, называемый триггером считывания. В на-  
 454 шей установке импульсы генератора, управляющего лазером, одновремен-  
 455 но играют роль триггера считывания выходного буфера. В используемых  
 456 системах считывания и сбора данных триггер считывания автоматически  
 457 поступает во входной поток данных. Это позволяет анализировать заре-  
 458 гистрированные временные отметки, сопоставляя их с моментом вспышки  
 459 лазера. Съём данных с обеих систем считывания и сбора данных осуществ-  
 460 лялся по стандартному Ethernet кабелю в сетевой интерфейс ЭВМ.

## 461 4 Программное обеспечение

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

468 Соответствующим образом сконфигурированное приложение, написан-  
 469 ное в рамках CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный слу-  
 470 чай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считывания  
 471 до анализа могут быть выполнены “на лету”, без записи промежуточных  
 472 результатов на диск. В ходе описываемых в данной статье тестов исполь-  
 473 зовалась последовательность обработки данных, изображённая на рис. 12.  
 474 Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков  
 475 описаны ниже.

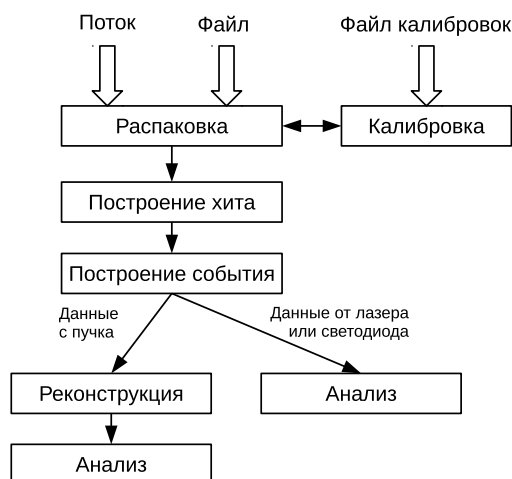


Рис. 12: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

## 4.1 Распаковка

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

## 4.2 Калибровка точного времени

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

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

## 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 стоит таблицу коррекций по данным параметрам.

Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введём сплошную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоящей из множества МА ФЭУ. Полное число пикселей  $M = 64 \cdot N$ , где  $N$  — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты, имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение окна зависят от экспериментальной установки (например, разницы длин кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и подбираются в соответствии

с распределением, построенным по конкретному набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных данных строятся гистограммы разности временных отметок  $i$ -го и  $j$ -го каналов, где  $i$  и  $j$  пробегают значения от 1 до  $M$ . В качестве меры разности задержек между каналами можно взять по выбору пользователя либо среднее значение распределения, либо наиболее вероятное. Полученные значения заполняют кососимметричную матрицу  $A$  размерности  $M \cdot M$ . В дальнейшем пользователь может задать опорный канал, относительно которого будет создана таблица коррекций, являющаяся, по сути, столбцом матрицы  $A$ .

#### 4.4 Построение хита

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

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

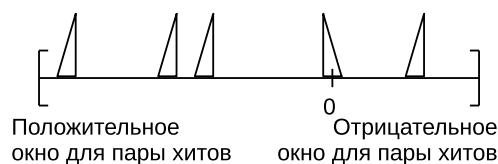


Рис. 13: Постановка задачи поиска пар фронтов для одного входного канала.

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

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

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

## 4.5 Построение события

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

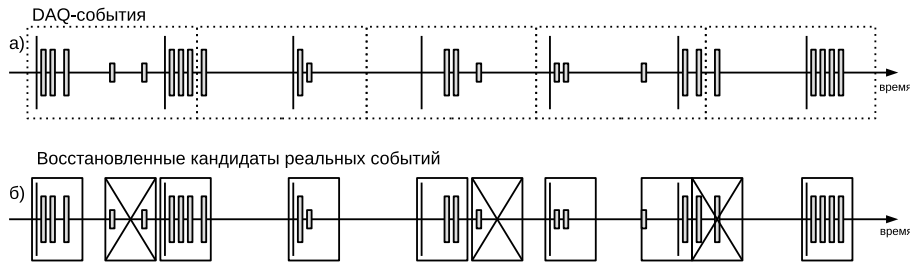


Рис. 14: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнуты отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные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

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

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

Очевидно, что реальное событие может попасть на границу DAQ-событий, следовательно, необходимо при построении реальных событий смотреть на несколько DAQ-событий. Также в силу особенностей электроники не гарантируется, что входная информация поступает упорядоченной во времени. Поэтому периодически случается, что хиты реального события, пришедшего по большей части в  $i$ -м DAQ-событии, обнаруживаются в  $i + 1$ , реже  $i + 2$ ,

и даже  $i + 3$  и последующих DAQ-событиях. Следовательно, требуется сначала распознать кластеры хитов в достаточно широком интервале времени — потенциальные события, а затем по наличию заданного типа триггера выбрать реальные события, содержащие либо черенковские кольца, либо вспышки лазера.

Реализован данный алгоритм с помощью буфера хитов. По мере распаковки входных сообщений, построенные хиты заносятся в буфер. На каждой итерации осуществляется распознавание кандидатов событий в буфере и определяется их количество  $N$ . Когда  $N$  достигает заданного минимального уровня, на каждой итерации, помимо приёма одного входного DAQ-события, осуществляется выброс выходного кандидата реального события. Так как одно DAQ-событие может содержать несколько кандидатов, буфер будет расти. Для того, чтобы избежать переполнения, устанавливается верхний предел. Когда  $N$  достигает этого предела, осуществляется сброс событий на выход по принципу FIFO до заданного минимального уровня. На рис. 15 приведён отрывок диаграммы наполненности буфера по мере обработки входного потока. В данном примере были установлены следующие параметры: минимальное кол-во событий в буфере 200, максимальное — 500. Отметим, что кол-во событий в буфере может превышать заданное максимальное значение, если в одном DAQ-событии содержится более одного реального события. По окончании входного потока содержимое буфера обрабатывается полностью и все распознанные события подаются на выход.

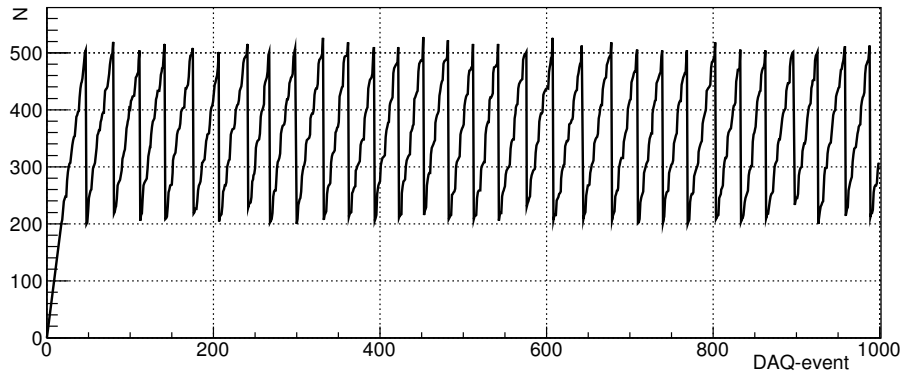


Рис. 15: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

## 4.6 Реконструкция

Реконструкция в CBM RICH означает поиск колец по хитам в плоскости реконструкции. В контексте реконструкции можно рассматривать хит как загоревшийся пиксель МА ФЭУ. Конус черенковских фотонов, после фокусировки зеркалами, пересекает поверхность фоточувствительной камеры, которая в общем случае может состоять из нескольких плоскостей. Первый этап реконструкции — перевод хитов из плоскостей камеры в плоскость реконструкции. Затем выполняется поиск колец по хитам. В CbmRoot есть реализации нескольких алгоритмов поиска колец. Наибольший практический

интерес представляет алгоритм распознавания колец черенковского излучения, основанный на преобразовании 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 распаковки обоих потоков. На массиве составляющем примерно  $10^7$  сообщений расхождений не выявлено. Таким образом, продемонстрирована работоспособность концепции формирования временных интервалов и ввода данных в компьютер с использованием FLIB. Приведённые в следующих разделах результаты получены на основе данных, принятых через стандартный сетевой интерфейс с применением DAQ ПО на основе DABC [30].

### 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.

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

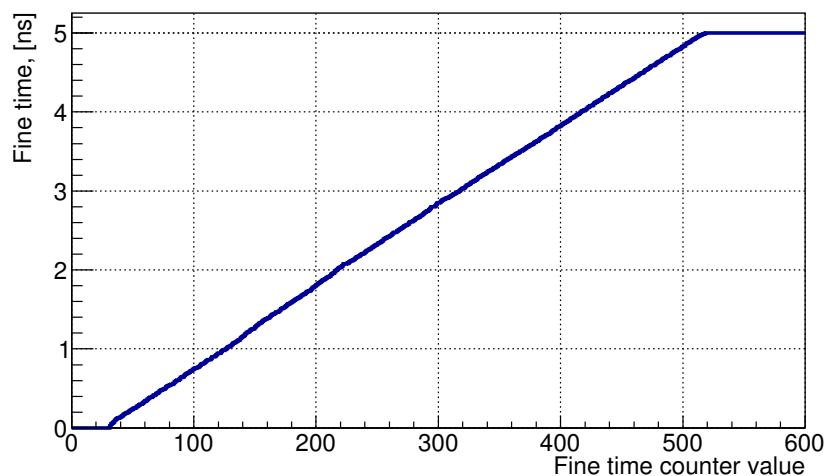


Рис. 16: Пример калибровочной кривой.

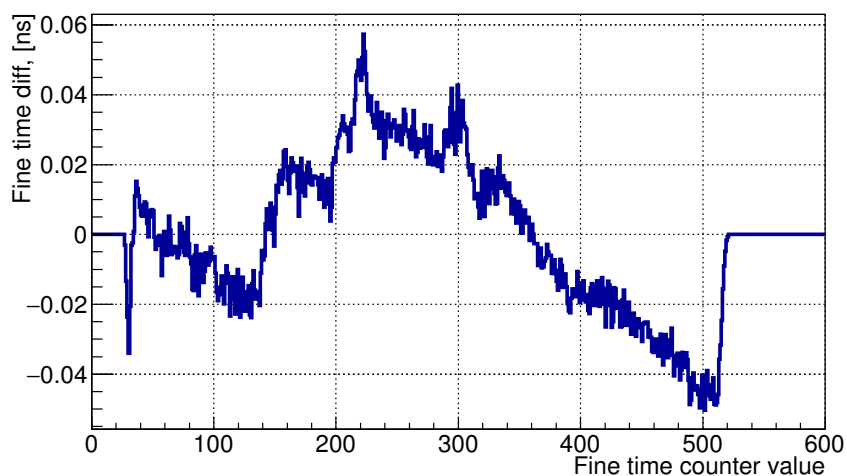


Рис. 17: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

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 импуль-



662 сов. В работе [48] показано, что предельное временное разрешение в обоих  
663 случаях одинаково. Ниже мы используем второй подход.

664 В процедуре калибровки для каждого канала была выполнена замена  
665 точной калибровочной таблицы сначала индивидуальной линейной функ-  
666 цией данного канала, а потом общей функцией, усредненной по всем кана-  
667 лам (параметры этой функции показаны на рис. 18 сплошным квадратом).  
668 Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом  
669 входном канале показаны на рис. 19. Там же показаны результаты без ка-  
670 либровки.

671 Видно, что точная калибровка точного времени необходима для дости-  
672 жения предельного разрешения ВЦП. Ширина распределения разностей  
673 временных отметок в двух независимо флуктуирующих каналах ВЦП со-  
674 ставляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разрешению 21 пс.  
675 Использование индивидуальной линейной функции приводит к увеличению  
676 ширины до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных ка-  
677 налах. Отметим, что применение усредненной калибровки устраняет двух-  
678 пиковую форму, характерную для распределения без калибровки, но в неко-  
679 торых случаях приводит при этом к увеличению ширины.

680 Таким образом, при невозможности выполнить калибровку точного вре-  
681 мени, например, из-за недостаточного массива данных, предоставленных  
682 для анализа, в условиях нашей задачи, когда характерное временное разре-  
683 шение составляет несколько сотен пикосекунд, возможно применение усред-  
684 ненной линейной функции без заметного снижения точности.

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

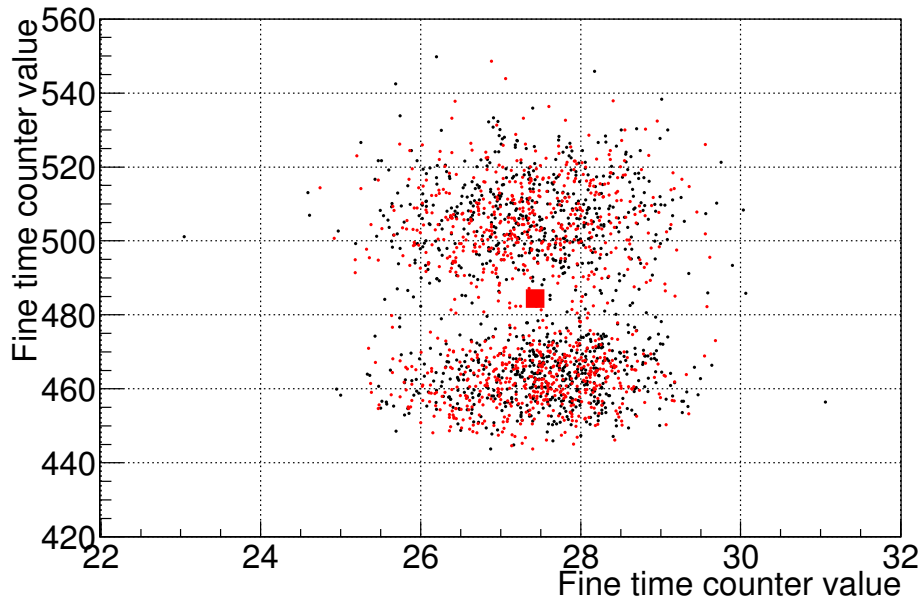


Рис. 18: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для глобальной псевдокалибровки.

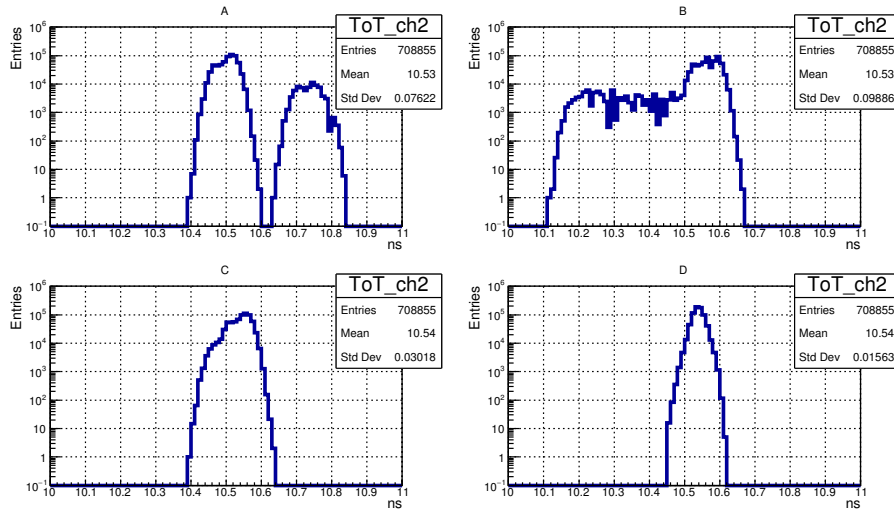


Рис. 19: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (A) без калибровки точного времени; (B) с применением усреднённой калибровочной функции; (C) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (D) с применением полноценной калибровочной функции.

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

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

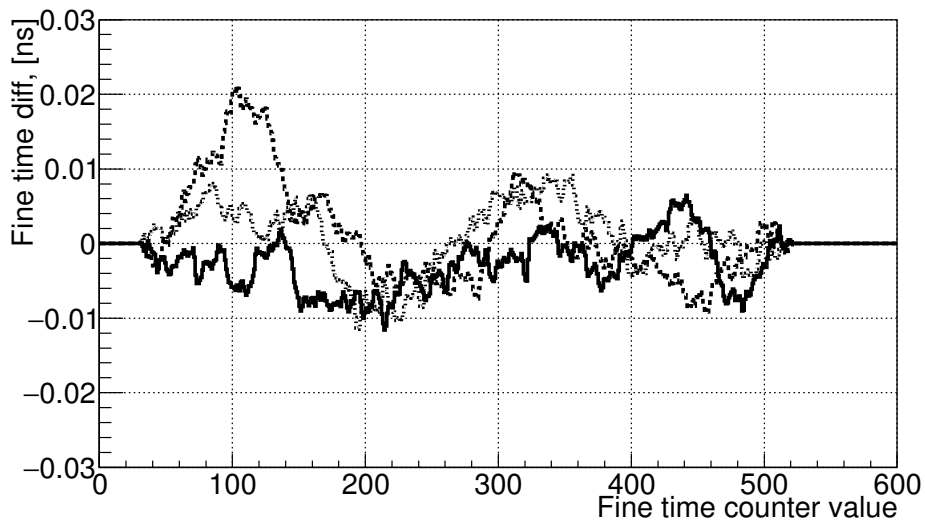


Рис. 20: Стабильность калибровок.

### 702 5.3 Определение коррекций задержек между каналами

703 Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов, со-  
 704 ответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в  
 705 заданной паре каналов, показана на рис. 21. Такие гистограммы позволяют  
 706 определить положение пика и, соответственно, ввести коррекцию задержки.  
 707 Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 нс значений задержек, полу-  
 708 ченных таким образом, что даёт заметный вклад во временное разрешение  
 709 системы считывания (см. секцию 5.4).

710 Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в  $i$ -м канале  
 711 относительно опорного может быть получена с точностью не хуже 400 пс  
 712 как сумма задержки в  $j$ -м канале относительно опорного и задержки в  $i$ -  
 713 м канала относительно  $j$ -го. Для некоторых пар каналов вид гистограм-  
 714 мы отличается от показанной на рис. 21. См., например, рис. 22. Подобное  
 715 распределение можно получить, если один из двух каналов является де-  
 716 фектным в том смысле, что к фронту логического сигнала подмешивается  
 717 возбужденный или наведённый колебательный сигнал. Такая гипотеза под-  
 718 тверждается тем фактом, что форма гистограммы зависит от порога дис-  
 719 криминатора на плате PADIWA. При построении аналогичной гистограммы  
 720 для пары дефектных каналов наблюдается до 5 пиков. Дальнейшее иссле-

721 дование проводилось с исключением дефектных каналов. Доля дефектных  
 722 каналов составляет около 10% от полного числа каналов. При разработке  
 723 следующей версии передней электроники для CBM RICH особое внимание  
 724 будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гистограммы, подобные  
 725 обсуждаемым в данном разделе, будут использоваться в качестве диагно-  
 726 стического инструмента.

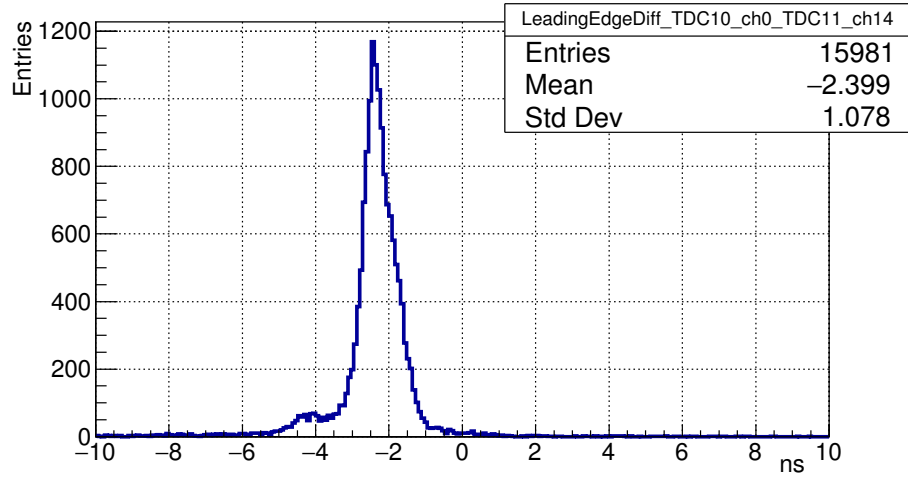


Рис. 21: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

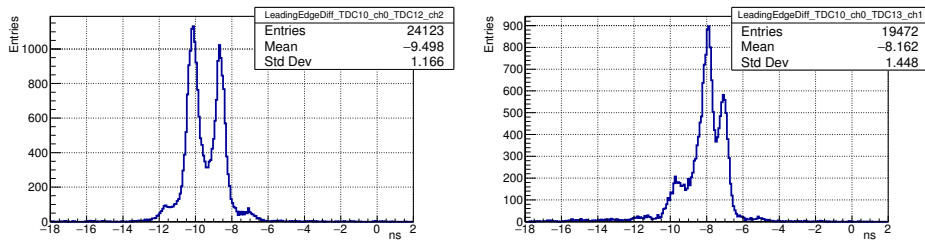


Рис. 22: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

## 727 5.4 Временное разрешение

728 В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых  
 729 регистрируются несколько практически одновременно испущенных фото-  
 730 нов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой  $\approx 40$  пс, т.е.  
 731 на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через МА ФЭУ.  
 732 Второй тип — черенковские кольца. Разброс времени прихода фотонов на

733 МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и 70 пс для вспышек лазера, что  
734 определяется в первую очередь наклоном плоскости в которой расположе-  
735 ны фотокатоды. Анализ таких событий позволяет охарактеризовать вре-  
736 менное разрешение всей системы считывания, начиная от окна МА ФЭУ  
737 и кончая формированием отметок времени. Временное разрешение одно-  
738 го канала определяется разбросом зарегистрированных временных отме-  
739 ток относительно времени прилёта фотона при многократных измерениях.  
740 Поскольку точное время прилёта фотона измерить нельзя, нам приходится  
741 исследовать разброс разностей временных отметок в паре каналов при реги-  
742 страции одновременно пришедших фотонов. Временные отметки в каждом  
743 из каналов подвержены независимым флуктуациям по одинаковому закону,  
744 следовательно, измеренная ширина распределения будет в  $\sqrt{2}$  раз больше,  
745 чем временное разрешение каждого канала. После применения коррекций  
746 задержек и калибровки точного времени в двух каналах, ни один из которых  
747 не является дефектным, получается распределение аналогичное показанно-  
748 му на рис. 21, отличающееся лишь тем, что положение центра находится в  
749 нуле.

750 Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения составляет  
751 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное значение  
752 превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ примерно в  
753 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравнимыми вкладками:  
754 дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции момента пересече-  
755 ния порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации такой  
756 коррекции необходимо надёжное измерение времени над порогом, что в на-  
757 шем случае невозможно, см. секцию 5.6.

758 Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в це-  
759 лом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновременные  
760 сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) шестнадцать каналов,  
761 считываемых одной платой PADIWA, (2) 64 канала, принадлежащих одно-  
762 му МА ФЭУ, (3) 256 каналов, принадлежащих четырём соседним МА ФЭУ.  
763 В каждом случае после коррекции задержек и калибровки точного времени,  
764 отбирались все хиты, принадлежащие одному событию, и гистограммиро-  
765 вались разности временных отметок по всем возможным парам каналов.  
766 Результаты для вспышек лазера показаны на рис. 23. В таблице 2 пока-  
767 зано, как эволюционирует среднеквадратичное отклонение и FWHM в за-  
768 висимости от числа каналов. Отметим, что для событий от лазера средне-  
769 квадратичное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличени-  
770 ем числа каналов, одновременно с тем, что распределение последовательно  
771 принимает форму, более близкую к распределению Гаусса. Такое поведе-  
772 ние можно интерпретировать как размывание индивидуальных особенно-  
773 стей каналов в процессе усреднения. Для хитов, принадлежащих одному  
774 черенковскому кольцу (см. рис. 24), и FWHM и RMS возрастают с увеличе-  
775 нием числа каналов. Вероятно, отличия связаны с тем, что распределения  
776 фотонов во времени для черенковского кольца и вспышки лазера отлича-  
777 ются друг от друга.

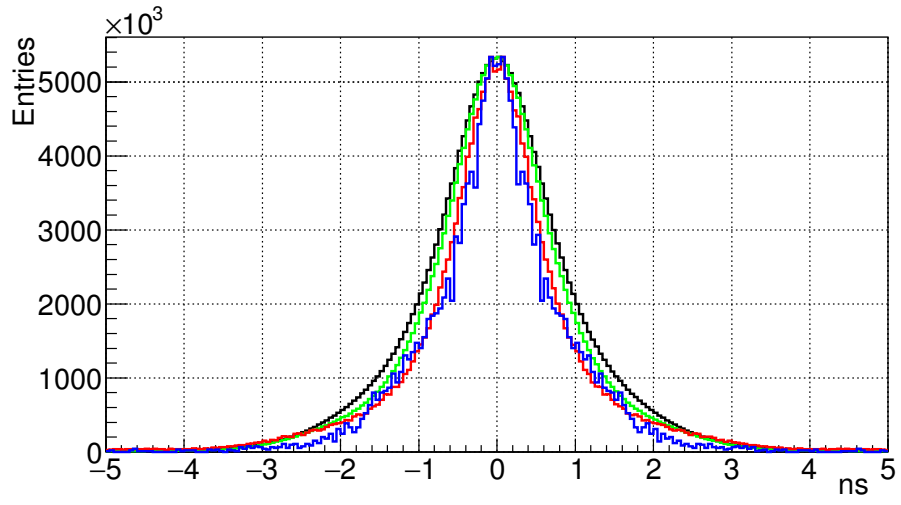


Рис. 23: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от лазера.

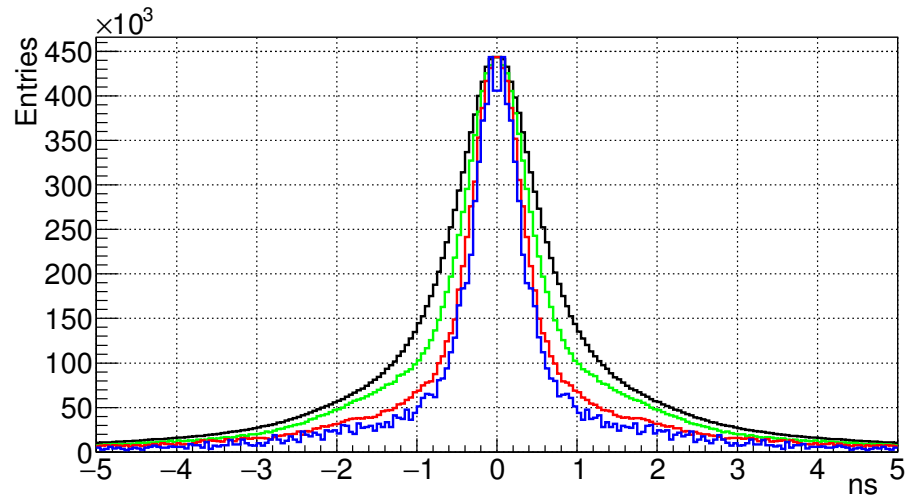


Рис. 24: Распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от черенковских колец.

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 взаимодействия и попасть фотокатод. В результате, даже при наличии слоя сместителя спектра, часть хитов подчиняется временной зависимости характерной для чистого ФЭУ. Таким образом, для получения кривой высвечивания сместителя спектра необходимо из распределения разностей времен, полученного со сместителем спектра, вычесть должным образом отнормированное в максимуме распределение разностей времён, полученное с чистым ФЭУ.

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

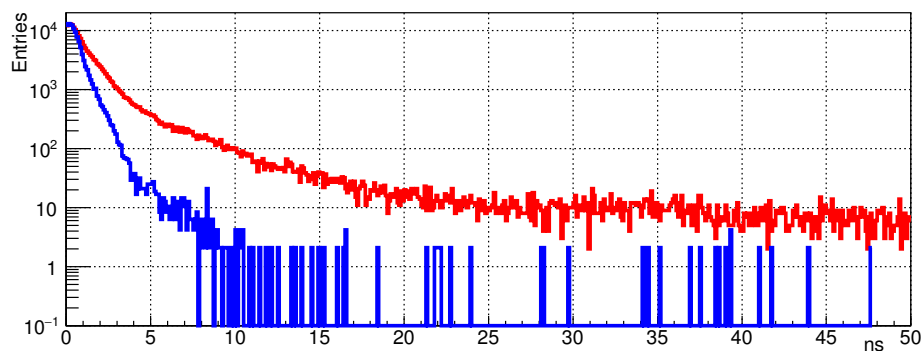


Рис. 25: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечивания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

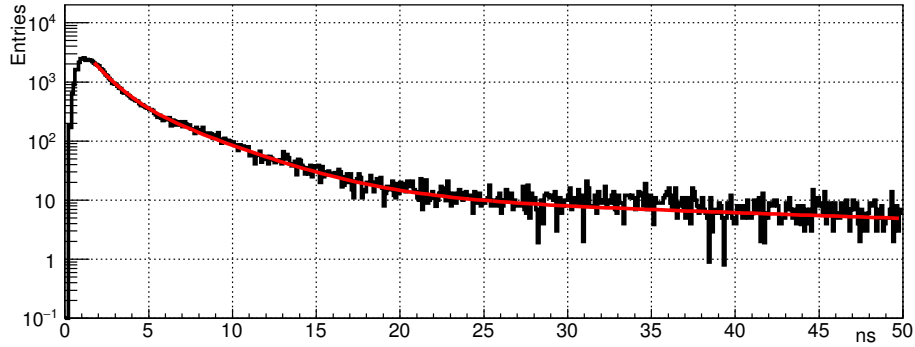


Рис. 26: Разница распределений со сместителем спектра и без него и кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

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. Были получены ([49]) значения времён высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000, и 0.8364.

Подгонка кривой с рис. 26 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 [50]. Однако в нашем случае существует некоторая случайная задержка между моментом попадания черенковского фотона на поверхность МА ФЭУ и временем прихода первого хита. С целью выявления влияния метода на измеренные времена высвечивания было проведено Монте Карло моделирование.

В модели были заложены разброс времени прохода лавины в МА ФЭУ 300 пс (RMS), три экспоненциальные компоненты с характерными временами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17, 1.00, 0.22 и средним числом хитов в кольце равным 18. Получившееся распределение времён относительно первого хита в кольце было подогнано тремя экспонентами со свободными параметрами. Если начать фитирование получившейся зависимости, отступив 4 нс от начала высвечивания, величины постоянных распада экспонент воспроизводятся с точностью лучше 5%, а соответствующие относительные интенсивности несколько искажаются, что естественно, в силу существования начального неэкспоненциального участка кривой. Таким образом, подтверждена корректность применённого



833 метода определения времён высвечивания.

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

## 841 5.6 Время над порогом

842 Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найденного  
843 хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об ампли-  
844 туде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных  
845 CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения временного раз-  
846 решения путём коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды  
847 (walk correction), а также для повышения качества отделения однофото-  
848 электронного сигнала от шума. На рис. 28 показано типичное распределе-  
849 ние ToT, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки  
850 ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура,  
851 согласно [51], может быть объяснена наличием периодической наводки как  
852 на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и входом  
853 ВЦП. На рис. 27 показан экран цифрового осциллографа в режиме накоп-  
854 ления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к выходу  
855 PADIWA. Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдаемым пикам  
856 в распределении ToT; имеет место проблема недостаточности амплитуды  
857 одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логической единицы;  
858 имеется периодическая наводка на выходе дискриминатора, но ее недоста-  
859 точно для объяснения наблюдаемой картины; преобладание определенных  
860 длительностей логических сигналов позволяет предположить наличие пе-  
861 риодической структуры во входном сигнале. Все это говорит о необходи-  
862 мости подстройки аналоговой части для формирования на входе PADIWA  
863 более чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между  
864 дискриминатором и ВЦП от наводок. Подобные изменения будут, с учетом  
865 результатов данной работы, реализованы в следующем прототипе платы  
866 передней электроники, называемом DIRICH [29].

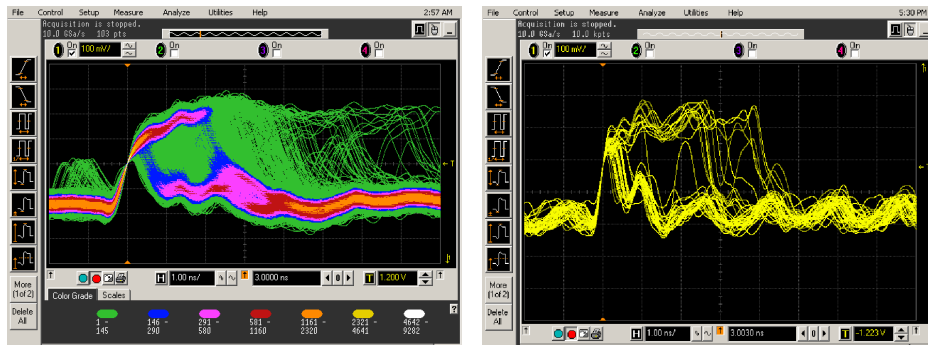


Рис. 27: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту.

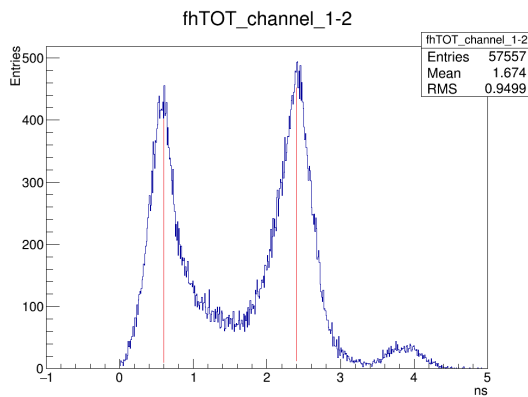


Рис. 28: Типичное распределение ToT.

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

## 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 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.

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

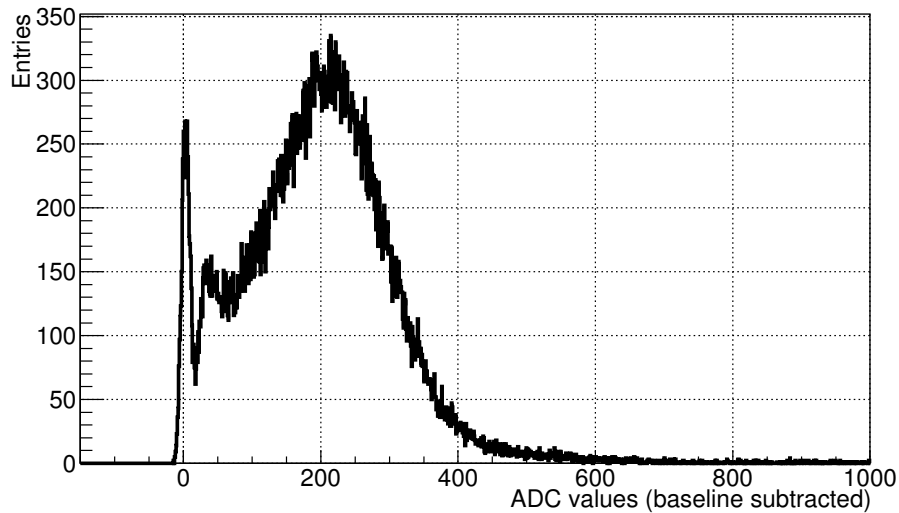


Рис. 29: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ H12700.

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

910 Одно из отличий канала считывания в плате RADIWA — это значи-  
 911 тельно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-XYTER

912 осуществляется формирование со временем интегрирования 190 нс, то в  
 913 PADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что соответ-  
 914 ствует характерному времени нарастания сигнала несколько наносекунд.  
 915 Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов и наводок  
 916 при регистрации сигналов с помощью PADIWA.

917 Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с по-  
 918 мощью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена  
 919 в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях, по-  
 920 строенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут быть  
 921 получены из анализа потока данных, набранных при различных значениях  
 922 порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализован-  
 923 ного непосредственно в ВЦП и упомянутого в секции 2.1, позволяет полу-  
 924 чить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но позволяет  
 925 достичь максимальных частот, достаточных для локализации базовой ли-  
 926 нии. На рис. 30 показана зависимость частоты триггеров от порога реги-  
 927 страции. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более по-  
 928 дробно исследованному ниже, а быстро возрастающие границы вокруг вер-  
 929 тикальной штриховой линии ограничивают локализацию базовой линии.  
 930 Точность локализации базовой линии мы оцениваем как  $\pm 200$  отсчетов по  
 931 шкале, использованной на рис. 30 и рис. 31B,D.

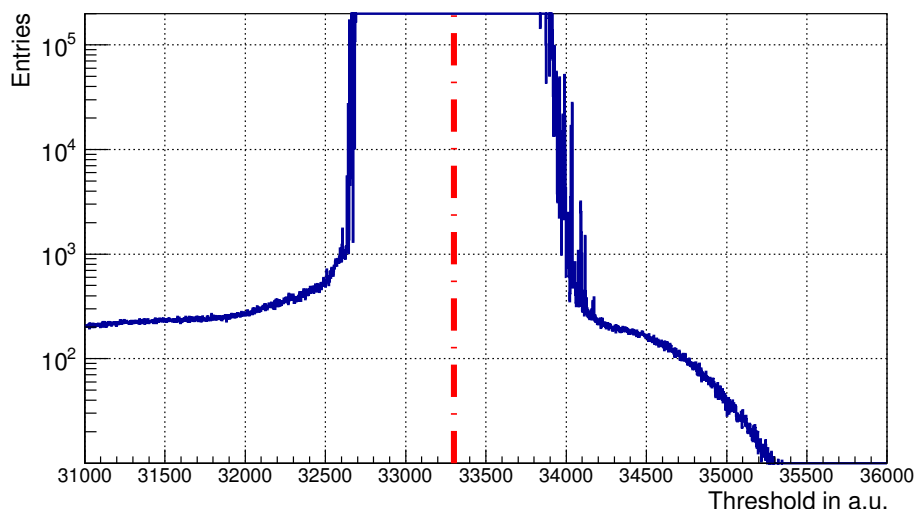


Рис. 30: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

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

936 Интересно сравнить зависимость скорости счёта от порога при использо-  
 937 вании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Результа-  
 938 ты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на рис. 31.  
 939 В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл

940 одноэлектронного спектра, показанный на рис. 31С. Соответственно, про-  
 941 изводная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектрон-  
 942 ным спектром, показанным на рис. 31А. Сплошная линия на рис. 31В полу-  
 943 чена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 31D  
 944 и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени.  
 945 Отметим, что мы оцениваем равенство световых потоков как  $\pm 5\%$ . Видно,  
 946 что скорости счёта в области ложбины и максимума одноэлектронного спек-  
 947 тра приблизительно совпадают. Амплитуды, соответствующие максимуму  
 948 и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом,  
 949 в случае RADIWA наблюдается, с одной стороны более явно выраженная  
 950 ложбина, а с другой — избыток счёта в малых амплитудах, что предпо-  
 951 лагает больший относительный вклад наводок и, следовательно, невозмож-  
 952 ность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра  
 953 и нецелесообразность повышения эффективности за счёт установления по-  
 954 рога ниже ложбины.

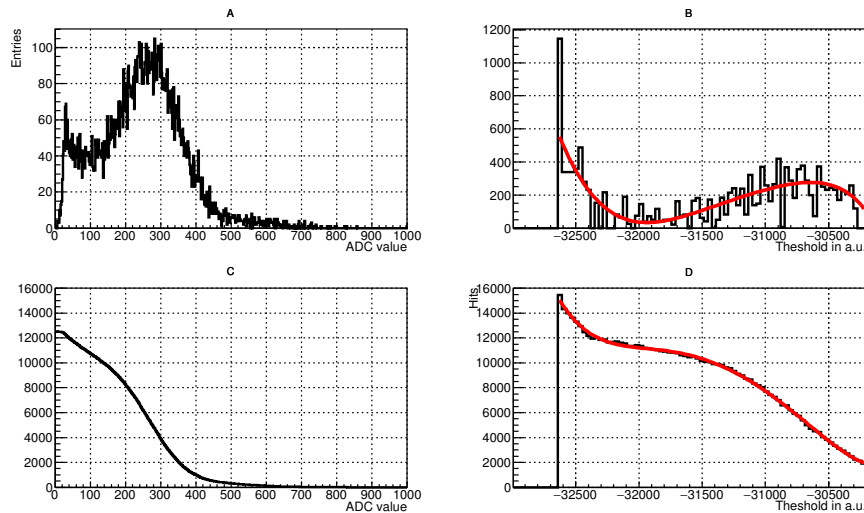


Рис. 31: Сравнение (А) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с  
 помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (В) производной скана  
 по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе RADIWA  
 и TRB v3; сравнение (С) интеграла одноэлектронного спектра и (D) зави-  
 симости скорости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

## 955 Заключение

956 Исследованы свойства прототипа системы считывания и сбора данных де-  
 957 тектора RICH эксперимента CBM. Подробно охарактеризован 64-канальный  
 958 модуль, состоящий из МА ФЭУ H12700, четырёх плат предусилителей-  
 959 дискриминаторов RADIWA и одной платы TRB v3, выполняющей функ-  
 960 ции ВЦП и концентратора данных. Описаны необходимые для работы про-  
 961 тотипа модули ПО. Продемонстрировано, что ВЦП имеют временное раз-  
 962 решение 21 пс (FWHM) при использовании калибровки точного времени.  
 963 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 (полчаса). 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 следующей версии плат считывающей электроники. Исследованы временные свойства сместителя спектра и его влияние на эффективность регистрации черенковских колец. Наиболее интенсивная быстрая компонента характеризуется временем высвечивания 1.1 нс, но имеются также компоненты с характерными временами 3.8 нс и 45 нс. Проведено сравнение медленного аналогового и быстрого временного считывания МА ФЭУ. Выявлено проявление особенностей одноэлектронного спектра в том, как эффективность регистрации фотоэлектронов и вероятность появления ложных хитов зависят от порога дискриминатора. Исследовано временное разрешение всего канала считывания для различных по величине множеств каналов: от одной пары до 256 штук. Наихудшее из полученных значений составляет 1.2 нс, что определяется в первую очередь отсутствием коррекции временной отметки в зависимости от амплитуды сигнала и дрейфом задержек между каналами. 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 надёжность системы при долговременной эксплуатации.

## Список литературы

- [1] “FAIR Baseline Technical Report,” GSI, Darmstadt (2006) 92 p.  
[www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications\\_FAIR/FAIR\\_BTR\\_1.pdf](http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_BTR_1.pdf)
- [2] B. Friman, C. Hohne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and P. Senger, “The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments,” *Lect. Notes Phys.* **814** (2011) pp. 980.
- [3] P. Senger and V. Friese, “The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100,” GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- [4] “Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report.” GSI, Darmstadt (2005) 406 p.
- [5] “CBM Progress Report 2014,” GSI, Darmstadt (2015) 159 p.
- [6] A. Malakhov *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet,” GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- [7] M. Koziel, “MVD Status: Integration,” 25<sup>th</sup> CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.

1007 <https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&>  
1008 [materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960)

1009 [8] J. Heuser *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking  
1010 System (STS),” GSI, Darmstadt (2013) 167 p.

1011 [9] C. Höhne *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Ring Imagine  
1012 Cherenkov (RICH),” GSI, Darmstadt (2013) 201 p.

1013 [10] S. Chattopadhyay *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Muon  
1014 Chambers (MuCh),” GSI, Darmstadt (2014) 192 p.

1015 [11] “Development of a GEM based detector for the CBM Muon Chamber  
1016 (MUCH),” S Biswas et al 2013 JINST 8 C12002

1017 [12] “TRD detector development for the CBM experiment,” NIM A, Volume  
1018 732, 21 December 2013, Pages 375–379

1019 [13] N. Herrmann *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight  
1020 System (TOF),” GSI, Darmstadt (2014) 182 p.

1021 [14] I. Korolko, “CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status),” 25<sup>th</sup> CBM  
1022 Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.  
1023 <https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&>  
1024 [materialId=slides&confId=2960](https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960)

1025 [15] F. Guber *et al.*, “Technical Design Report for the CBM Projectile spectator  
1026 detector (PSD),” GSI, Darmstadt (2014) 78 p.

1027 [16] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700\\_TPMH1348E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf)

1028 [17] “Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and R12699-03 multi-  
1029 anode photomultiplier tubes,” M. Calvi et al 2015 JINST 10 P09021

1030 [18] “Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 multi-anode  
1031 photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade,” LHCb-INT-2015-006

1032 [19] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500\\_H10966\\_TPMH1327E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf)

1033 [20] T. Mahmoud RICH2016 proceedings

1034 [21] NIM A, doi: 10.1016/j.nima.2016.05.102

1035 [22] JINST 11 (2016) no.05, C05016

1036 [23] J. Kopfer PhD thesis

1037 [24] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>

1038 [25] “A novel approach for pulse width measurements with a high precision (8  
1039 ps RMS) TDC in an FPGA,” 2016 JINST 11 C01046

1040 [26] TRB v3 documentation, [http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)  
1041 [trb3docu.pdf](http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf)

- [27] Wojciech M. Zabołotny and Grzegorz Kasprowicz “Data processing boards design for CBM experiment,” Proc. SPIE 9290, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014, 929023 (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2073377;
- [28] “A First-level Event Selector for the CBM Experiment at FAIR,” J de Cuveland et al 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006
- [29] “Electronics for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments,” 2017 JINST 12 C01072
- [30] “Data acquisition and online monitoring software for CBM test beams,” J Adamczewski-Musch et al 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001
- [31] “Common CBM beam test of the RICH, TRD and TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014,” CBM Progress Report 2014, p.9
- [32] “Test of Münster CBM-TRD real-size detector and radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line,” CBM Progress Report 2014, p.78
- [33] “Prototype with the basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real conditions” 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037
- [34] “Information about the T9 beam line and experimental facilities,” [http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight\\_students/information\\_about\\_the\\_t9\\_beam\\_line\\_and\\_experimental\\_facilities.pdf](http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf)
- [35] “CBM RICH PROTOTYPE GAS SYSTEM,” L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov
- [36] “Determination of tolerances of mirror displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector,” J. Adamczewski-Musch et al, doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- [37] “Mirror misalignment control system and prototype setup,” CBM Progress Report 2014, p.56
- [38] Roithner UVTOP240 datasheet, [http://www.roithner-laser.com/datasheets/led\\_deepuv/uvtop240.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf)
- [39] “Influence of wavelength-shifting films on multianode PMTs with UV-extended windows,” NIM A, Volume 783, 21 May 2015, Pages 43–50
- [40] Alphas Lasers Picopower-LD series datasheet, [http://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond\\_Pulse\\_Diode\\_Lasers\\_with\\_Driver\\_PICOPOWER-LD\\_ALPHAS.pdf](http://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHAS.pdf)
- [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- [43] FLESnet development repository, <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
- [44] “HADES trbnet data formats for DABC and Go4,” PHN-SIS18-ACC-41 GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297



- 1080 [45] R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka. Nonlinearity correction of the  
 1081 integrated time-to-digital converter with direct coding. IEEE Transactions  
 1082 on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April 1997.
- 1083 [46] Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284
- 1084 [47] “Fast Parallel Ring Recognition Algorithm in the RICH Detector of the  
 1085 CBM Experiment at FAIR,” ACAT2010 proceedings
- 1086 [48] J. Adamczewski-Musch et al, “Tests of the CBM RICH readout and DAQ  
 1087 prototype”, PEPAN letters
- 1088 [49] M. Dürr, private communication
- 1089 [50] D.V. O’Connor, D. Phillips, Time Correlated Single Photon Counting,  
 1090 Academic Press, London 1984
- 1091 [51] Time over threshold in the presence of noise.