

**Объединённый институт ядерных исследований
Лаборатория информационных технологий**

На правах рукописи

**Овчаренко
Егор Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, СБОРА И
АНАЛИЗА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА RICH ЭКСПЕРИМЕНТА
СВМ**

Специальность 01.04.01 —
приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна - 2018

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий Объединённого института ядерных исследований

Научный
руководитель: кандидат физико-математических наук,
Белогуров Сергей Геннадьевич,
с.н.с. ЛИТ ОИЯИ, г. Дубна

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
Лубсандоржиев Баярто Константинович,
в.н.с ФГБУ Институт Ядерных Исследований РАН,
г. Москва

доктор физико-математических наук,
Друцкой Алексей Георгиевич,
в.н.с ФГБУ Физический институт им. П.Н. Лебедева
РАН, г. Москва

Ведущая
организация: ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова» НИЦ «КИ», г. Гатчина

Защита состоится « ____ » _____ 2018 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Дзелепова в Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института ядерных исследований или на сайте
http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 720.001.03, доктор физ.-мат. наук

Карамышева
Галина Анатольевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы:

Современные эксперименты в области физики высоких энергий и особенно столкновения релятивистских тяжелых ионов выдвигают жёсткие требования к принимаемым проектным решениям. Создаваемые установки должны быть способны измерять тонкие эффекты в присутствии высокого фона и предоставлять надёжные данные для подгонки сложных многопараметрических физических моделей. Особенно жёсткие требования предъявляют эксперименты с фиксированной мишенью, поскольку за счет релятивистского буста частицы сконцентрированы в переднем конусе, а большая плотность мишени позволяет достигать высоких частот взаимодействий.

В эксперименте Compressed Baryonic Matter (CBM), которому посвящена данная диссертация, при работе на ускорителе SIS100 пучки тяжелых ионов, например золота, будут разгоняться до энергии 10 ГэВ/нуклон и взаимодействовать с золотой фиксированной мишенью с частотой до 10^7 ядерных взаимодействий в секунду. При этом в передний конус, ограниченный полярным углом 25° , будет лететь до 400 заряженных частиц в одном соударении, а максимальная угловая плотность частиц в центральной области экспериментальной установки будет достигать 100 ср^{-1} .

Все эти факторы приводят к необходимости тщательной оптимизации конструкции установки. Для этого требуется совершенствование методов моделирования детекторов, включая реализацию высокого уровня детализации описания геометрии и развитие инструментов для быстрого модифицирования этого описания с целью выполнения итерационных расчетов. Также необходима разработка новых систем сбора данных, адекватных современному аппаратному обеспечению и ожидаемым потокам информации. Кроме того, необходимы детальные исследования прототипов создаваемых детекторов. В настоящей диссертации обсуждаются все три перечисленных аспекта в применении, в первую очередь, к детектору Черенковских колец эксперимента CBM.

Цели диссертационной работы:

- разработать инструментарий для облегчения создания детальных геометрических моделей, предназначенных для таких пакетов Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество, как GEANT и ROOT, а также для обмена геометрической информацией между этими пакетами и САПР CATIA v5;
- создать гибкое и детальное описание детектора CBM RICH в среде CbmRoot и осуществить на основе этого описания оптимизацию конструкции и компоновки данного детектора;

- создать программное обеспечение для испытания прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH в составе полнофункционального прототипа указанного детектора в пучковых тестах;
- провести исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH на основе результатов пучковых тестов и измерений на лабораторном стенде.

Научная новизна:

1. Впервые предложен подход для полуавтоматического построения детальной Монте-Карло геометрии на основе САПР-модели и быстрого обмена геометрией между САПР и пакетами Монте-Карло моделирования GEANT и ROOT. Данный подход был реализован как инструментарий “CATIA-GDML geometry builder” для САПР CATIA v5.
2. С применением разработанного инструментария получено беспрецедентно точное параметризованное описание геометрии CBM RICH, с помощью которого выполнена оптимизация компоновки и конструкции ряда систем детектора. Построены высокоточные модели ряда установок на FAIR.
3. Разработано программное обеспечение для: обработки бестриггерного потока данных с прототипа системы считывания и сбора данных CBM RICH с частотой до 20 МГц; калибровки счётчика точного времени ВЦП и относительных задержек каналов в потоке данных с детектора CBM RICH; для построения событий из потока данных с этого детектора в среде CbmRoot.
4. Собран и успешно протестирован прототип системы считывания и сбора данных CBM RICH на основе не изучавшейся ранее комбинации многоанодного ФЭУ Н12700, специально разработанных передней электроники типа предусилитель-дискриминатор и высокоточного ВЦП с последующим прямым вводом данных в единую среду моделирования, сбора и анализа данных CbmRoot. Тесты проводились как в составе полнофункционального прототипа детектора CBM RICH на пучке в CERN, так и на лабораторном стенде.
5. Для прототипа системы считывания и сбора данных впервые исследованы: стабильность коррекций относительных задержек и калибровки счётчика точного времени ВЦП; точность взаимной временной привязки на различных множествах каналов; временные свойства нанесенного на окно многоанодного ФЭУ сместителя спектра при возбуждении черенковскими фотонами; возможности работы канала считывания при пониженных порогах. Проведен сравнительный анализ особенностей

считывания многоанодного ФЭУ с системой динодов “metal channel” временным и аналоговым трактами. Продемонстрировано соответствие исследованных характеристик требованиям, предъявляемым со стороны детектора CBM RICH.

Практическая ценность работы:

Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании экспериментальных установок в области релятивистской ядерной физики и физики частиц, как в проводимых в настоящее время экспериментах на ускорителях «Нуклотрон», SPS, RHIC, LHC, так и в планируемых исследованиях на ускорительных комплексах NICA и FAIR.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

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

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается тщательным сравнением построенных Монте-Карло моделей с инженерными с применением средств САПР CATIA v5; использованием многократно протестированных и общепризнанных пакетов UrQMD, ROOT, GEANT; многочисленными проверками правдоподобности результатов моделирования и их соответствия результатам пучковых тестов как автором диссертации, так и другими участниками рабочих групп; непротиворечивым взаимодополнением результатов исследований прототипа CBM RICH и результатов, полученных с другими аналогичными приборами.

Апробация работы:

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях RICH2016, IEEE-NPSS RT2016, CHER2013, AYSS-2017, AYSS-2016, в 4-х докладах на международных совещаниях коллаборации CBM, на 2-х научных семинарах ЛИТ ОИЯИ и 3-х научных семинарах “Исследовательского центра ФАИР-Россия” (ИЦФР).

Публикации по теме работы:

Результаты работ, составивших основу диссертации, опубликованы в 12 статьях в реферируемых журналах из списка ВАК [1–12] и 9 кратких сообщениях [12–21].

Личный вклад автора:

Автор внёс решающий вклад в разработку концепции и реализацию пакета “CATIA-GDML geometry builder”, предназначенного для создания детальных геометрических моделей для Монте-Карло моделирования детекторов в GEANT и ROOT и для обмена геометрической информацией между этими средами и САПР CATIA v5.

Автором создано гибкое и детальное описание детектора CBM RICH в среде CbmRoot, на основе которого при участии автора осуществлена оптимизация конструкции и компоновки данного детектора.

Автором разработано программное обеспечение для испытания прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH в составе полнофункционального прототипа указанного детектора на пучковых тестах.

Автором проведено исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH на основе результатов пучковых тестов и измерений на специально подготовленном лабораторном стенде.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации **137** страниц текста с **102** рисунками и **9** таблицами. Список литературы содержит **109** наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается фазовая диаграмма сильновзаимодействующего вещества, даётся физическая мотивация к исследованиям столкновений тяжёлых ионов, перечислены основные наблюдаемые, доступные в соответствующих экспериментах. Также даётся краткий обзор наиболее важных действующих и планируемых экспериментов в области исследования столкновений тяжёлых ионов — STAR(RHIC), ALICE(LHC), MPD(NICA), CBM(FAIR) — с указанием энергий и частот взаимодействий и основных пунктов физической программы. Обозначено место эксперимента CBM среди рассмотренных экспериментов.

В первой главе задаётся контекст диссертационной работы. Кратко охарактеризован ускорительный комплекс FAIR, перечислены основные составляющие комплекса и направления планируемых исследований. Рассматриваются задачи и условия эксплуатации эксперимента CBM на FAIR. Кратко описаны принципы действия, компоновка и физические характеристики всех детекторных систем, специализированного аппаратно-программного комплекса сбора данных и отбора событий первого уровня FLES/DAQ и наиболее важных пассивных элементов экспериментальной установки CBM.

Далее подробно описан детектор черенковских колец (Ring Imaging Cherenkov detector, CBM RICH), предназначенный для восстановления лёгких векторных мезонов, J/ψ и ψ' -частиц, распадающихся по диэлектронному каналу. Приведён обзор некоторых ранее построенных детекторов черенковских колец, оказавших влияние на разработку CBM RICH: RICH-1 эксперимента COMPASS, RICH-1 и RICH-2 эксперимента LHCb, RICH-детектор эксперимента HERA-b. Детально описывается конструкция и характеристики детектора CBM RICH. Даются общие сведения обо всех подсистемах CBM RICH: радиатор, газовая система, система фокусировки, фоточувствительная камера. Обсуждаются процедуры реконструкции колец, частиц и событий, а также процедуры анализа данных.

В конце первой главы ставятся задачи, решаемые в диссертационной работе и описанные ниже. Для разработки CBM RICH необходима тщательная оптимизация всех основных систем, что требует многократного и детального обмена геометрической информацией между САПР CATIA v5 и пакетами Монте-Карло (МК) моделирования. Для облегчения такого обмена признано целесообразным разработать инструментарий “CATIA-GDML geometry builder” (глава 2). Для этого инструментария имеется множество задач по оптимизации конструкции и компоновки CBM RICH (глава 3). Необходимо собрать и исследовать прототип системы считывания и сбора данных CBM RICH как в пучковых тестах в составе полнофункционального прототипа детектора, так и в лабораторных условиях. Также необходимо разработать соответствующее программное обеспечение (глава 4). Необходимо проанали-

зировать результаты упомянутых тестов и исследовать вопросы, связанные с влиянием особенностей системы считывания на эффективность регистрации одиночных фотоэлектронов, временными свойствами системы считывания и возможностью повышения эффективности за счет использования сместителя спектра (глава 5).

Вторая глава посвящена обсуждению предпосылок создания и собственно разработке “CATIA-GDML geometry builder” [1, 2].

Даются основные сведения о методике геометрического моделирования в САПР и о некоторых наиболее распространённых способах представления геометрических моделей в ЭВМ — граничное представление BREP, конструктивная твердотельная геометрия CSG, полигональное геометрическое представление, конечно-элементное геометрическое представление. Обсуждаются особенности различных представлений и возможности перевода моделей из одного представления в другое.

Подробно описаны подходы, применяемые для представления геометрических моделей в пакетах МК-моделирования прохождения частиц через вещество (GEANT/ROOT). Описан независимый формат GDML для хранения и передачи геометрии в представлении GEANT/ROOT.

Обсуждается разница между способами описания геометрической информации в САПР и пакетах моделирования прохождения частиц через вещество GEANT/ROOT. Во-первых, отличается способ задания геометрических форм. В САПР применяется граничное представление (BREP), в GEANT/ROOT применяется конструктивная твердотельная геометрия (CSG), которая оперирует понятиями «примитив» и «булева операция». Во-вторых, отличается способ задания взаимоотношения форм в пространстве. В САПР присутствует некоторое бесконечное окружающее пространство без материала, а все предметы находятся в этом пространстве. В GEANT/ROOT для описания взаимоотношения форм используется иерархия объёмов. Вводится понятие объёма — сущности, имеющей форму и материал. Все объёмы, кроме самого верхнего, помещены друг в друга с некоторым позиционированием, формируя таким образом дерево объёмов.

Указанные выше кардинальные различия делают в общем случае невозможной автоматический перевод геометрических моделей между САПР и GEANT/ROOT. Это приводит к необходимости разработки инструментария для обмена геометрической информацией между САПР и GEANT/ROOT и облегчения создания детальных геометрических моделей для GEANT/ROOT.

Далее перечислены и кратко описаны некоторые существующие инструменты, предназначенные для решения проблемы обмена геометрической информацией между GEANT/ROOT и САПР — FASTRAD, CADtoROOT interface, CAD converter. Все эти инструменты имеют существенные ограничения по кругу решаемых задач, что делает актуальной разработку нового инструментария.

Концептуально пакет “CATIA-GDML geometry builder” базируется на 3-х элементах: правила соответствия сущностей CATIA v5 и сущностей геометрии в GEANT/ROOT; набор примитивов GEANT/ROOT в виде файлов с пользовательскими шаблонами формообразованиями (CATIA UDF); макропрограммы CATIA v5, реализующие необходимый функционал.

Построение модели по правилам пакета делает возможной конвертацию МК-модели из CATIA v5 во внешний GDML-файл с целью дальнейшего считывания в GEANT/ROOT. В состав пакета входят файлы шаблонов, макропрограммы, файлы настроек окружения и инструкции по применению необходимого набора стандартных средств CATIA v5.

Подробно описаны детали реализации примитивов (см. рис. 1 справа), правила построения булевых форм (см. рис. 1 слева), суть каждой макропрограммы, избранные подробности их программной реализации. Также описаны и такие продвинутые возможности GEANT/ROOT, поддерживаемые “CATIA-GDML geometry builder”, как создание параметризованных МК-моделей, и МК-моделей с применением тесселированных форм. Рассматривается возможность применения модуля оптимизации CATIA DMU Optimizer для геометрического моделирования.

Для интеграции с “CATIA-GDML geometry builder” в программные пакеты FairRoot и CbmRoot были внесены необходимые модификации.

Таким образом, реализован удобный для пользователя инструментарий для полуавтоматического создания гибкой и детальной МК-геометрии, который позволяет решать множество задач, возникающих при проектировании современных экспериментальных установок.

Третья глава посвящена применению инструментария “CATIA-GDML geometry builder”.

В **разделе 3.1** рассмотрены основные сценарии работы с инструментарием — когда МК-модель строится с нуля, на основе существующей САПР-модели и на основе существующей МК-модели. Также обсуждаются особенности поддержки МК-модели детектора с помощью “CATIA-GDML geometry builder” на этапе проектирования детектора, когда модель претерпевает многократные изменения.

В **разделе 3.2** подробно описаны геометрические МК-модели детектора CBM RICH, построенные с помощью “CATIA-GDML geometry builder”, и решаемые с их помощью задачи.

С использованием построенной автором МК-модели была оптимизирована геометрия сферических зеркал в целом [9], см. рис. 2. В исходном варианте каждое из двух зеркал было симметрично относительно плоскости, проходящей через центр сферы [15]. Каждое зеркало было повернуто относительно горизонтальной оси, перпендикулярной оси пучка. По нашему предложению осуществлён переход к особой форме, позволяющей стыковать два зеркала

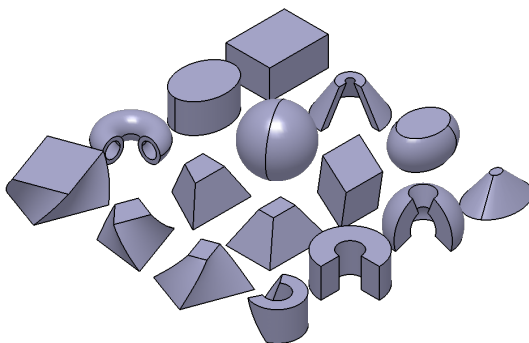
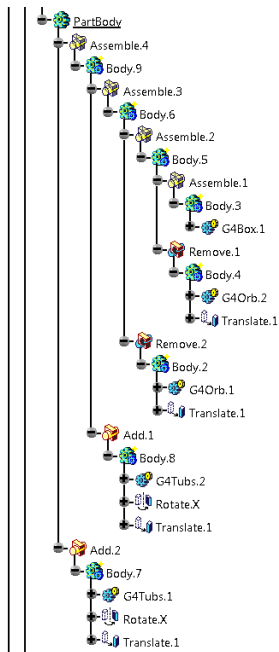


Рис. 1: Дерево построения Булевой операции, представленной в CATIA по правилам “CATIA-GDML geometry builder”, (слева) и некоторые примитивы, реализованные в “CATIA-GDML geometry builder” с помощью пользовательских шаблонов CATIA (справа).

без зазора. Новые зеркала не требуют поворота, т.к. они имеют форму соответствующего сегмента сферы. Такая модификация позволила увеличить геометрическую эффективность на несколько процентов.

Подробно описана модель зеркал с разбиением на сегменты. Эта модель позволила корректно учесть влияние зазоров между сегментами на эффективность регистрации черенковских колец.

Построена сложная и гибкая модель, позволяющая индивидуально позиционировать каждый сегмент зеркала. Сопоставление результатов МК-моделирования СВМ RICH, выполненных с применением этой модели, с экспериментальными данными позволили разработать методику коррекции неидеальностей позиционирования сегментов зеркал и повысить эффективность детектора [7, 9, 12].

Описана процедура геометрического моделирования пассивных конструкций с сохранением эквивалентного количества материала на примере модели механических креплений зеркал и корпуса детектора СВМ RICH [19]. Эта МК-модель позволила оценить влияние пассивных конструкций RICH на детекторы, стоящие далее по пучку [6, 20], в результате чего конструкция механических креплений была признана недопустимо массивной и была поставлена задача на разработку новой более лёгкой конструкции [9].

Описаны построенные модели фоточувствительной камеры СВМ RICH,

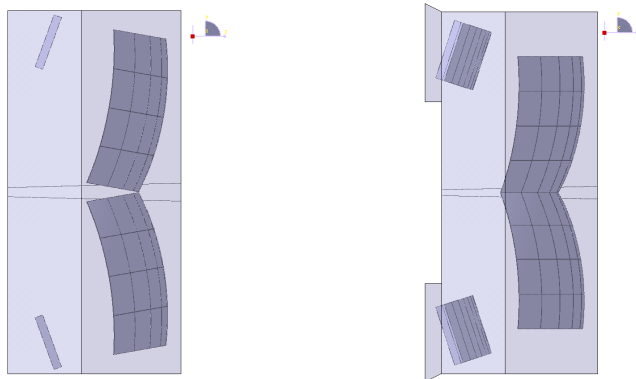


Рис. 2: Модель зеркал с зазором (слева) и без зазора (справа). В обоих случаях линия, соединяющая центр сферической поверхности и середину зеркала, наклонена на 10° относительно горизонтали. Отсутствие зазора в новой версии достигается выбором более подходящей доли сферы.

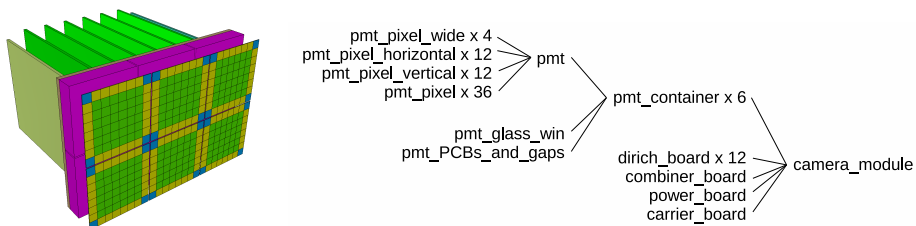


Рис. 3: МК-модель модуля фоточувствительной камеры CBM RICH (слева) и иерархия объёмов данной модели (справа).

состоящей из модулей [15]. МК-модель одного модуля, состоящая из 6 многоанодных (МА) ФЭУ и плат электроники, представлена на рис. 3 (слева), а иерархия объёмов данной модели — на рис. 3 (справа). МА ФЭУ моделируется до уровня пикселей, что даёт возможность максимально приблизить формат результатов моделирования прохождения частиц к формату поступающих с детектора данных для последующей реконструкции событий [21].

Рассмотрены возможные компоновки фоточувствительной камеры [6], [9]. Проведено сравнение характеристик CBM RICH при переходе от версии геометрии «v16», в которой фоточувствительная камера составлена из двух плоскостей, к версии «v17», в которой фоточувствительная камера состоит из 14 более узких плоских вертикальных полосок, аппроксимирующих цилиндрическую поверхность. Некоторые из характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1: Сравнение характеристик двух версий геометрии CBM RICH («v16» и «v17») в конфигурации для SIS100. В случае SIS300 наблюдается сопоставимое повышение эффективности.

Характеристика	«v16»	«v17»
Геометрический аксептанс, %	88.9	89.9
Радиус кольца R , см., mean/rms	4.800/0.333	4.850/0.284
Отклонение хита от кольца, см., mean/rms	0.031/0.324	0.027/0.301
Эллиптичность B/A , mean/rms	0.914/0.044	0.937/0.036
Эфф. идентиф. e^{\pm} , %	83.9	85.0
Фактор подавления π -мезонов	665.3	735.1
Расстояние трек-кольцо, e^{\pm} , см., mean/rms	0.365/0.511	0.319/0.456

Видно, что версия «v17» превосходит версию «v16» по всем параметрам: увеличиваются геометрический аксептанс, эффективность идентификации частиц, фактор подавления π -мезонов, уменьшается эллиптичность колец и т.д. В результате этой работы для дальнейшей реализации была выбрана цилиндрическая форма камеры [13].

Обсуждается магнитный экран, предназначенный для снижения магнитного поля в области фоточувствительной камеры [9, 16]. Построенная модель магнитного экрана позволила своевременно обнаружить и исключить проникновение элементов конструкции в область распространения черенковских фотонов, отражённых от сферического зеркала.

В разделе 3.3 рассмотрены случаи применения того же инструментария для других подсистем эксперимента CBM и ряда других экспериментов. Построены следующие МК-модели: рама электромагнитного калориметра CBM ECAL, две версии дипольного магнита CBM, корпус широкоапертурного магнита GLAD эксперимента R3B. Также проведён анализ опыта использования инструментария другими пользователями в процессе работы над мюонной системой эксперимента CMS и мюонной системой эксперимента PANDA.

Таким образом, с использованием “CATIA-GDML geometry builder” были построены гибкие и детальные МК-модели CBM RICH, используемые участниками коллаборации для решения различных задач, связанных с оптимизацией компоновки и конструкции детектора. Решение таких задач приводит в конечном итоге к повышению эффективности и надёжности разрабатываемого детектора CBM RICH.

В четвёртой главе описаны архитектура бестриггерной системы считывания и сбора данных CBM RICH, программные модули, необходимые для сбора и анализа данных, а также экспериментальные установки, позволив-

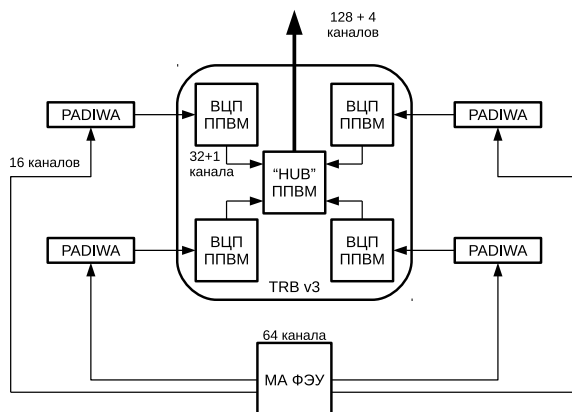


Рис. 4: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

шие осуществить всестороннее исследование прототипа указанной системы [3, 4, 18], описанное в 5 главе.

Приведены основные характеристики МА ФЭУ H12700. Особый акцент сделан на временные свойства, влияющие на характеристики CBM RICH. Отмечены особенности, нетипичные для одноканального ФЭУ.

Подробно описан 64-канальный модуль считывания одного МА ФЭУ (см. рис. 4), состоящий из предусилителя-дискриминатора PADIWA и время-цифрового преобразователя (ВЦП) в составе многофункциональной платы TRB v3. Описаны принципы регистрации времени в используемом ВЦП вместе с общей информацией о калибровке счётчика точного времени.

Приведено краткое описание экспериментальной установки на пучковых тестах на выводе T9 пучка PS в CERN с подробным описанием прототипа RICH, см. рис. 5 [11, 5]. Дается подробная схема системы считывания и сбора данных прототипа RICH, см. рис. 6. Далее приведено подробное описание лабораторного стенда, собранного для детального исследования особенностей функционирования модуля считывания.

Описана последовательность процедур программной обработки данных, поступающих с детектора CBM RICH: распаковка данных, калибровка счётчика точного времени ВЦП и коррекция относительных задержек между каналами, построение хита (точки регистрации фотона в фотодетекторе), построение события (совокупности хитов, относящихся к одному первичному взаимодействию), поиск и реконструкция колец, анализ данных. Все перечисленные модули, за исключением реконструкции, были разработаны автором, причём для коррекции задержек между каналами считывания был предложен оригинальный алгоритм.

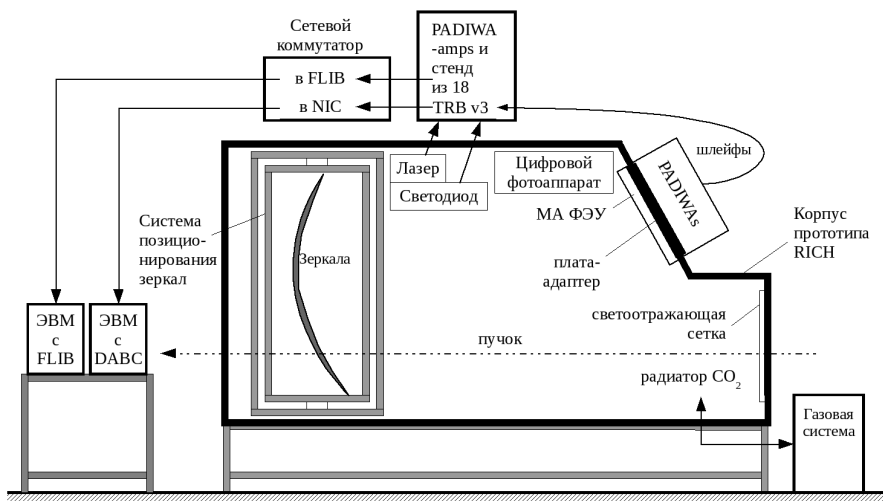


Рис. 5: Схема прототипа детектора RICH.

В *пятой главе* исследуются свойства прототипа системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH [3, 4]. Прототип включает в себя новые, недостаточно изученные элементы, собранные в оригинальную цепочку, также нуждающуюся в изучении. Полученные в этой главе результаты позволяют лучше понять возможности и ограничения системы считывания и сбора данных, что важно для достижения её наилучших эксплуатационных характеристик.

В **разделе 5.1** обсуждается работоспособность концепции формирования временных интервалов и ввода данных в компьютер с использованием платы FLIB [3]. Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами сбора данных, см. рис. 6. Было проведено побайтное сравнение результатов распаковки обоих потоков. Констатируется, что на массиве, составляющем примерно 10^7 сообщений, расхождений не выявлено, что подтверждает возможность использования архитектурного решения, выбранного коллаборацией СВМ для обработки большого потока данных.

Раздел 5.2 посвящён особенностям счётчика точного времени ВЦП, использовавшегося в данной работе. Этот ВЦП разрабатывается не только для СВМ RICH, но и для других установок на FAIR, некоторые из которых, например, время-пролётные детекторы, предъявляют более жёсткие требования к временному разрешению. Счётчик точного времени выполнен по технологии цифровой линии задержки с отводами и имеет некоторые особенности, которые были изучены автором. Понимание этих особенностей позволяет использовать информацию о точном времени более эффективно. Исследованы

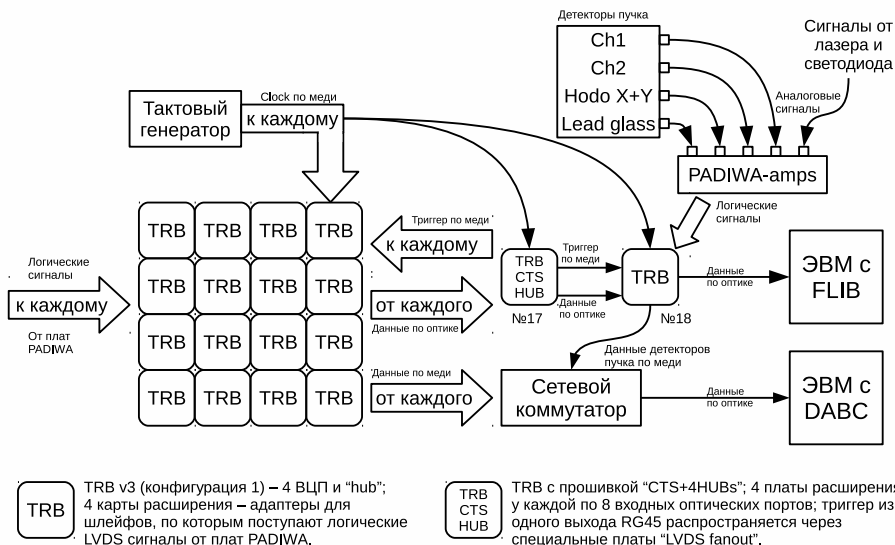


Рис. 6: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

форма и стабильность типичной функции калибровки [4, 5]. Предложена методика аппроксимации функции калибровки. Исследовано влияние на временное разрешение замены точной функции калибровки на индивидуальную или усреднённую кусочно-линейную аппроксимацию. Установлено, что разрешение ВЦП при использовании точной калибровочной функции составляет 21 пс, при использовании индивидуальной аппроксимации — 70 пс, при использовании усредненной аппроксимации — 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах. Отметим, что любой из этих способов калибровки применим в СВМ RICH, где основные вклады во временное разрешение вносят флуктуации развития сигнала в МА ФЭУ и дрейф задержек между каналами.

В разделе 5.3 обсуждаются распределения разностей временных отметок и полученная на их основе коррекция относительных задержек между каналами считывания [4, 3], что необходимо для построения событий. Поправки, рассчитанные по разным наборам данных, изменяются не более чем на 0.5 нс. Наблюдается аддитивность средних задержек с точностью не хуже 400 пс. Выявлено наличие до 10% дефектных каналов. Показано, что применение коррекции задержек необходимо для достижения предельного временного разрешения системы считывания, обсуждаемого в следующем разделе.

В разделе 5.4 предложен оригинальный метод определения точности взаимной временной привязки на большой совокупности каналов системы

Таблица 2: FWHM и RMS распределений разностей временных отметок сигналов от одновременных фотонов при различных наборах исследуемых каналов. Все значения в нс, кроме кол-ва каналов.

Анализируемая область	Пара каналов	Плата PADIWA	Один МА ФЭУ	Четыре МА ФЭУ
Кол-во каналов	2	14	39	131
FWHM, кольца, без WLS	0.40	0.60	0.80	1.05
RMS, кольца, без WLS	0.66	0.58	0.62	0.79
FWHM, кольца, с WLS	0.55	0.75	0.95	1.25
RMS, кольца, с WLS	1.48	1.35	1.35	1.47
FWHM, лазер	0.70	1.05	1.30	1.55
RMS, лазер	0.83	0.79	0.85	1.04

считывания [5]. Впервые в качестве источника одновременных сигналов были использованы черенковские кольца. Обсуждаются результаты, полученные для трёх классов событий: с сигналами от черенковских колец без сместителя спектра (WLS) на поверхности МА ФЭУ, с сигналами от черенковских колец с WLS на МА ФЭУ и с сигналами от вспышек лазера, см. таблицу 2 и работу [14]. Эти данные необходимы для правильного формирования события на основании временных отметок при эксплуатации СВМ RICH с максимальной эффективностью регистрации колец. Показано, что разброс времени прохождения лавины в МА ФЭУ и нестабильность задержек вносят сравнимые вклады в ошибку взаимной временной привязки сигналов.

В **разделе 5.5** описано исследование временного профиля высвечивания сместителя спектра пара-терфенила [5, 3, 10, 17], см. рис. 7. Для проведения исследования разработан и проверен на математической модели оригинальный метод, основанный на анализе черенковских колец. Получены следующие характерные времена высвечивания: 1.4 нс, 3.8 нс и 45 нс. Приводится сравнение с результатами, полученными с помощью классического метода счёта фотонов при возбуждении светом с длиной волны 280 нм. Наблюдается снижение вклада медленной компоненты при возбуждении сместителя спектра черенковскими фотонами. Полученные результаты позволяют оптимизировать длительность окна, в пределах которого хиты считаются одновременными и могут быть приписаны одному событию. Увеличение окна ведёт, с одной стороны, к росту числа хитов в кольце, что облегчает его поиск, а с другой — к росту случайных хитов, что затрудняет поиск и реконструкцию кольца. Характерные значения таковы: прирост количества хитов в $\sim 20\%$ может быть достигнут при окне шириной 15 нс.

В **разделе 5.6** обсуждаются результаты измерения времени-над-порогом (ToT) с помощью разрабатываемой системы считывания и с помощью осциллографа [4, 3]. Продемонстрировано, что распределения ToT имеют много-

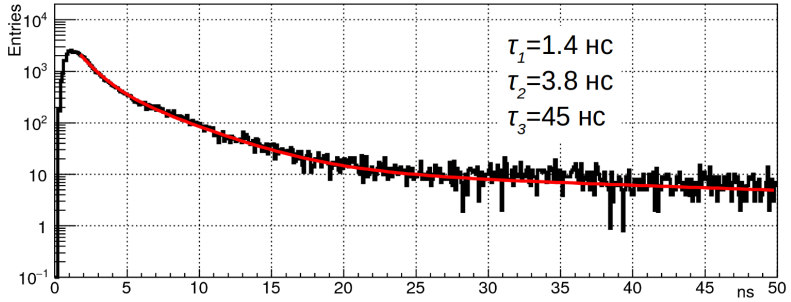


Рис. 7: Временной профиль высвечивания сместителя спектра и результат его фитирования суммой трёх экспонент.

пиковую структуру. Это говорит о несовершенстве текущей версии электроники и невозможности снижения порога регистрации за счет ограничения на величину ToT сигнала. Результаты данной работы приняты во внимание при разработке следующей версии прототипа платы считывающей электроники [8].

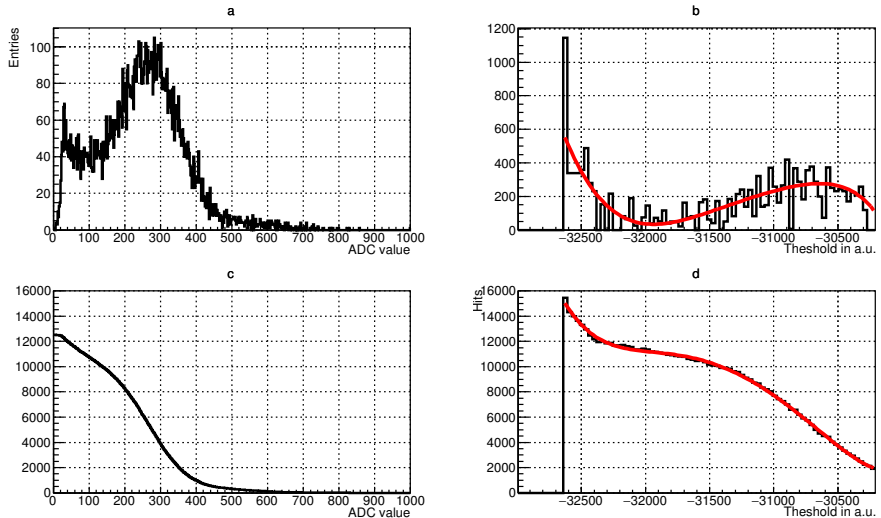


Рис. 8: Сравнение (а) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (b) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRV v3; сравнение (c) интеграла одноэлектронного спектра и (d) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

Раздел 5.7 посвящен сравнительному анализу амплитудных спектров сигналов одиночных фотоэлектронов с МА ФЭУ H12700, полученных с помощью амплитудного многоканального тракта на основе микросхемы n-ХУТЕР и с помощью прототипа модуля считывания СВМ RICH, использующего только временные отметки. В последнем случае применен метод, заключающийся в дифференцировании зависимости скорости счета от порога регистрации [3]. Обсуждаются особенности такого спектра для МА ФЭУ с системой динодов “metal channel”, наблюдаемые при обоих способах регистрации, и отличия в области малых амплитуд, где сигналы от одиночных электронов сливаются с шумами. Констатируется нецелесообразность повышения эффективности регистрации за счёт снижения порога при использовании прототипа системы считывания СВМ RICH.

Отметим, что выявленные в ходе работ проблемы не критичны для СВМ RICH и не препятствуют поиску колец. Тем не менее, устранение этих проблем приведет к улучшению разделения сигналов и шумов и к повышению эффективности детектора, что поможет создать необходимый запас надежности для долговременной работы детектора в условиях постепенной деградации оптических свойств радиатора, зеркал и фотодетекторов.

В заключении приводятся следующие основные результаты работы:

1. Разработан набор инструментов “CATIA-GDML geometry builder”, облегчающий создание детальных геометрических моделей, предназначенных для таких пакетов Монте-Карло (МК) моделирования прохождения частиц через вещество, как GEANT и ROOT, а также для обмена геометрической информацией между этими пакетами и САПР CATIA v5.
2. Создано гибкое и детальное описание детектора RICH эксперимента СВМ в среде CbmRoot. Проведена оптимизация конструкции и компоновки данного детектора: выбраны оптимальные параметры для камеры, аппроксимирующей цилиндрическую поверхность; предложена новая форма зеркал, которая позволяет увеличить геометрическую эффективность RICH на несколько процентов; выполнена оптимизация положения и конструкции магнитного экрана; чтобы оценить влияние пассивного материала были максимально точно смоделированы механические конструкции; создана параметризованная геометрическая МК-модель RICH-секции ионопровода. Созданы детальные геометрические МК-модели различных элементов для экспериментов СВМ, R3B, PANDA на FAIR.
3. Разработано программное обеспечение для: приёма и обработки бес-триггерного потока данных, калибровки счётчика точного времени и относительных задержек каналов, для построения хитов и событий. Собран и протестирован прототип системы считывания и сбора данных

детектора CBM RICH на основе многоанодного ФЭУ H12700, специально разработанных передней электроники типа предусилитель-дискриминатор и высокоточного ВЦП с последующим прямым вводом данных в единую среду моделирования, сбора и анализа данных CbmRoot. Тесты проводились как в составе полнофункционального прототипа детектора CBM RICH на пучке в CERN, так и на лабораторном стенде.

4. Продемонстрирована работоспособность концепции формирования временных интервалов и ввода данных в компьютер с использованием платы FLiB. Выполнен анализ влияния калибровки счётчика точного времени ВЦП на временное разрешение системы считывания CBM RICH. Проведена оценка стабильности калибровки. Разработана методика коррекции относительных задержек между каналами.
5. Определена точность взаимной временной привязки для разного количества каналов (от 2 до 256) для событий, содержащих сигналы от вспышек лазера (от 0.49 нс до 1.09 нс) и от черенковских колец при наличии сместителя спектра (WLS) (от 0.39 нс до 0.88 нс) и его отсутствии (от 0.28 нс до 0.74 нс). Использование WLS позволяет увеличить количество зарегистрированных фотонов в кольце на $\sim 19\%$.
6. Исследованы временные свойства WLS, нанесённого на окно многоанодного ФЭУ, при возбуждении черенковскими фотонами. Показано, что временной профиль имеет три экспоненциальные компоненты с характерными временами 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и относительными интенсивностями 2.17, 1.00, 0.22.
7. Исследована возможность использования времени-над-порогом (ToT) для повышения эффективности регистрации фотонов. Выявлено, что спектры ToT имеют многопиковую структуру, что говорит о несовершенстве текущей версии электроники и невозможности снижения порога регистрации за счет ограничения на величину ToT сигнала. Полученные результаты используются при разработке следующего поколения прототипа системы считывания.
8. Проведён сравнительный анализ особенностей считывания многоанодного ФЭУ с системой динодов "metal channel" временным (PADIWA + TRB v3) и аналоговым (n-XYTER) трактами. Разработан метод получения одноэлектронного спектра ФЭУ с помощью счётчика зарегистрированных фронтов в системе считывания без регистрации амплитуды. Установлено, что в этом спектре имеются особенности, препятствующие повышению эффективности за счёт снижения порога.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- [1] *S. Belogurov, Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko, A. Semennikov* // J. Phys.: Conf. Ser. **331**, 032035 (2011)
- [2] *S. Belogurov, Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko, V. Schetin* // J. Phys.: Conf. Ser. **513**, 022003 (2014)
- [3] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Приборы и техника эксперимента, №3 (2018)
- [4] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Phys. Part. Nuclei Lett. **14**, no. 6, pp. 904–912 (2017)
- [5] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A876**, pp. 246–248 (2017)
- [6] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A876**, pp. 65–68 (2017)
- [7] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A876**, pp. 119–122 (2017)
- [8] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A845**, pp. 434–438 (2017)
- [9] *J. Adamczewski-Musch et al.* // JINST **11**, no. 05 C05016 (2016)
- [10] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A783**, pp. 43–50 (2015)
- [11] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A766**, pp. 101–106 (2014)
- [12] *J. Adamczewski-Musch et al.* // NIM **A766**, pp. 221–224 (2014)
- [13] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne* // CBM Progress Report 2016, pp. 66–67, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)
- [14] *E. Ovcharenko, S. Belogurov, C. Pauly* // CBM Progress Report 2016, p. 76, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)
- [15] *E. Ovcharenko et al.* // CBM Progress Report 2015, p. 47, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [16] *E. Ovcharenko et al.* // CBM Progress Report 2015, p. 53, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [17] *E. Ovcharenko, S. Belogurov, C. Pauly* // CBM Progress Report 2015, pp. 60–61, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [18] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne* // CBM Progress Report 2014, p. 64, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [19] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne, Yu. Ryabov* // CBM Progress Report 2014, p. 65, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [20] *E. Ovcharenko et al.* // CBM Progress Report 2013, p. 97, ISBN 978-3-9815227-1-6, GSI, Darmstadt (2014)
- [21] *S. Lebedev, C. Höhne, E. Ovcharenko* // CBM Progress Report 2015, p. 119, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)