

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 CBM

Специальность 01.04.01 —
приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. С.Г. Белогуров

Дубна - 2018

Содержание

Введение	6
1 Эксперимент CBM и особенности детектора CBM RICH	18
1.1 Эксперимент CBM	18
1.1.1 Ускорительный комплекс FAIR	18
1.1.2 Экспериментальная установка CBM	19
Вакуумная камера, мишень и ионопровод	22
Вершинный микродетектор MVD	22
Кремниевая трековая система STS	23
Дипольный магнит	25
Детектор черенковских колец RICH	25
Мюонная система MUCH	26
Детектор переходного излучения TRD	26
Время-пролётный детектор TOF	27
Электромагнитный калориметр ECAL	28
Детектор непроявившихся осколков PSD	29
Система считывания и сбора данных эксперимента CBM	30
Система отбора первого уровня FLES	30
1.2 Детектор RICH эксперимента CBM	32
1.2.1 Обзор некоторых реализованных детекторов черенковских колец	32
Детектор RICH-1 эксперимента COMPASS	32
Детекторы RICH-1 и RICH-2 эксперимента LHCb	34
Детектор RICH эксперимента HERA-b	36
1.2.2 Особенности детектора RICH эксперимента CBM	37
Радиатор	38
Газовая система	39
Система фокусировки	39
Фотодетекторы	39
Реконструкция и анализ CBM RICH	40
1.3 Некоторые задачи, связанные с разработкой детектора RICH эксперимента CBM	43
2 “CATIA-GDML geometry builder”	44
2.1 Представление геометрической информации в различных видах ПО	44
2.1.1 Дерево построений	44
2.1.2 Граничное представление BREP	45
2.1.3 Конструктивная твердотельная геометрия CSG	46
2.1.4 Полигональное геометрическое представление	47
2.1.5 Конечно-элементное (КЭ) геометрическое представление	47
2.2 Соотношение различных представлений	48
2.2.1 Обмен геометрической информацией	48

2.2.2	Возможности автоматического перевода между представлениями	49
	Конвертация CSG в BREP	50
	Конвертация BREP в полигональное представление	50
	Конвертация BREP в FEM	50
	Конвертация BREP в CSG	50
	Конвертация полигональной геометрии в BREP	51
2.3	Представление геометрии в GEANT/ROOT	51
2.3.1	Geometry Description Markup Language (GDML)	53
2.4	Сравнение представления геометрии в GEANT/ROOT и САПР	54
2.5	Инструменты передачи геометрии	55
2.5.1	FASTRAD	55
2.5.2	CADtoROOT interface	55
2.5.3	CAD converter	55
2.6	Инструментарий “CATIA-GDML geometry builder”	55
2.6.1	Примитивы в “Builder”	56
2.6.2	Булевы операции	59
2.6.3	Тесселированная геометрия	60
2.6.4	Параметризация	61
2.6.5	Макропрограммы для CATIA v5	62
	«AddNewPart»	62
	«AddShape»	62
	«Poly»	63
	«Inserter»	63
	«ArrayMaker»	63
	«Replica»	63
	«PointToPointAligner»	64
	«Mover»	64
	«Measure»	64
	«MaterialsManager»	65
	«Checker»	65
	«CATIA2GDML»	66
	«GDML2CATIA»	67
	«Duplicator»	67
	«Primitive creator»	67
	«MultiLevelViewer»	69
2.6.6	Применение CATIA DMU Optimizer для построения МК-геометрии	70
2.6.7	Адаптация FairRoot для работы с GDML	70
2.6.8	Избранные подробности реализации “CATIA-GDML geometry builder”	71
	Переменные окружения	72
	Работа с матрицами позиционирования в “CATIA-GDML geometry builder”	72
3	Применение “CATIA-GDML geometry builder”	76
3.1	Основные сценарии работы с “CATIA-GDML geometry builder”	76
3.1.1	Создание МК-модели с нуля	76
3.1.2	Создание МК-модели на основе существующей САПР-модели	76
3.1.3	Создание МК-модели на основе существующей МК-модели	77
3.1.4	Поддержка МК-модели с помощью “Builder” на протяжении процесса проектирования детектора	77
3.2	Применение “CATIA-GDML geometry builder” к СВМ RICH	78
3.2.1	Фокусирующая система — сферические зеркала	78

	Форма сферических зеркал в целом	78
	Модели сегментированного зеркала	79
	Модель с индивидуальными отклонениями сегментов зеркал	81
3.2.2	МК-геометрия механических конструкций RICH	82
3.2.3	Фоточувствительная камера	84
	Модель с примитивным фотодетектором	85
	Модели с подробной реализацией фотодетектора	85
3.2.4	Магнитный экран	88
3.2.5	Ионопровод	89
3.2.6	Анализ характеристик детектора CBM RICH	90
3.3	Применение “CATIA-GDML geometry builder” за пределами CBM RICH	93
3.3.1	Рама CBM ECAL	93
3.3.2	Магнит CBM	94
3.3.3	R3B GLAD	95
3.3.4	Мюонная система эксперимента CMS	96
3.3.5	Мюонная система эксперимента PANDA	97
4	Прототип системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH	99
4.1	Особенности МА ФЭУ Н12700	99
4.2	Архитектура 64-канального модуля считывания	100
4.2.1	Плата предусилитель-дискриминатор PADIWA	101
4.2.2	Многофункциональная плата TRB v3	102
4.2.3	Особенности измерения точного времени	104
4.3	Экспериментальные установки	106
4.3.1	Экспериментальная установка на пучковых тестах	106
4.3.2	Лабораторный стенд	110
4.4	Программное обеспечение	111
4.4.1	Распаковка	111
4.4.2	Калибровка счётчика точного времени	112
4.4.3	Коррекция задержек между каналами	112
4.4.4	Построение хита	113
4.4.5	Построение события	114
4.4.6	Реконструкция	116
5	Исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH	117
5.1	Испытание системы сбора данных с использованием платы FLIB	117
5.2	Калибровка счётчика точного времени	117
5.3	Определение коррекций задержек между каналами	120
5.4	Временное разрешение	121
5.5	Исследование профиля высвечивания сместителя спектра	123
5.6	Время над порогом	126
5.7	Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании	127
	Заключение	130
	Список литературы	132

Список сокращений

- ALICE — A Large Ion Collider Experiment
- BREP — Boundary REPresentation, граничное представление
- CAD — Computer-aided design
- CATIA — Computer Aided Three-dimensional Interactive Application
- CBM — Compressed Baryonic Matter, сжатая барионная материя
- CSG — Constructive Solid Geometry, конструктивная твердотельная геометрия
- DAQ — Data AcQuisition, сбор данных
- ECAL — Electromagnetic CALorimeter, электромагнитный калориметр
- FAIR — Facility for Antiproton and Ion Research, центр по исследованию протонов и антипротонов
- FLES — First Level Event Selector, система отбора событий первого уровня
- FLIB — FLES Interface Board, плата интерфейса системы отбора первого уровня
- GDML — Geometry Description Markup Language
- GEANT — GEometry ANd Tracking
- HERA-b — Hadron-Electron Ring Accelerator beauty
- LHC — Large Hadron Collider, большой адронный коллайдер
- LHCb — LHC beauty experiment
- MPD — Multi-Purpose Detector
- MUCH — MUon CHambers, мюонные камеры
- MVD — Micro Vertex Detector, вершинный микродетектор
- NICA — Nuclotron-based Ion Collider fAcility, коллайдерный комплекс на базе нуклотрона
- PANDA — antiProton ANnihilation in DArmstadt
- PSD — Projectile Spectator Detector
- RHIC — Relativistic Heavy Ion Collider, релятивистский коллайдер тяжёлых ионов
- RICH — Ring Imaging CHerenkov detector, детектор черенковских колец
- SIS — SchwerIonenSynchrotron, синхротрон тяжёлых ионов
- STS — Silicon Tracking System, кремниевая трековая система
- TOF — Time Of Flight detector, времяпролётный детектор
- TRD — Transition Radiation Detector, детектор переходного излучения
- МА ФЭУ — МногоАнодный Фотоэлектронный Умножитель
- МК — Монте-Карло
- САПР — Система Автоматизированного ПРоектирования

Введение

Исследование уравнения состояния ядерного вещества — одна из важнейших задач современной физики. В обычных условиях ядерная материя существует в виде нейтронов и протонов, связанных друг с другом благодаря сильному взаимодействию. Имеющиеся теоретические модели сильного взаимодействия предсказывают, что при изменении плотности и температуры изменяется состояние ядерного вещества, возможен фазовый переход нормального ядерного вещества в так называемую кварк-глюонную плазму (КГП), а также восстановление киральной симметрии. Состояние КГП характеризуется нарушением целостности нуклонов и образованием в более-менее протяжённой области пространства среды, состоящей из множества свободных кварков и глюонов, взаимодействующих друг с другом и способных перемещаться на значительные расстояния. Таким образом воплощается явление деконфайнмента. Предсказывается, что фазовый переход между адронным газом, частным случаем которого является нормальная ядерная материя, и КГП имеет при низких температурах и высоких плотностях вид перехода первого рода, а при высоких температурах — второго. Совокупность теоретических представлений по данному вопросу качественно отображается на фазовой диаграмме барионной материи, см. рис. 1. Здесь по горизонтальной оси отложен барионный химический потенциал μ_B , связанный с плотностью барионов ρ_B , а по вертикальной — температура T . Область высокой температуры и малой плотности соответствует ранней вселенной, когда нуклоны еще не были сформированы. Область больших плотностей и малых температур реализуется в глубине нейтронных звезд. В земных условиях получение сгустка ядерного вещества с повышенными температурой и плотностью, так называемого файерболла (fireball), возможно в столкновениях тяжёлых ионов. Теория, описывающая сильные взаимодействия, — квантовая хромодинамика (КХД) — еще далека до завершения и нуждается в расширении эмпирической базы. Актуальные экспериментальные исследования направлены на установление границы между барионной материей, состоящей из адронов, и КГП, локализацию на фазовой диаграмме критической точки, в которой сходятся ветви, соответствующие двум типам перехода, и исследование свойств материи в доступных областях фазовой диаграммы [1].

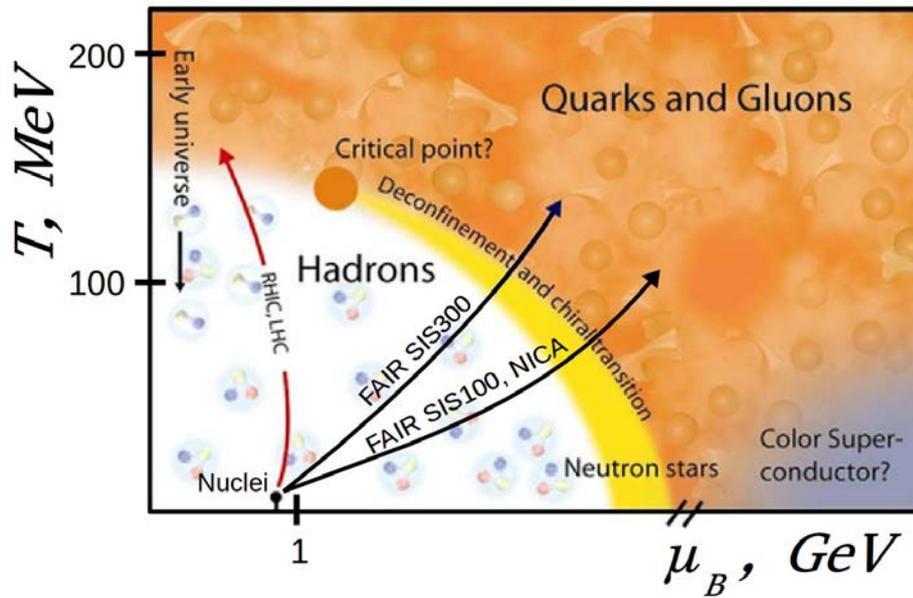


Рис. 1: Фазовая диаграмма барионной материи, по мотивам [2].

При столкновении тяжёлых ионов файербол последовательно эволюционирует, достигая на каком-то этапе состояния с максимальной плотностью и значительной степенью термализации вещества. В этот момент испускаются некоторые проникающие частицы, несущие информацию о наиболее интересной фазе взаимодействия. Другие частицы “вымораживаются” (freeze-out) на более поздних этапах столкновения, их индивидуальные и коллективные параметры несут информацию о состоянии ядерного вещества в разное время после столкновения первичных ионов. На рис. 2 показана схема эволюции файерболла, образованного при столкновении двух тяжёлых ионов.

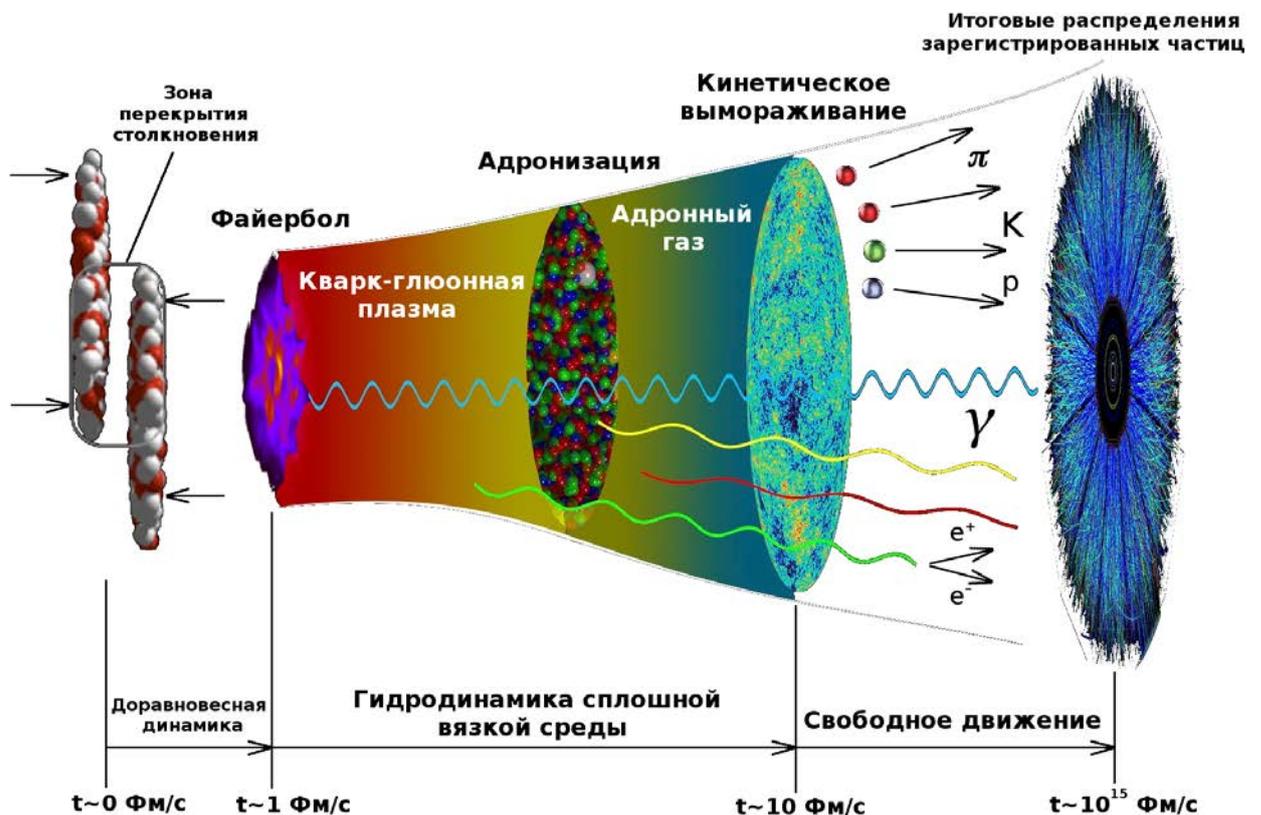


Рис. 2: Этапы столкновения релятивистских тяжёлых ионов [3].

Наибольший интерес для экспериментального исследования представляют следующие наблюдаемые.

- Выходы и спектры адронов, содержащих легкие кварки и рождающихся в больших количествах (π^+ , π^- , p), несущие информацию о таких термодинамических параметрах, как давление и температура в момент адронизации.
- Выходы и спектры странных и очарованных адронов, которые должны быть чувствительны к явлению деконфайнмента.
- Анизотропия выходов и спектров (эллиптический и направленный потоки) адронов, содержащих u , d и s кварки. Эти наблюдаемые чувствительны к гидродинамическим параметрам среды, таким как вязкость и градиенты давления.
- Корреляции адронов, содержащих легкие и странные кварки, позволяющие исследовать пространственно-временную структуру области формирования идентичных частиц.
- Выходы прямых фотонов и дилептонные распады лёгких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ) и частиц со скрытым очарованием (J/ψ , ψ'), несущие информацию о состоянии файербола на ранних стадиях столкновения.
- Выходы странных и очарованных частиц вблизи порога рождения. Эти наблюдаемые несут информацию о коллективных взаимодействиях партонов.
- Значительные, превышающие статистически ожидаемые, флуктуации от события к событию выходов адронов, содержащих различные ароматы кварков. Такие флуктуации являются индикатором достижения критической точки.
- Модификация масс адронов, рождающихся и распадающихся в плотной среде. Эта модификация может свидетельствовать о восстановлении киральной симметрии при высоких плотностях.
- Выходы гиперонов, содержащих более одного странного кварка, и их античастиц, гиперядер, тяжёлых мультистранных короткоживущих объектов. Эти частицы могут образовываться в процессах рассеяния странных частиц, рождённых в соударении тяжёлых ионов, а потому чувствительны к локальным флуктуациям плотности и диффузии странности в плотной среде.

Исследование неравномерности поведения перечисленных наблюдаемых в зависимости от массы сталкивающихся ядер и их суммарной энергии в системе центра масс (а также от центральности соударений) может позволить обнаружить признаки фазовых переходов.

На рис. 3 показана вероятность рождения различных регистрируемых и восстанавливаемых частиц при центральном столкновении ионов золота при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон. Вероятность представлена как произведение полной множественности вторичных частиц на относительную вероятность рождения данной частицы. В правой части рисунка находятся частицы, регистрация которых требует максимальной статистики.

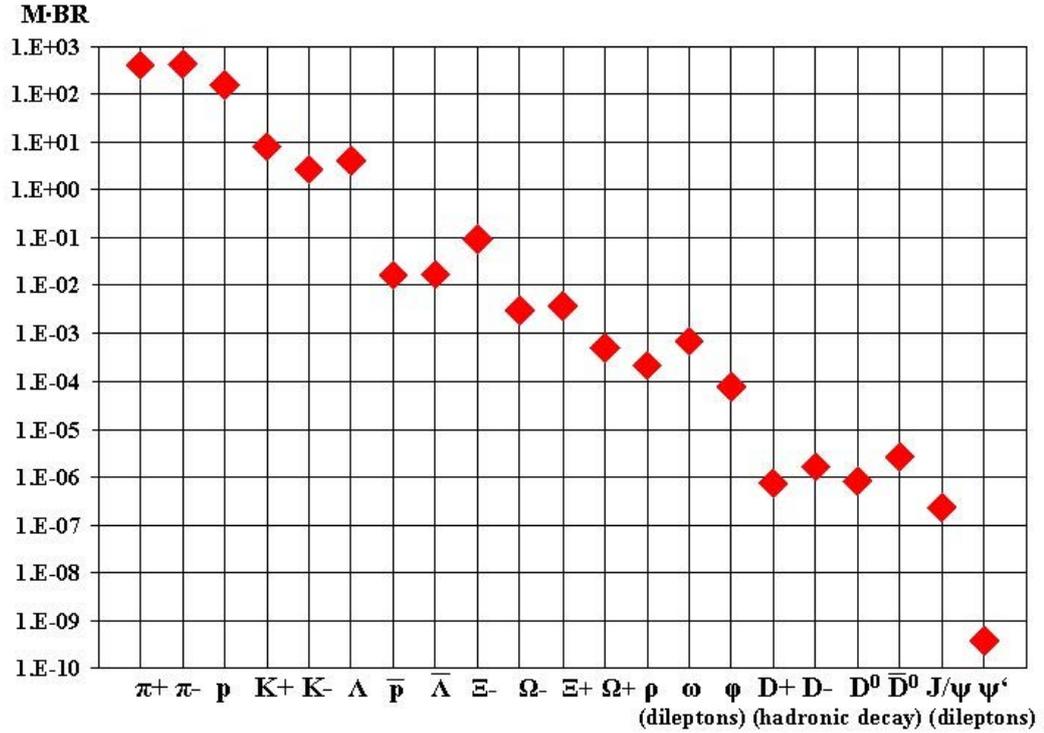


Рис. 3: Основные наблюдаемые CBM [1]. По горизонтальной оси — восстанавливаемая частица, по вертикальной — произведение множественности на коэффициент ветвления, характеризующее ожидаемую статистику.

Наиболее важные действующие эксперименты в области исследования столкновений тяжёлых ионов — это STAR на ускорителе релятивистских тяжёлых ионов (RHIC) в Брукхейвене, США, и ALICE на большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, LHC) в CERN, Женева, Швейцария. Отметим также эксперименты меньшего масштаба NA61 (North Area 61 a.k.a. SHINE — SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment) на синхротроне SPS в CERN, HADES (High Acceptance DiElectron Spectrometer) — эксперимент на SIS18 в GSI, Дармштадт, Германия, BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — эксперимент на нуклотроне в ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна, Россия, Из строящихся экспериментов наиболее важны MPD на ионном коллайдере NICA в Дубне и CBM на ускорительном комплексе FAIR в Дармштадте, Германия. Обсудим некоторые из этих экспериментов подробнее.

Релятивистский коллайдер тяжёлых ионов (The Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) расположен в Брукхейвенской национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory, BNL), штат Нью-Йорк, США. Первоначально RHIC проектировался для достижения максимально высоких энергий столкновения и предоставлял $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ/нуклон, что соответствует формированию горячей ядерной материи с низкой плотностью. С целью исследования более широкой области фазовой диаграммы, начиная с 2010 г. выполняется скан вниз по энергиям пучка, называемый Beam Energy Scan (BES).

Детекторная установка STAR (Solenoidal Tracker at RHIC) — это одна из двух ныне действующих установок на RHIC. Основная задача STAR — исследование формирования и характеристик кварк-глюонной плазмы. В 2011 была завершена первая фаза программы скана со встречными пучками золота с энергий от 7.7 ГэВ/нуклон до 39 ГэВ/нуклон. Учитывая набранные ранее данные, диапазон энергий $\sqrt{s_{NN}}$, измеренных на RHIC, составляет 7.7–200 ГэВ/нуклон. Этот диапазон энергий столкновения соответствует области фазовой диаграммы, в которой ожидается наличие фазового перехода первого рода и критической точки.

Вторая фаза BES, запланированная на 2018–2019 гг, нацелена на исследование столкновений ионов золота при энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ от 20 до 7 ГэВ/нуклон в режиме встречных пучков и $\sqrt{s_{NN}}$ от 7 до 3.5 ГэВ/нуклон в режиме с фиксированной мишенью (FXT). Эти измерения, несмотря на низкую статистику, позволят измерить выходы и спектры адронов и определить, опираясь на статистическую термальную модель (THERMUS [4]), параметры состояния ядерного вещества на границе адронизации.

Эксперимент ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — один из четырёх крупных экспериментов на большом адронном коллайдере CERN — нацелен на изучение столкновений тяжёлых ионов. Рекордная энергия $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ ТэВ/нуклон для сталкивающихся пучков ядер свинца позволяет получить ядерную материю с беспрецедентно высокой температурой. Частота взаимодействий достигает порядка 10 кГц. В эксперименте одновременно сохраняются данные с тремя типами триггеров: любое ядерное взаимодействие без дополнительного отбора (minimum bias), с высокой центральностью и с отбором редких событий заданного типа.

Высокая температура ядерного вещества приводит к следующим особенностям: процессы с высокой передачей энергии идут с высокой вероятностью, что позволяет тестировать модели пертурбативной КХД; появляется возможность регистрировать Z^0 и W^\pm бозоны, рождающиеся в окружении горячей ядерной материи; возрастает относительное время существования КГП, в результате чего расширение фэйрбола определяется в большей степени динамикой партонов, что проявляется в потоках и спектрах испускаемых адронов; большое значение приобретает регистрация прямых фотонов, несущих информацию о термодинамических условиях на ранней горячей фазе столкновения. Среди интересных результатов, полученных к настоящему моменту на ALICE, отметим компенсацию подавления рождения J/ψ в столкновениях с высокой центральностью. Этот эффект может быть связан с большой концентрацией очарованных кварков и антикварков в среде в момент адронизации. Температура адронизации, достигнутая в ALICE, оценивается как $T \approx 160$ МэВ.

Описанные выше эксперименты на RHIC и LHC исходно были нацелены на изучение ядерной материи при высоких температурах и относительно малых значениях барионного потенциала. Большой физический интерес представляет и область фазовой диаграммы с высокой барионной плотностью, которая может быть исследована при столкновениях тяжёлых ядер с меньшей энергией. Пионерские исследования в этой области делаются на ускорителе RHIC в программе сканирования по энергиям. Недостатком этих исследований является невысокая частота взаимодействий, что позволяет получить доступ к только ограниченному списку наблюдаемых. Существуют два пути повышения частоты взаимодействий: (1) оптимизация ускорителя встречных пучков под низкие энергии, что позволит минимизировать эмиттанс пучка при большом значении тока и, следовательно, увеличить частоту взаимодействий и (2) работа с фиксированной мишенью. Первый подход реализуется в проекте MPD на ускорителе NICA в Дубне, а второй — в проекте CBM на FAIR в Дармштадте.

В Объединённом Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ) в г. Дубне идёт строительство коллайдерного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) на базе нуклотрона. Он предоставит встречные пучки от протонов до ионов золота в диапазоне энергий в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}$ от 4 ГэВ/нуклон до 11 ГэВ/нуклон и со светимостью $1.5 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для ^{197}Au при $\sqrt{s_{NN}} = 4$ ГэВ/нуклон и $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ/нуклон. Параллельно со строительством комплекса NICA идет создание расположенного на нем эксперимента MPD. Этот эксперимент, помимо выходов и спектров адронов (π^+ , K^+ , p , ρ , ω , ϕ , Ω , D^0 , J/ψ), позволит измерить флуктуации от события к событию, исследовать анизотропию выходов адронов и осуществить корреляционные измерения при высокой статистике.

Эксперимент с фиксированной мишенью CBM [5, 6, 7] нацелен на исследование ядерной материи с высокой барионной плотностью и низкой температурой с рекордной статистикой. Частота ядерных взаимодействий в этом эксперименте будет достигать 10^7 с^{-1} . При работе на синхротроне SIS100 энергия в системе центра масс будет достигать для золота $\sqrt{s_{NN}} = 5.1 \text{ ГэВ/нуклон}$ и $\sqrt{s_{NN}} = 8.6 \text{ ГэВ/нуклон}$ при работе на SIS300 [1]. В центральных столкновениях плотность может превышать нормальную ядерную в 8–10 раз. Благодаря высокой статистике CBM будет способен исследовать такие наблюдаемые как: флуктуации потоков и спектров адронов от события к событию; анизотропия потоков адронов, в т.ч. странных и очарованных; выходы вблизи порога и свойства в среде лёгких векторных мезонов, J/ψ , D -мезонов с точностью, недоступной в других экспериментах. Все наблюдаемые могут быть измерены при различных массах ядер, и различных значениях энергии столкновения и центральности. Последняя характеризует величину файербола.

Достижимые результаты во всех рассмотренных экспериментах во многом определяются статистикой, которую они могут собрать за адекватное время, которая, в свою очередь, определяется частотой первичных взаимодействий. Эта частота ограничена сверху двумя факторами — интенсивностью пучков ускорителя и пропускной способностью детекторной установки. В таблицу 1 сведены такие базовые параметры рассмотренных выше экспериментов, как энергия в центре масс для столкновений конкретных тяжёлых ионов и частота взаимодействий. На рис. 4 более подробно представлены параметры экспериментов, работающих с относительно высокой барионной плотностью.

Таблица 1: Показатели экспериментов в области исследования сверхплотной материи.

Эксперимент	Тип установки	Диапазон энергий	Частота взаимодействий, Гц
STAR@RHIC, BNL, Нью-Йорк, США	Встречные пучки Фикс. мишень ¹	$\sqrt{s_{AuAu}} = 7\text{--}200 \text{ ГэВ/нуклон}$	1–1500
NA61/SHINE@SPS, CERN, Женева, Швейцария	Фикс. мишень	$E_{kin} = 12\text{--}29 \text{ ГэВ/нуклон}$ $\sqrt{s_{PbPb}} = 5.2\text{--}7.8 \text{ ГэВ/нуклон}$	80
ALICE@LHC, CERN, Женева, Швейцария	Встречные пучки	$\sqrt{s_{PbPb}} = 5.5 \text{ ТэВ/нуклон}$	10^4
MPD@NICA, ОИЯИ, Дубна, Россия	Встречные пучки	$\sqrt{s_{AuAu}} = 4\text{--}11 \text{ ГэВ/нуклон}$	$7 \cdot 10^3$
CBM@FAIR, GSI, Дармштадт, Германия	Фикс. мишень	$E_{kin} = 10\text{--}35 \text{ ГэВ/нуклон}$ $\sqrt{s_{AuAu}} = 2.7\text{--}8.3 \text{ ГэВ/нуклон}$	$10^5\text{--}10^7$

Из приведённых выше данных видно, что эксперимент CBM будет обладать уникальными возможностями по исследованию редких наблюдаемых с высокой статистической точностью. Данная работа посвящена методическим разработкам для детектора RICH эксперимента CBM, участвующего в измерении таких наблюдаемых, как распады лёгких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ) и J/ψ -частиц по диэлектронному каналу.

¹STAR@RHIC выполняет ряд измерений с фиксированной мишенью при низких энергиях.

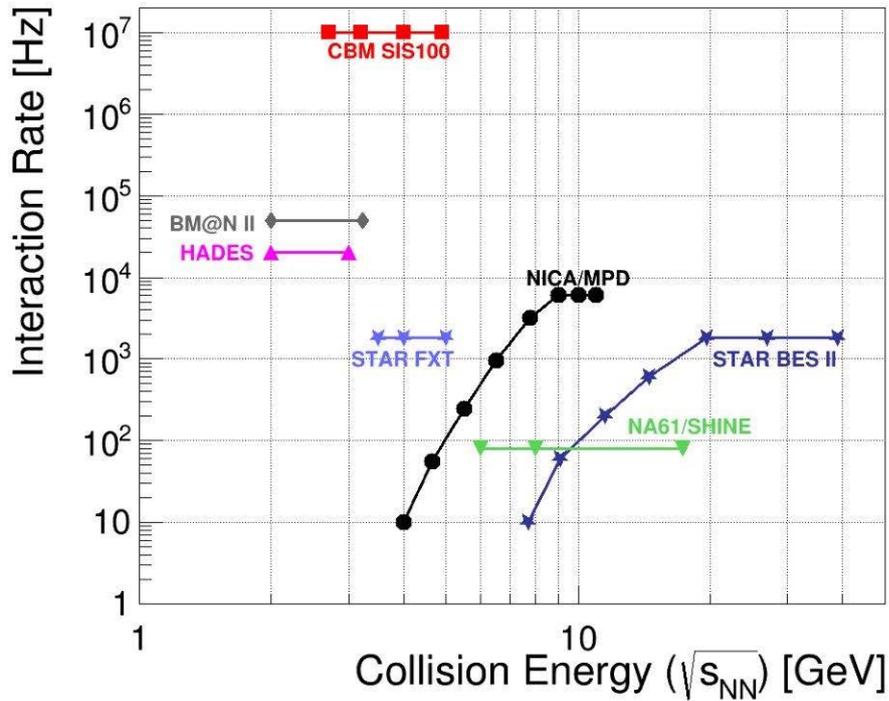


Рис. 4: Энергии и частоты взаимодействий основных экспериментов, работающих с относительно высокой барионной плотностью [2]. BES — Beam Energy Scan, FXT — FiXed Target.

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 sr^{-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:

- 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 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.
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 результаты:

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 диодов “metal channel” временным и аналоговым трактами.

Достоверность:

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 научных семинарах ЛИТ ОИЯИ и на различных международных конференциях и совещаниях, в том числе:

1. Семинар ЛИТ ОИЯИ, Дубна, Россия, 16.11.2017
Устный доклад “Разработка методов моделирования, сбора и анализа данных физических установок и их применение для детектора RICH эксперимента CBM”
2. Международная конференция “The XXI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2017)”, ОИЯИ, Дубна, Россия, 04.10.2017
Устный доклад “Geometric modeling in particle physics community”
3. Международное совещание “29th CBM Collaboration Meeting”, ГСИ, Дармштадт, Германия, 20-24.03.2017
Устный доклад “Discussion of open issues with new geometry”
4. Международное совещание “29th CBM Collaboration Meeting”, ГСИ, Дармштадт, Германия, 20-24.03.2017
Устный доклад “Time resolution of TRV3 + PADIWA readout”
5. Семинар НОВФ ЛИТ ОИЯИ, Дубна, Россия, 22.12.2016
Устный доклад “Development of the readout and DAQ system for CBM RICH and EXPERT. ‘CATIA-GDML geometry builder’ and Monte-Carlo geometry of CBM RICH.”
6. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИЦФР, Москва, Россия, 14-15.12.2016
Устный доклад “Detailed study of the stability and uniformity of the CBM RICH readout and DAQ prototype characteristics. Development and application of the Monte Carlo geometry package”
7. Международная конференция “The 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2016)”, Блед, Словения, 05-09.09.2016
Представлен постер “Development of the CBM RICH readout electronics and DAQ”
8. Международная конференция “The 20th IEEE-NPSS Real Time Conference (IEEE-NPSS RT2016)”, Падуя, Италия, 05-10.06.2016
Представлен постер “Development of the CBM RICH readout and DAQ”
9. Международная конференция “The XX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2016)”, ОИЯИ, Дубна, Россия, 14-18.03.2016
Устный доклад “Development and characterization of CBM RICH readout and DAQ”
10. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИЦФР, Москва, Россия, 15-17.12.2015
Устный доклад “Development of ‘CATIA-GDML geometry builder’ and CBM RICH software”
11. Международное совещание “26th CBM Collaboration Meeting”, Прага, Чехия, 14-18.09.2015 Устный доклад “PADIWA test measurements, beamtime analysis (TOT, WLS time resolution)”

12. Международное совещание “25th CBM Collaboration Meeting”, ГСИ, Дармштадт, Германия, 20-24.04.2015
Устный доклад “Beamtime analysis: FLIB readout, TOT, timing”
13. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИЦФР, Москва, Россия, 12-13.11.2013
Устный доклад “Modernization of simulation and data acquisition packages of CBM experiment”
14. Международная конференция “20th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP)”, Амстердам, Нидерланды, 14-18.10.2013
Представлен постер “Development and application of CATIA-GDML geometry builder”

Публикации по теме:

Результаты работ, составивших основу диссертации, опубликованы в 12 статьях в реферируемых журналах по списку ВАК [35, 40, 61, 62, 64, 65, 66, 79, 80, 100, 101, 102] и 9 кратких сообщениях [67, 68, 69, 70, 72, 75, 97, 105, 106].

Личный вклад:

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 содержание

Диссертация состоит из настоящего введения, пяти глав и заключения.

В первой главе задаётся контекст данной работы: кратко охарактеризован ускорительный комплекс FAIR; рассматриваются задачи и условия эксплуатации эксперимента CBM; обсуждается важность точного описания и оптимизации конструкции детекторов и испытания прототипов в свете жёстких условий эксплуатации; описывается компоновка и основные свойства детекторов, входящих в состав эксперимента CBM; обсуждаются конструкция и характеристики некоторых ранее построенных детекторов RICH, которые оказали влияние на разработку CBM RICH; детально описывается конструкция и характеристики детектора CBM RICH и ставятся задачи, решаемые в данной работе.

Во второй главе обсуждаются некоторые наиболее распространённые способы представления геометрических моделей в ЭВМ, используемые в различном ПО для решения различных вычислительных задач, и возможность перевода моделей из одного представления в другое; рассматриваются предпосылки, принципы создания и особенности реализации инструментария “CATIA-GDML geometry builder” для обмена геометрической инфор-

мацией между САПР и средами Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество (GEANT/ROOT) и облегчения создания детальных геометрических моделей для GEANT/ROOT;

Третья глава посвящена применению инструментария “CATIA-GDML geometry builder”. В ней рассмотрены основные сценарии работы с инструментарием, обсуждены построенные геометрические модели и решаемые с их помощью задачи для таких подсистем детектора СВМ RICH, как фокусирующие зеркала, механические крепления зеркал, массив фотодетекторов, магнитные экраны, ионопровод. Кроме того, рассмотрены случаи применения того же инструментария для других детекторов эксперимента СВМ и ряда других экспериментов.

В четвёртой главе описаны архитектура бестриггерной системы считывания и сбора данных СВМ RICH, разработанные модули ПО, необходимые для сбора и анализа данных, а также экспериментальные установки, позволившие осуществить всестороннее исследование прототипа указанной системы.

Пятая глава посвящена анализу данных пучковых и лабораторных тестов прототипа детектора СВМ RICH и результатам исследования свойств и характеристик прототипа системы считывания и сбора данных. Здесь же, на основании проведенных исследований, даются рекомендации по модификации следующей версии прототипа системы считывания и сбора данных.

В заключении приводятся основные результаты работы и выражаются благодарности.

Глава 1

Эксперимент CBM и особенности детектора CBM RICH

1.1 Эксперимент CBM

1.1.1 Ускорительный комплекс FAIR

Европейский центр по исследованиям с помощью тяжёлых ионов и антипротонов (Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR [8]) строится в пригороде Дармштадта в Германии. Он предоставит высокоэнергетичные прецизионно настроенные пучки антипротонов и различных ионов от водорода до урана с беспрецедентным качеством и интенсивностью. Научная программа на ускорительном комплексе FAIR охватывает следующие направления:

- исследование в рамках коллаборации CBM уравнения состояния ядерной материи, получаемой в столкновениях тяжелых ионов;
- изучение структуры ядра и исследования в области ядерной астрофизики с использованием пучков как стабильных, так и радиоактивных ионов в рамках направления NUSTAR [9];
- изучение структуры адронов, исследования, направленные на развитие теории сильных взаимодействий, с использованием пучков антипротонов, в рамках коллаборации PANDA [10];
- исследования в области физики сверхплотной плазмы, атомной физики, квантовой электродинамики в сверхсильных электромагнитных полях, прикладные исследования с пучками ионов для радиационного материаловедения, медицины и биологии в рамках направления APPA [11].

На рис. 1.1 приведена планируемая схема ускорительного комплекса FAIR рядом с существующей инфраструктурой института тяжёлоионных исследований (Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI). Центральный элемент комплекса — двойной синхротрон тяжёлых ионов SIS100/300 (SchwerIonenSynchrotron) длиной 1100 м. В качестве инжектора пучка в синхротрон SIS100/300 будут выступать существующие в GSI универсальный линейный ускоритель UNILAC (UNIversal Linear ACcelerator) и далее синхротрон SIS18.

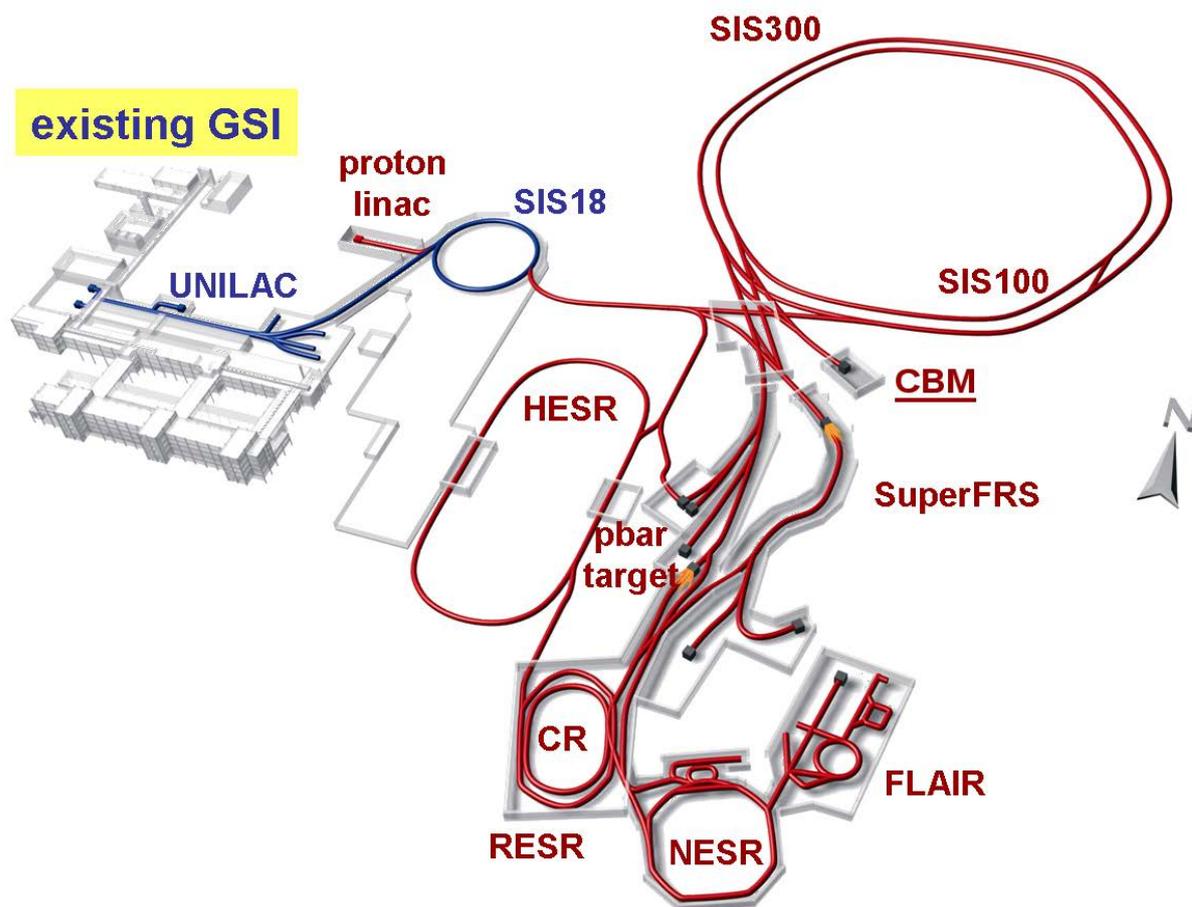


Рис. 1.1: Схема комплекса FAIR. Super-FRS — Super Fragment Separator, HESR — High Energy Storage Ring, CR — Collector Ring, RESR — Recirculation Experimental Storage Ring, NESR — New Experimental Storage Ring, FLAIR — Facility for Low-energy Antiproton and heavy Ion Research.

Синхротроны SIS100 и SIS300 будут иметь магнитную жёсткость 100 Тл·м и 300 Тл·м соответственно. В первой фазе FAIR будет реализован только SIS100. Этот ускоритель будет способен производить пучки ионов максимальной зарядности от протона до урана с интенсивностью до 10^9 ионов в секунду и энергией от 2 до 11 ГэВ/нуклон для самых тяжёлых ионов (Au , Pb , U), до 17 ГэВ/нуклон для более лёгких ионов ($Z/A = 0.5$) и до 35 ГэВ для протонов. Ещё одной отличительной особенностью FAIR является то, что он будет предоставлять пучок для нескольких (до 4) исследовательских установок одновременно, позволяя экспериментаторам работать с пучком до 4 месяцев в год.

1.1.2 Экспериментальная установка CBM

Эксперимент CBM (Compressed baryonic matter, сжатая барионная материя) нацелен на исследование сжатой барионной материи с высокой плотностью и относительно низкой температурой с помощью редких наблюдаемых. К этим наблюдаемым относятся легкие векторные мезоны, частицы со скрытым и открытым очарованием, прецизионно измеренные анизотропии в угловых и энергетических распределениях, а в случае реализации фазового перехода первого рода — флуктуации различных параметров от события к событию. Для реализации такой физической программы необходимо добиться рекордно высокой частоты взаимодействий. Эксперимент строится по схеме с фиксированной мишенью с использованием максимальной интенсивности тяжёлоионных пучков, предоставляемых SIS100. За счёт использова-

ния тонкой мишени, обеспечивающей ядерные взаимодействия с вероятностью $\approx 1\%$, частота последних будет достигать 10^7 с^{-1} . При работе с фиксированной мишенью большинство вторичных частиц будут лететь вперёд. Отметим, что ионы, проходящие через мишень без ядерного взаимодействия, рождают большое количество дельта-электронов, дающих значительные фоны в некоторых подсистемах, включая RICH. Детектор оказывается в довольно жёстких условиях эксплуатации. С одной стороны, имеют место высокие градиенты угловой плотности частиц, с другой стороны, наблюдаются высокие частоты взаимодействий. Таким образом, детектор должен быть спроектирован с учётом требований переменной гранулярности, высокой радиационной стойкости и способности обрабатывать большой поток данных. Последнее требование достигается путем использования самозапускающейся электроники. При таком подходе каждый канал электроники вырабатывает сообщение при условии преодоления сигналом некоторого порога. Сообщение содержит, в общем случае, идентификатор сработавшего канала, временную отметку и амплитудную информацию. Сработавшие каналы на некоторое время теряют чувствительность, а остальные каналы продолжают ожидать следующее событие. В результате, при регистрации каждого события имеется некоторое количество случайно распределенных нечувствительных каналов, что приводит к необходимости устойчивости алгоритмов реконструкции к пропущенным хитам. Это касается как треков частиц в различных комбинациях детекторов, так и черенковских колец.

Указанные жёсткие требования к детектору приводят к необходимости тщательной оптимизации множества конструктивных элементов, компоновочных решений и алгоритмов обработки данных. Процедура оптимизации включает в себя создание и многократную передачу детальной геометрической информации между САПР и программными пакетами, моделирующими разнообразные физические процессы — от механических и тепловых до связанных с прохождением частиц через вещество. Создание на основе инженерной модели детальной геометрии для Монте-Карло пакетов GEANT и ROOT не имеет автоматизированного решения. Этим обусловлена необходимость разработки и использования инструментария для обмена геометрической информацией.

Концепция бестриггерного сбора данных является относительно новой, и опыт её применения в крупных экспериментах пока что отсутствует. В связи с этим особую важность приобретает испытание и исследование свойств прототипов таких систем сбора данных как в лабораторных условиях, так и в составе полнофункциональных прототипов детекторных систем эксперимента CBM.

Ниже обсуждаются особенности компоновки и конструктивных решений различных подсистем эксперимента.

Для выполнения различных измерений CBM будет функционировать в двух конфигурациях — с мюонным детектором (MUCH) и с детектором черенковских колец (RICH). Схема экспериментальной установки с RICH представлена на рис. 1.2.

Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [12] расположена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микродетектор (MVD) [13], 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) [14], собранные из двухсторонних микростриповых сенсоров. Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для реконструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импульсов и нахождения вторичных вершин в условиях высокой множественности и плотности частиц.

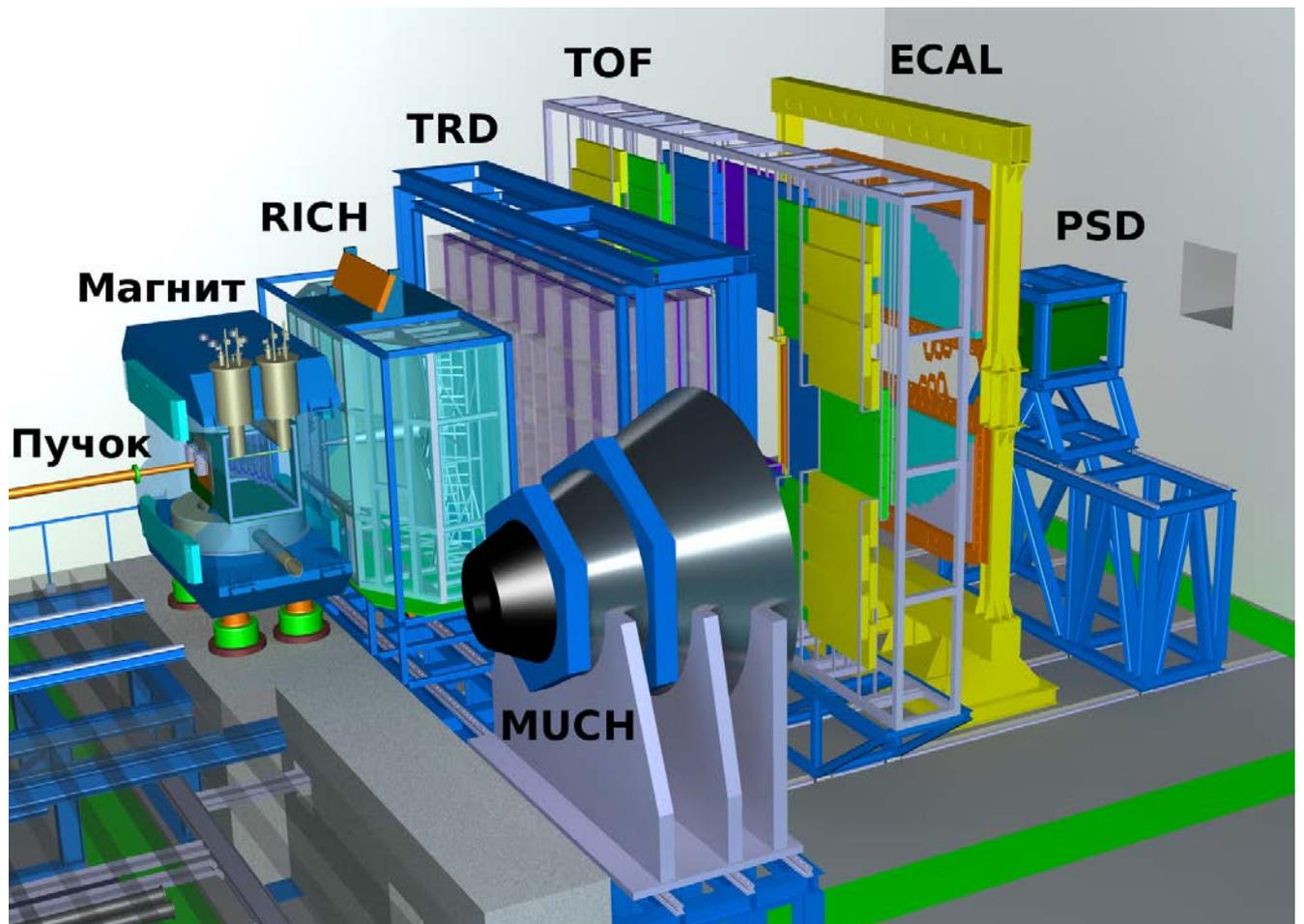


Рис. 1.2: Общий вид экспериментальной установки CBM в конфигурации с RICH. MUCH показан в нерабочем положении.

Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детектор черенковских колец (RICH) [15], предназначенный для идентификации электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов лёгких векторных мезонов и частиц со скрытым очарованием. Во второй конфигурации на месте RICH стоит мюонная система (MUCH, показана на рис. 1.2 в нерабочем положении) [16], предназначенная в первую очередь для исследования частиц, распадающихся по димюонному каналу, и состоящая из чередующихся слоев железа и газовых трековых камер [17].

Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструкции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от π -мезонов [18]. Для идентификации адронов используется время-пролётный детектор (TOF) [19]. Электромагнитный калориметр (ECAL) типа “шашлык” необходим для регистрации прямых фотонов и фотонов от распада нейтральных мезонов (π^0, η) [20]. Детектор непровзаимодействовавших осколков ядер (PSD) [21] представляет собой сегментированный адронный калориметр и служит для определения центральности столкновения и плоскости реакции путем регистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами к пучку.

Детекторы CBM будут оборудованы самотриггерующейся электроникой, а построение и отбор событий будет осуществляться с помощью специализированного аппаратно-программного комплекса FLES.

Различные комбинации детекторов будут использоваться при измерении различных наблюдаемых, см. таблицу 1.1.

Таблица 1.1: Наблюдаемые и детекторы для их регистрации [1]. Детекторы, помеченные x, необходимы для регистрации соответствующих частиц, а детекторы, помеченные (x), могут использоваться для подавления фона.

Тип частиц	MVD	STS	RICH	MUCH	TRD	TOF	ECAL	PSD
π, K, p		x	(x)		(x)	x		x
Гипероны		x			(x)	(x)		x
Частицы с открытым очарованием	x	x	(x)		(x)	x		x
Электроны	x	x	x		x	x		x
Мюоны		x		x		(x)		x
Гамма							x	x
Гамма через e^\pm конверсию	x	x	x		x	x		x

Далее каждая подсистема установки описана подробнее.

Вакуумная камера, мишень и ионопровод

Пучок подводится к установке с помощью ионопровода, который стыкуется с вакуумной камерой, расположенной между полюсами дипольного магнита. Внутри вакуумной камеры находится мишень и вершинный микродетектор MVD. Мишень представляет собой фольгу из золота или другого материала толщиной порядка ста микрон или набор из нескольких фольг меньшей толщины, разнесённых вдоль оси пучка. Непровзаимодействовавшие ионы налетающего пучка и крупные осколки продолжают движение по ионопроводу за вакуумной камерой.

Планируется, что пучковая труба будет выполнена из алюминия толщиной от 0.3 мм и диаметром от 4 см на выходе из вакуумной камеры до 60 см в зоне время-пролётного детектора.

Для измерения момента времени первичного взаимодействия пучка с мишенью, который необходим для измерения времени пролёта вторичных частиц с помощью TOF, вблизи мишени будет расположен стартовый детектор, см. также раздел 1.1.2.

Вершинный микродетектор MVD

Вершинный микродетектор (Micro Vertex Detector, MVD) является первым трекинговым устройством установки CBM и расположен внутри вакуумной камеры (см. рис. 1.3). MVD состоит из четырёх двухсторонних станций, расположенных на расстояниях 5, 10, 15 и 20 см от мишени вниз по пучку. MVD улучшает разрешение трековой системы CBM, что позволяет идентифицировать редкие частицы по пространственному отклонению вершины распада от точки взаимодействия налетающего иона и ядра мишени. В таблице 1.2 приведены наблюдаемые, измерение которых возможно за счёт использования MVD. Помимо этого, широкий геометрический аксептанс MVD вносит значительный вклад в трекинг частиц с низким импульсом, что повышает способность системы к подавлению фона при измерении распадов по дилептонному каналу.

MVD будет построен на основе активных пиксельных КМОП (CMOS) сенсоров (Monolithic Active Pixel Sensors, MAPS) толщиной 50 мкм, имеющих пространственное разрешение 3.5 мкм. Данная технология, вместе с правильно подобранными материалами для опорных структур и кабелей, позволяет получить толщину материала порядка 0.3% X_0 для первой станции.

Таблица 1.2: Наблюдаемые, для измерения которых требуется детектор MVD.

Частица	Канал распада	Коэф. ветвления	Время жизни, с
D^+	$K^- + \pi^+ + \pi^+$	9%	315 мкм
D^0	$K^- + \pi^+$	4%	124 мкм
λ_c	$p + K^- + \pi^+$	5%	62 мкм

На части чипа сенсора реализована предварительная обработка сигнала. По тонким гибким шлейфам к сенсорам подводится питание и осуществляется считывание. За пределами геометрического аксептанса расположены платы передней электроники и система жидкостного охлаждения, соединённая с сенсорами с помощью пластины из CVD алмаза. Данные (800 Мбит/с на сенсор) считываются радиационно-стойкими пассивными платами передней электроники и отправляются в DAQ-систему по стандарту HADES-TRV3. Особое внимание уделяется охлаждению активных сенсоров.

При всех своих достоинствах, MAPS — это довольно-таки медленный детектор, поэтому для работы с ним частота взаимодействий должна быть снижена до 10^5 – 10^6 Гц.

Кремниевая трековая система STS

Задача кремниевой трековой системы (Silicon Tracking System, STS), изображённой на рис. 1.4, — измерение траекторий и импульсов заряженных частиц, вылетающих из точки взаимодействия пучка тяжёлых ионов с мишенью. Для выполнения физической программы СВМ необходима частота взаимодействий до 10 МГц, при том что в одном взаимодействии будет рождаться до 1000 заряженных частиц. Реконструкция треков должна выполняться с эффективностью порядка 95% и разрешением по импульсу порядка $\Delta p/p = 1\%$.

STS будет состоять из 8 слоёв кремниевых микростриповых сенсоров, расположенных внутри магнитного поля на расстоянии от 30 см до 100 см от точки взаимодействия вниз по пучку с шагом 10 см. Микростриповые сенсоры будут двухсторонними, шаг между стрипами 58 мкм, стерео-угол 7.5° , длина стрипов в различных сенсорах от 20 до 60 мм, а толщина кремния 300 мкм.

По текущим оценкам максимальная неионизирующая доза в СВМ для сенсоров, расположенных ближе всего к пучку, не будет превышать $10^{14} n_{eq} \text{ см}^{-2}$. Сенсоры будут монтироваться на лёгкие углепластиковые фермы. Считывание будет осуществляться по многоканальным микро-кабелям самотриггерующейся электроникой, расположенной по краям станций вместе с линиями охлаждения и другими вспомогательными подсистемами. Многослойные полиамид-алюминиевые кабели будут иметь толщину порядка 100 мкм. STS будет работать в термостатическом корпусе (см. рис. 1.4), обеспечивающем постоянную температуру около -5°C . Тепло, рассеиваемое считывающей электроникой, отводится с помощью CO_2 системы

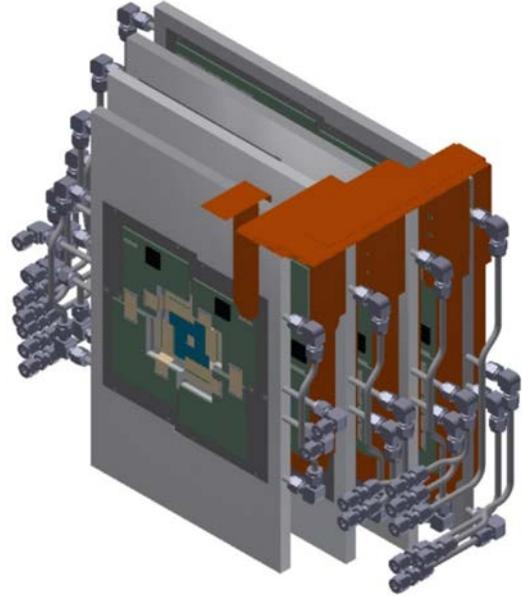


Рис. 1.3: Модель вершинного микродетектора [22].

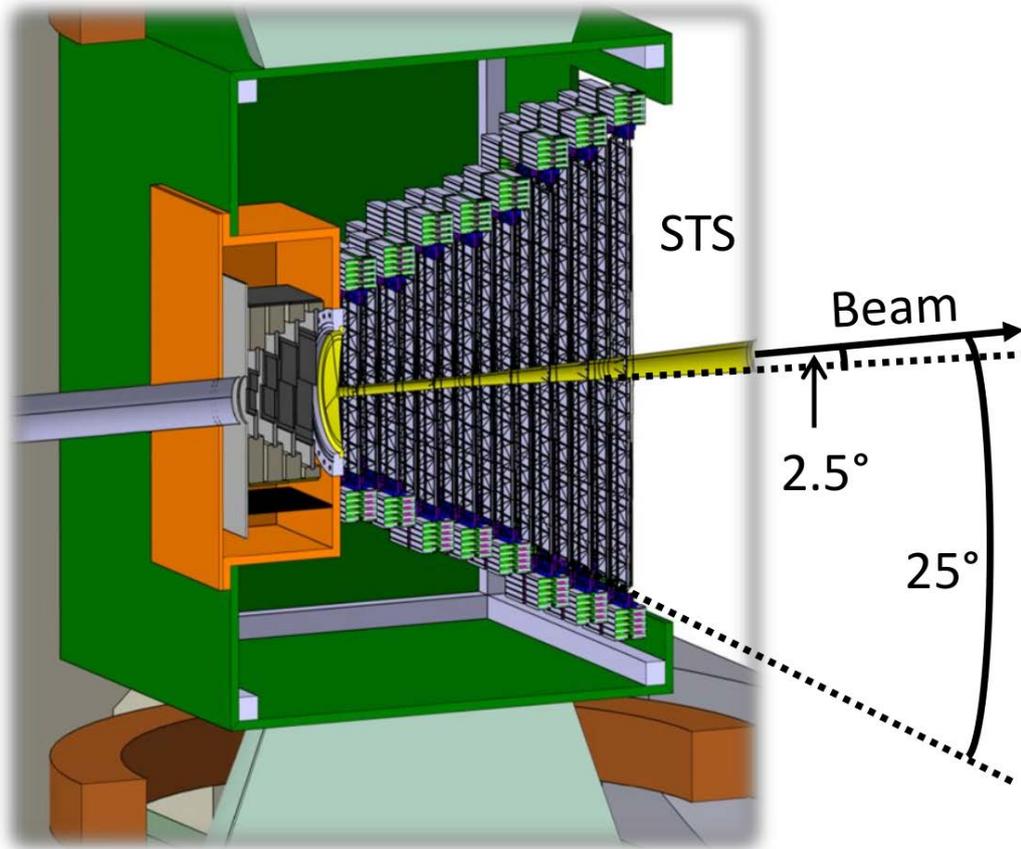


Рис. 1.4: STS внутри термоизолирующего контейнера (зелёный) между полюсами магнита рядом с вакуумной камерой (оранжевая).

охлаждения. Механические опоры детектора и соединения спроектированы так, чтобы была возможность заменить отдельный модуль системы, не отсоединяя остальные.

Считывание STS будет осуществляться специально разработанной электроникой, в основе которой лежит чип STS-XUTER. Он включает в себя 128 каналов, состоящих из зарядочувствительного усилителя, формирователя и 5-битного аналогово-цифрового преобразователя. На каждую зарегистрированную частицу каждый канал формирует временную отметку и значение АЦП, соответствующее оставленному заряду.

STS — главный трековый детектор эксперимента CBM. Частица, проходящая через двухсторонний микростриповый сенсор, возбуждает сигналы в стрипах. Реконструкция треков по зарегистрированным в STS сигналам составляет значительную часть глобальной реконструкции и представляет собой сложную вычислительную задачу.

Первый этап реконструкции — построение хита. Процедура поиска хитов определяет координаты x и y пролёта частицы через станцию по пересечению стрипов на двух сторонах сенсора. Координата z фиксирована и определяется положением станции. Возможна ситуация, когда одна частица активирует кластер из двух или трёх рядом стоящих стрипов на одной стороне. В этом случае для определения пересечения используются усреднённые виртуальные стрипы. По сигналам с нескольких станций, расположенных на разных z , восстанавливается трек частицы. Применение стриповых детекторов имеет существенный недостаток — в случае, если в одной станции были зарегистрированы несколько частиц, комбинаторным образом растёт количество ложных (fake) хитов.

Реконструкция треков в трековой системе STS осуществляется в два этапа — поиск треков (track finding) и фитирование (track fitting). Помимо ложных хитов, которые не соответству-

ют никаким реальным частицам, задача поиска треков в STS осложняется высоким фоном от дельта- и конверсионных электронов, рождённых на материале детектора. Многократное рассеяние в материале приводит к изменению траекторий частиц. Подробная геометрическая модель необходима для выполнения моделирования прохождения частиц через материал с учётом этих физических явлений с целью оптимизации алгоритмов трекинга.

Дипольный магнит

Основная задача магнита — искривлять траектории заряженных частиц, что позволит определять их импульс по радиусу кривизны после реконструкции в STS. Также магнитное поле разводит заряженные частицы в пространстве для уменьшения их плотности. Для решения указанных задач магнит должен создавать максимально равномерное стационарное вертикальное магнитное поле в заданной области пространства, однако при этом минимизировать поле за пределами этой области.

В СВМ принято решение использовать Н-образный магнит с двумя сверхпроводящими круговыми обмотками, обеспечивающими интеграл поля 1 Тл·м. Обмотки будут выполнены из NbTi, намотаны на цилиндрическую бобину и будут иметь два контура охлаждения жидким гелием — при температуре 4.5K и 50K. Интеграл поля по всей области, где находится STS: 0.972 Тл·м, макс. поле ≈ 1 Тл. Отклонение интеграла поля по всему телесному углу по прямым линиям не превышает 10%. Геометрия магнита определяется геометрическим аксептансом эксперимента ($\pm 25^\circ$ по вертикали и $\pm 30^\circ$ по горизонтали) и тем фактом, что мишень, вершинный микродетектор MVD и кремниевая трековая система STS должны располагаться внутри магнитного поля.

Магнит должен иметь способность переключать полярность. На поверхности магнита имеются съёмные магнитные экраны, используемые при работе с детектором черенковских колец. Конструкция магнита должна подразумевать сборку на месте. Внутри магнита размещается термоизолированный контейнер, содержащий вакуумную камеру, MVD, STS и STS-секцию ионопровода длиной примерно 1.2 м. Эта секция подключается к следующей секции ионопровода через разъёмное соединение. Для обслуживания оборудования контейнер со всем содержимым извлекается из магнита вверх по пучку.

Детектор черенковских колец RICH

Детектор черенковских колец (Ring Imaging CHerenkov detector, RICH) предназначен для восстановления лёгких векторных мезонов, J/ψ и ψ' -частиц, распадающихся по диэлектронному каналу. Для решения этой задачи детектор должен обеспечивать, во-первых, идентификацию электронов и позитронов, выделяя их из огромного потока заряженных π -мезонов, и, во-вторых, надежное сопоставление черенковских колец и треков, восстановленных в STS.

Фактор подавления π -мезонов π_{suppr} определяется как отношение количества восстановленных в STS треков π -мезонов, имеющих продолжение в геометрическом аксептансе детектора RICH, к количеству π -мезонов, идентифицированных как электроны. Для получения дилептонных спектров на SIS300 требуется π_{suppr} порядка 10000, что осуществимо при совместном применении RICH и стоящего ниже по пучку детектора переходного излучения TRD. При этом π_{suppr} детектора RICH должен составлять как минимум 100 в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до 8 ГэВ/с.

Сопоставление черенковских колец и треков позволит выделить диэлектронные от распадов исследуемых частиц на фоне, обусловленном такими источниками как γ -конверсия в мишени или распад $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$.

Более подробно СВМ RICH рассмотрен в разделе 1.2.2.

Мюонная система MUCH

Мюонная система (MUon CHambers, MUCH), показанная на рис. 1.5, необходима для идентификации мюонных пар, на которые распадаются лёгкие векторные мезоны и частицы со скрытым очарованием. Основной сложностью при измерении мюонов в столкновениях тяжёлых ионов при энергиях пучка, предоставляемых FAIR, является идентификация мюонов с низким импульсом в среде с очень высокой плотностью частиц. Стратегия, выбранная СВМ, заключается в том, чтобы выполнять трекинг в системе с адронными абсорберами и выполнять идентификацию мюонов в зависимости от импульса. По этой причине мюонная система будет выполнена в виде последовательности адронных абсорберов и тройных трековых станций.

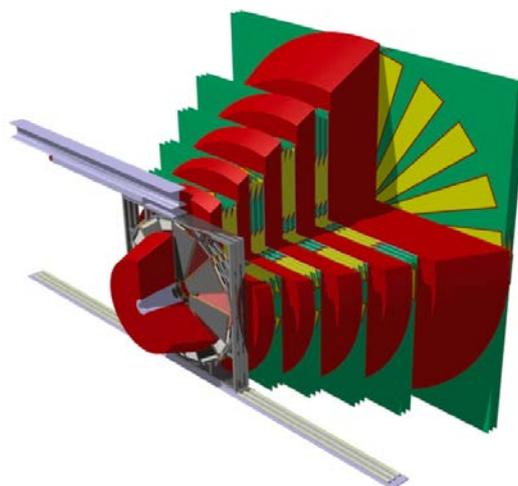


Рис. 1.5: Модель мюонной системы MUCH. Красным цветом показаны абсорберы, газовые детекторы — жёлтым, опоры — зелёным.

Адронные абсорберы различаются по толщине и материалу, а трековые станции, в зависимости от требуемой гранулярности, состоят из детекторов, выполненных по технологиям GEM и Micromegas, обеспечивающих пространственное разрешение порядка 50 мкм, а также, возможно, straw tubes, обеспечивающих разрешение порядка 100 мкм. В качестве последней трековой станции будет использоваться станция детектора TRD. MUCH будет расположен за дипольным магнитом — в том же месте, где стоит RICH в электронной конфигурации СВМ. Чтобы уменьшить количество мюонов от слабых распадов π -мезонов и K -мезонов, система из абсорберов и детекторов должна быть максимально компактна.

Считывание детекторов, изготовленных по технологиям GEM и Micromegas, будет осуществляться платами на основе специального чипа, аналогичного STS-XYTER, разрабатываемого для кремниевой трековой системы. Считывание straw tubes — платами передней электроники PADI, разрабатываемыми для время-пролётного детектора TOF.

Мюонная система будет строиться поэтапно соответственно энергиям пучка, предоставляемым ускорителем. Две первые версии MUCH (SIS100-A и SIS100-B) будут состоять из 3 и 4 станций соответственно, что подходит для измерения лёгких векторных мезонов в столкновениях при 4–6 ГэВ/нуклон и 8–14 ГэВ/нуклон соответственно. Третья версия MUCH (SIS100-C) будет оборудована дополнительным железным абсорбером толщиной 1 м для того чтобы идентифицировать чармоний при самых высоких энергиях SIS100. По введении в эксплуатацию SIS300 мюонная система будет обновлена введением дополнительной станции абсорбера и детектора для измерения лёгких векторных мезонов и чармония при энергиях пучка более 14 ГэВ/нуклон (версии SIS300-A и SIS300-B).

Детектор переходного излучения TRD

Основная задача детектора переходного излучения (Transition Radiation Detector, TRD) — идентифицировать электроны с импульсом более 1 ГэВ/с для того чтобы расширить возможности детектора RICH по идентификации частиц в диапазоне импульсов около 5 ГэВ/с. Такая идентификация должна быть достигнута при коэффициенте подавления π -мезонов порядка 10–20 для получения возможности измерения диэлектронных в диапазоне масс от ρ

до ψ' . Благодаря способности идентифицировать заряженные частицы за счёт их известного энергосодержания детектор TRD также предоставит ценную информацию при регистрации лёгких ядерных осколков. Это особенно важно для отделения, например, дейтронов от ${}^4\text{He}$, которое не может быть достигнуто с помощью одного только детектора TOF.

Указанные требования могут быть удовлетворены применением многопроволочных пропорциональных камер (MWPC) на основе Xe/CO_2 в связке с подходящим радиатором. Базовая версия CBM TRD оснащена MWPC с симметричной зоной усиления толщиной $3.5\text{ мм} + 3.5\text{ мм}$ и далее областью дрейфа толщиной 5 мм , наличие которой увеличивает вероятность поглощения фотона переходного излучения в активном газовом объёме. Такая геометрия обеспечивает эффективное и быстрое формирование выходного сигнала. Высокая эффективность детектора достигается минимизацией материала между радиатором и газом.

В качестве наиболее вероятного варианта радиатора рассматривается блок толщиной $30\text{--}40\text{ см}$, набранный из пенополиэтиленовых плёнок толщиной 2 мм . Также рассматривались материалы POKALON и Synres PP G30, которые показывают себя как хорошие радиаторы, но неоправданно дороги.

Базовая версия CBM TRD предполагает одну станцию, состоящую из четырёх слоёв. Она будет расположена между детекторами RICH и TOF. Помимо идентификации электронов в электронной конфигурации, станция детектора TRD будет использоваться в качестве последней трековой станции детектора MUCH в мюонной конфигурации. Отметим также, что наличие дополнительной станции между STS и TOF повышает качество реконструкции треков.

Для считывания детектора переходного излучения разрабатывается специальный самотриггерующийся чип, называемый SPADIC (Self-triggered Pulse Amplification and Digitization). Он включает в себя логику формирования хита и оцифровку формы импульса [23].

Время-пролётный детектор TOF

Основная задача время-пролётного детектора (Time Of Flight detector, TOF) — измерять момент времени прихода заряженных частиц, чтобы провести идентификацию после сопоставления хита TOF с соответствующим треком кремниевой трековой системы STS.

CBM TOF состоит из двух частей — стартовый детектор (Start Detector, SD) в непосредственной близости к точке первичного взаимодействия и TOF-стена на подвижной опоре, располагаемая на расстоянии $6\text{--}10\text{ м}$ от мишени в зависимости от выполняемой программы измерений CBM. Быстродействующий алмазный стартовый детектор, расположенный на пучке, может удовлетворять всем требованиям CBM, включая полный диапазон пучка — от протонов до тяжёлых ионов. Такой детектор в то же время может эффективно использоваться для онлайн диагностики пучка, мгновенно выдавая информацию о профиле пучка, стабильности его положения по отношению к мишени, о количестве частиц в гало и о временной структуре пучка. SD будет расположен внутри вакуумной камеры. Его толщина должна быть минимальна, чтобы минимизировать взаимодействие с пучком.

Стена TOF будет собрана из модулей различной гранулярности и выполненных с разными требованиями к допустимой частоте. Чтобы иметь достаточную степень разделения, особенно для идентификации заряженных каонов, необходимо расстояние до 10 м и временное разрешение порядка 80 пс , что приводит к требуемому размеру TOF около $12 \times 9\text{ м}^2$. Чтобы достичь указанного временного разрешения детектор должен быть оборудован электроникой с гарантированным временным разрешением лучше 60 пс и эффективностью лучше 95% .

Планируется, что CBM TOF будет построен на основе современных многозачорных резистивных плоских пропорциональных камер (Multigap Resistive Plate Chambers, MRPC). Базовый элемент этого детектора — пачка резистивных пластин из стекла или керамики, которые разделены тонким зазором с газом. При достаточно высоком электрическом поле

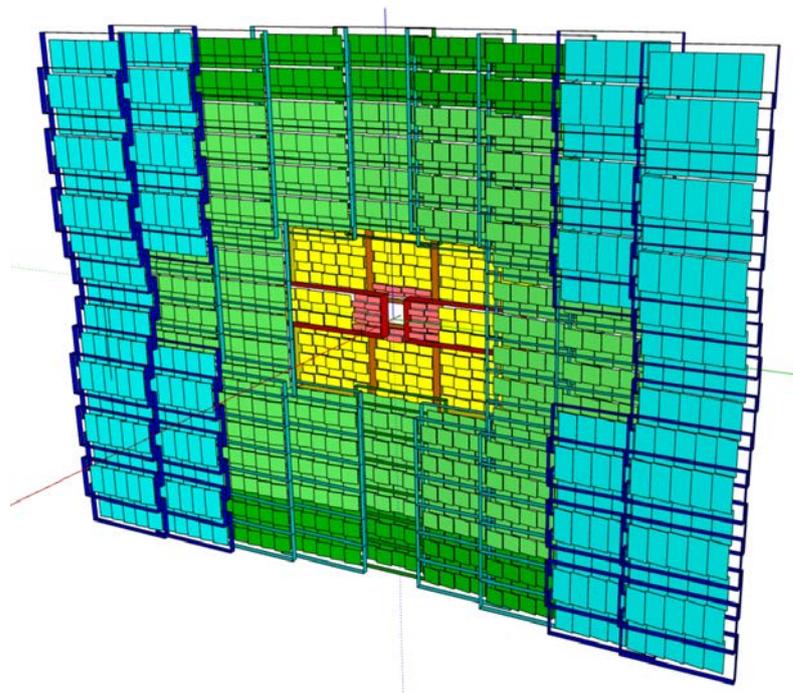


Рис. 1.6: Модель стены время-пролётного детектора TOF. Цвет обозначает тип модуля.

электронные лавины развиваются однородно по поверхности и сигнал от них можно считать через емкостную связь. Данный тип детекторов способен работать на частоте порядка 25 кГц/см^2 , что стало возможным благодаря разработке стекла с низким сопротивлением.

СВМ TOF будет собран из MRPC счётчиков четырёх типов (см. рис. 1.6), организованных в модули шести типов. Счётчики отличаются типом резистивного стекла, количеством и шириной зазоров, и размером электродов. Ячейки варьируются от 4.7 см^2 до 53 см^2 .

Для считывания время-пролётного детектора разрабатывается специальная плата предусилитель-дискриминатор PADI [24], сигнал с которой оцифровывается самотриггерующимся многоканальным ВЦП на основе программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ, FPGA).

Электромагнитный калориметр ECAL

В эксперименте СВМ будет установлен электромагнитный калориметр (ECAL, Electromagnetic CALorimeter) типа “шашлык” (см. рис. 1.7), схожий с калориметрами экспериментов HERA-B, PHENIX и LHCb. Он будет использоваться для измерения прямых фотонов и нейтральных мезонов (π^0, η), распадающихся на фотоны.

ECAL будет собран из четырёхканальных модулей с поперечным сечением $12 \text{ см} \times 12 \text{ см}$, состоящих из 140 последовательных слоёв свинцового абсорбера и пластикового сцинтиллятора толщиной 1 мм. Свет от сцинтилляторов собирается спектросмещающими волокнами, проходящими сквозь пачку свинца и пластика, и регистрируется ФЭУ, расположенными позади модулей. Взаимодействуя с материалом калориметра, налетающий фотон образует электромагнитный ливень. Таким образом первичный фотон полностью оставляет энергию в калориметре, где она собирается и измеряется. Калориметр, оптимизированный под установку на SIS100, составлен из 1088 модулей и имеет 4352 канала считывания. Модули сгруппированы в два прямоугольных блока, которые могут двигаться в вертикальном направлении, изменяя таким образом угловой диапазон измеряемых частиц и, следовательно, оптимизируя условия эксперимента для измерения различных первичных ионов при различных энергиях.

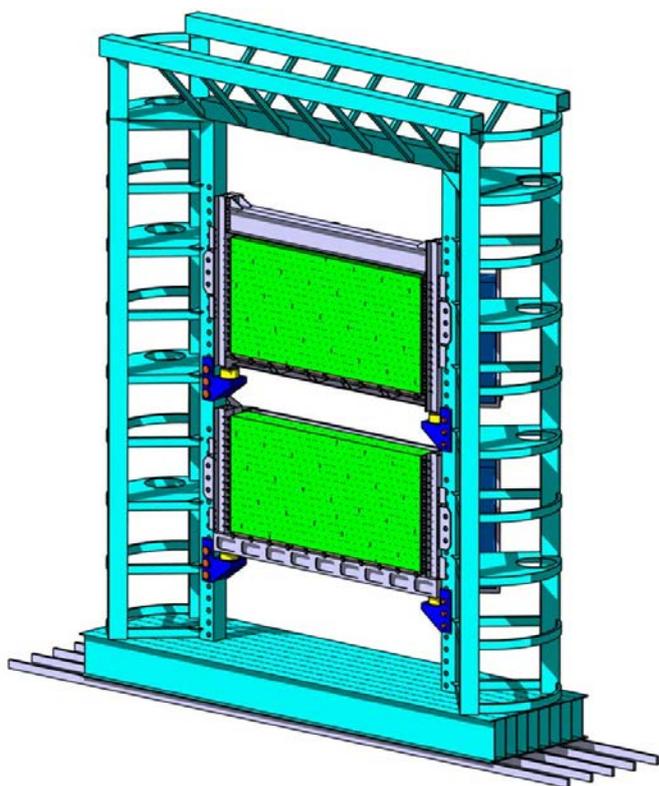


Рис. 1.7: Модель электромагнитного калориметра ECAL.

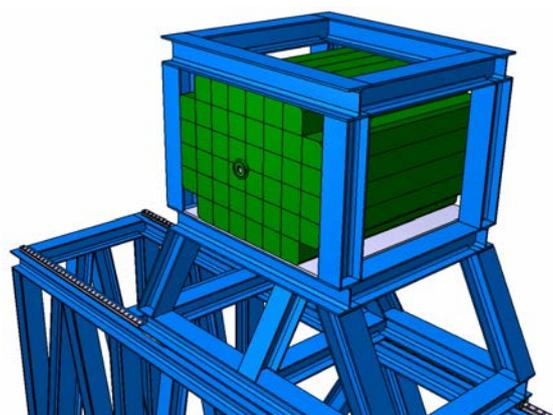


Рис. 1.8: Модель калориметра PSD.

Детектор непрореагировавших осколков PSD

Основная задача детектора непрореагировавших осколков (Projectile Spectator Detector, PSD) — выполнять измерения центральности столкновений тяжёлых ионов и ориентации плоскости реакции. PSD представляет собой калориметр из свинца и сцинтиллятора, спроектированный для измерения распределения энергии налетающих осколков и летящих вперёд частиц. Основные технические требования к PSD — покрытие углов от 0.3° до 3° и достаточное энергетическое разрешение для определения центральности столкновений, а также гранулярность в плоскости XY, необходимая для восстановления плоскости реакции.

В предлагаемом проекте детектор PSD составлен из 44 модулей (см. рис. 1.8) и перекрывает такую поперечную площадь, чтобы большая часть непрореагировавших фрагментов оставили всю свою энергию в детекторе. За счёт вытянутой в горизонтальном направлении геометрии детектор PSD позволяет регистрировать фрагменты, отклонённые магнитным полем дипольного магнита.

PSD предоставляет независимый метод для определения центральности соударения и множественности спекторов. PSD имеет разрешение по прицельному параметру, сравнимое с разрешением, предоставляемым кремниевой трековой системой STS и помогает улучшить определение центральности.

Разрешение по определению плоскости реакции с помощью PSD варьируется в диапазоне от 30° до 40° в зависимости от расстояния от мишени и энергии столкновения. С учётом предлагаемой вытянутой геометрии детектора и после коррекции нелинейности детектора в азимутальном направлении, разрешение практически не меняется в зависимости от силы поля дипольного магнита CBM.

Система считывания и сбора данных эксперимента СВМ

В концепции системы считывания и сбора данных эксперимента СВМ предусмотрено 4 функциональных уровня, каждый из которых реализован соответствующими платами (см. рис. 1.9). В общем случае к детектору примыкает плата передней электроники (FEB — front-end board), где осуществляются аналоговые преобразования и оцифровка сигналов. В зависимости от технологии детектора и требований к его характеристикам обработка сигнала может осуществляться разными способами. Следовательно, для каждого детектора выбирается соответствующий чип для FEB. Далее, данные в виде электрических цифровых сигналов поступают в плату считывания (ROB — read-out 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 [25]. После этого данные поступают в память, доступную центральному процессору ЭВМ по высокоскоростной шине через установленные в ЭВМ платы интерфейса, называемые FLIB. Аббревиатура FLIB обозначает FLES Interface Board, а FLES — описанный в следующем разделе специализированный аппаратно-программный комплекс отбора событий первого уровня. FLIB можно рассматривать как особый сетевой интерфейс, основной задачей которого является предоставление данных, поступающих по входным каналам, центральному процессору ЭВМ. В отличие от сетевого интерфейса Ethernet, данные поступают от разнородных плат передней электроники по разным протоколам.

Система отбора первого уровня FLES

FLES (First Level Event Selector) — аппаратно-программный комплекс для построения событий “на лету” и их отбора по заданным критериям [26].

Один входной канал FLES соответствует одному “входному узлу” (input node, IN) — ЭВМ с одной или несколькими платами FLIB. Все вычисления, необходимые для отбора данных будут осуществляться на так называемых “вычислительных узлах” (computing node, CN). Входные и вычислительные узлы объединены в компьютерную сеть посредством InfiniBand QDR, образуя уникальную распределённую вычислительную систему, см. рис. 1.10.

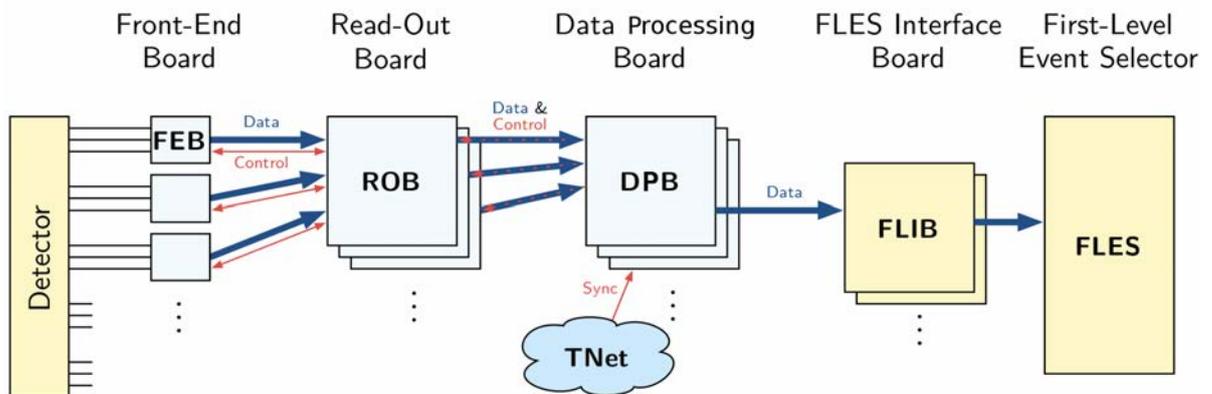


Рис. 1.9: Система считывания и сбора данных СВМ [26].

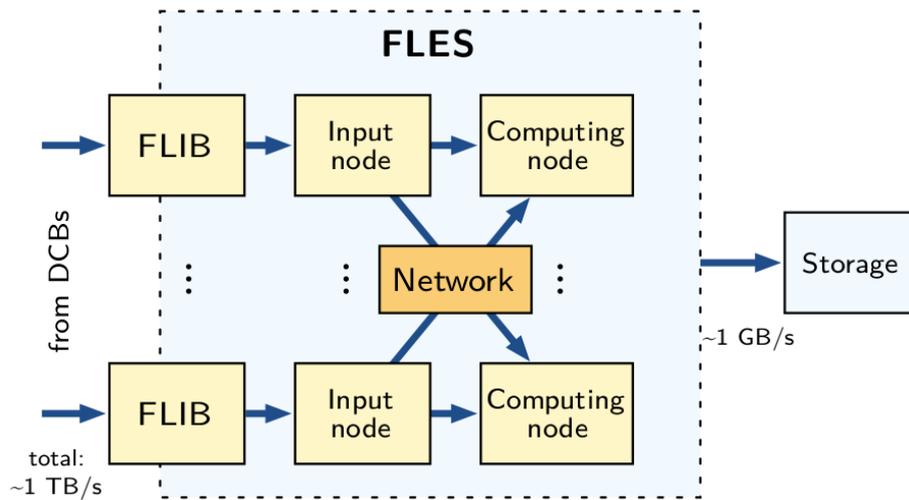


Рис. 1.10: Общая схема устройства FLES [26].

Первый этап работы FLES — построение интервалов (Interval building, IB) — получение контейнеров с данными со всех детекторов за некоторый интервал времени путём перегруппировки данных из срезов времени. Суть построения интервалов показана на рис. 1.11. Данные от одного “входного узла” приходят от группы каналов какого-то детектора и представляет собой последовательность срезов времени. Задача заключается в том, чтобы объединить все срезы, соответствующие одному интервалу времени, чтобы дальше передать на “вычислительный узел”.

Второй, выполняемый на “вычислительных узлах”, этап обработки данных во FLES — восстановление событий в интервале, реконструкция треков и частиц в восстановленных событиях и выработка сигнала о сохранении или отбросе интервала.

Для реконструкции частиц для дальнейшего физического анализа необходимо сгруппировать треки, соответствующие одному событию. Эту задачу решает процедура построения события. Если частота первичных взаимодействий невысокая, то между отдельными событиями имеются достаточно длительные интервалы времени, позволяющие разделять сигналы исключительно по временной информации. Такой подход рассматривается в СВМ как один из вариантов, но его применимость, очевидно, ограничена частотой первичных взаимодействий. Эксперименты с высокой частотой имеют такую особенность, что события могут перекрываться во времени. В этом случае временная отметка хита может использоваться как четвёртая координата в алгоритмах поиска треков. В частности, в алгоритме поиска треков, используемом в СВМ и основанном на клеточном автомате [27], время используется

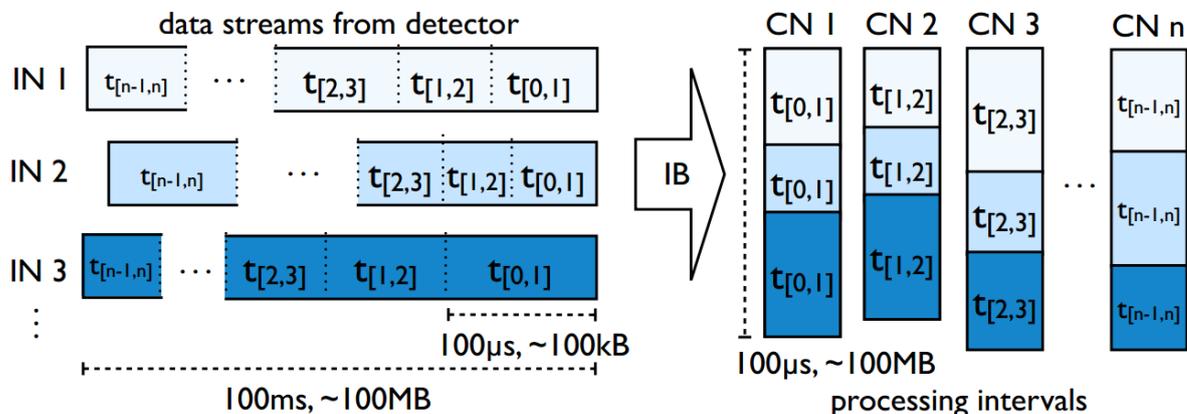


Рис. 1.11: Построение интервала, рисунок предоставлен D. Hutter.

как 4-я координата при построении сегментов и при фитировании трека с помощью Фильтра Кальмана [28]. В классическом варианте построение сегментов выполняется исключительно по геометрическим координатам, а в 4d-трекинге рассматривается также и временная координата (x, y, z, t) . Если обычно для образования сегмента хит на следующей станции должен находиться в пределах заданного телесного угла, то теперь он также должен находиться в заданном интервале по времени. В процедуре фитирования треков, которая выполняется в СВМ STS с помощью фильтра Кальмана, выполняется расширение вектора состояния на временную координату $(x, y, t_x, t_y, q/p, t)$.

Для эксперимента СВМ был выполнен оценочный расчёт, в котором в качестве отправной точки было принято, что аппаратное обеспечение позволяет сохранить 1 Гбайт данных в секунду. Считается, что одно событие СВМ в среднем имеет объём 40 Кбайт. Отсюда следует, что максимальная частота первичного взаимодействия может быть 25 кГц. В стартовой конфигурации СВМ частота первичного взаимодействия равна 10 МГц, следовательно, необходимо уменьшить поток данных в 400 раз. В полноценном режиме работы СВМ ожидается 25 МГц, т.е. $25 \cdot 10^6 \cdot 40 \text{ Кбайт} = 1 \text{ Тбайт/сек}$. Планируется разбить этот поток величиной 1 Тбайт/сек на 1000 входных каналов FLES, каждый по 1 Гбайт/сек, передающихся по 10-Гбитным оптическим каналам связи. Вычислительная подсеть будет иметь приблизительно 60000 ядер.

1.2 Детектор RICH эксперимента СВМ

1.2.1 Обзор некоторых реализованных детекторов черенковских колец

Использование детекторов черенковских колец со сферическими фокусирующими зеркалами для идентификации частиц имеет долгую историю [29]. Следуя за постоянно возрастающими требованиями со стороны экспериментов, а также используя новейшие технологические достижения в различных областях, все основные подсистемы детекторов RICH прошли впечатляющую эволюцию. К основным подсистемам можно отнести фокусирующие зеркала, системы фиксации и корректировки положения зеркал, системы газообеспечения, оболочку корпуса, фотодетекторы и системы считывания. Детектор СВМ RICH, которому посвящена данная работа, опирается в той или иной степени на опыт нескольких экспериментов предыдущего поколения. В нижеследующих разделах будут описаны несколько приборов, сравнение с которыми позволит понять уникальное место СВМ RICH в ряду аналогичных установок.

Детектор RICH-1 эксперимента COMPASS

Экспериментальная установка NA58, также известная как COMPASS (“Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy”) представляет собой систему из двух спектрометров длиной 60 метров (см. рис. 1.12) за неподвижной мишенью на отводе пучка M2 ускорителя SPS в CERN. Эксперимент был предложен в 1996 году. Набор данных разбит на два этапа: COMPASS I (2002–2011) и COMPASS II (2012–2018).

Детектор Черенковских колец RICH-1 функционирует с 2002 г. RICH-1 подвергается постоянной оптимизации. Основная задача детектора Черенковских колец — разделение π , p и K в диапазоне импульсов от 3 до 55 ГэВ/с при частоте триггеров 20 кГц в полном акцептансе спектрометра, составляющем ± 250 мрад по горизонтали и ± 180 мрад по вертикали. Для минимизации отрицательного влияния на эффективность стоящего ниже по пучку электромагнитного калориметра детектор RICH-1 должен иметь минимальное количество материала в акцептансе.

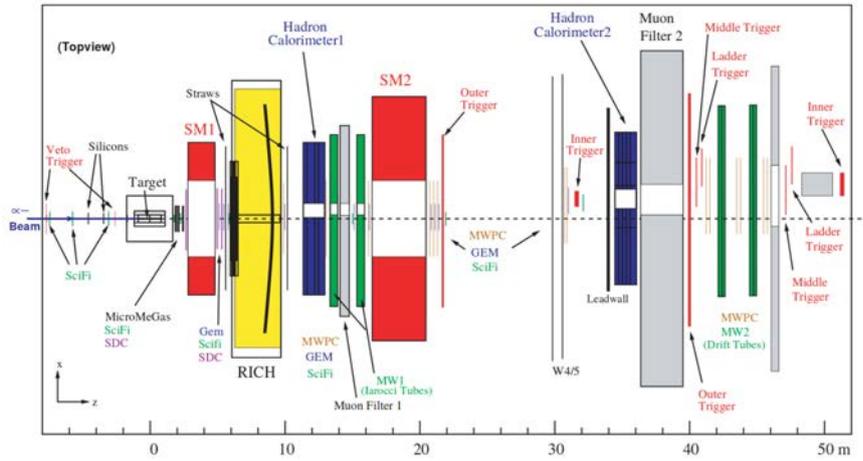


Рис. 1.12: Схема эксперимента COMPASS [30].

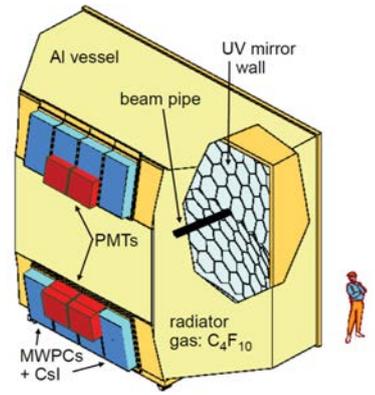


Рис. 1.13: Модель детектора RICH эксперимента COMPASS [31].

Габариты корпуса детектора COMPASS RICH-1 (см. рис. 1.13), выполненного из алюминия, составляют $6.6 \times 5.3 \times 3.3 \text{ м}^3$. Внутри расположен газовый радиатор C_4F_{10} длиной 3 м и объёмом около 83 м^3 . Пороги по импульсу для Черенковского света: для π — 2.5 ГэВ/с, для K — 8.9 ГэВ/с и 17 ГэВ/с для p . В центре детектора проходит цилиндрический ионопровод диаметром 100 мм, наполненный гелием. Газовая система закрытого типа поддерживает радиатор под избыточным давлением 1 ± 0.1 мбар. Передняя и задняя стенки корпуса выполнены из сэндвич-панелей из жёсткого пористого материала и алюминиевых фольг.

Система фокусировки состоит из двух сферических зеркал радиусом 6.6 м, составленных из 116 сегментов шести- и пятиугольной формы, общей площадью более 21 м^2 . Отражающая поверхность состоит из алюминиевого слоя толщиной 80 нм, нанесённого на боросиликатное стекло толщиной 7 мм, и покрытого защитным слоем из MgF_2 толщиной 30 нм. Зеркала устанавливаются на сетевидную алюминиевую опорную структуру. Узлы сетки лежат на сферической поверхности с точностью лучше 1 мм, [31]. Для более точной юстировки положения зеркал коллаборацией COMPASS был разработан метод контроля индивидуальных отклонений сегментов зеркал “на лету”, называемый CLAM (“a continuous line alignment and monitoring method”).

Для фокусировки на фоточувствительные камеры, расположенные за пределами геометрического акцептанса, центры сфер зеркал смещены по вертикали от пучка на 1.6 м, а образовавшийся в результате этого зазор между двумя зеркалами приводит к потере 4% площади отражающей поверхности.

Исходя из необходимости иметь суммарную площадь фоточувствительных камер 5.3 м^2 , изначально для реализации были выбраны многопроволочные пропорциональные камеры (MWPC) с сегментированным фотокатодом из CsI. RICH-1 оборудован восемью идентичными камерами, каждая площадью $576 \times 1152 \text{ мм}^2$. Фотокатоды выполнены на двух двухсторонних печатных платах размером $576 \times 576 \text{ мм}^2$. Окна состоят из двух одинаковых пластин из кварцевого стекла размером $600 \times 600 \times 5 \text{ мм}^3$. Сегментированный фотокатод обеспечивает размер пикселя $8 \times 8 \text{ мм}^2$. В общей сложности имеется 82944 канала.

В 2006 г. с целью повышения эффективности детектора было выполнено комплексное обновление центральной области фоточувствительной камеры, составляющей 25% от всей площади. MWPC были заменены на МА ФЭУ с индивидуальными линзами и соответствующей считывающей электроникой. В общей сложности было установлено 4 панели по 144 МА ФЭУ Hamamatsu R7600-03-M16, каждый из которых имеет 16 каналов, входное стекло, прозрачное в ультрафиолетовой области, и специальный делитель напряжения.

Сигнал с МА ФЭУ считывается платами передней электроники, основанными на ASIC “CMAD” [32], реализующем 8-канальный предусилитель-дискриминатор, разработанный на

основе “MAD4” специально для COMPASS RICH-1. CMAD позволяет работать на частоте до 5 МГц на канал. Индивидуальный подбор порогов в каналах позволил исключить перекрёстные помехи, удерживая эффективность регистрации одиночных фотоэлектронов на уровне 95%. Считывающая электроника COMPASS RICH-1 монтируется на детектор, образуя очень компактную установку, которая экранирована от внешнего электромагнитного поля медными пластинами, выполняющими также и роль радиаторов, охлаждаемых водой, циркулирующей по медным трубкам. Оцифрованные данные с плат передней электроники передаются по оптике к платам считывания CATCH, которые группируют данные и передают дальше также по оптике через S-LINK в систему сбора данных эксперимента.

Детектор черенковских колец эксперимента COMPASS был взят за основу при разработке аналогичного детектора эксперимента CBM. По ходу работы были внесены существенные изменения, учитывающие специфику этого эксперимента.

Детекторы RICH-1 и RICH-2 эксперимента LHCb

LHCb — один из четырёх крупных экспериментов на Большом Адронном Коллайдере (LHC). LHCb посвящён изучению редких эффектов CP-нарушения в распадах прелестных адронов, измерению углов треугольника унитарности, прецизионной проверке предсказаний Стандартной Модели в редких радиационных, полулептонных и лептонных распадах B -мезонов, изучению редких распадов очарованных частиц и экзотических распадов τ -лептонов. Установка LHCb представляет собой прямой одноплечевой спектрометр, предназначенный регистрировать продукты распада очарованных и прелестных адронов, рождённых в p - p столкновениях и летящих под малыми углами к пучку. Схема установки LHCb показана на рис. 1.14.

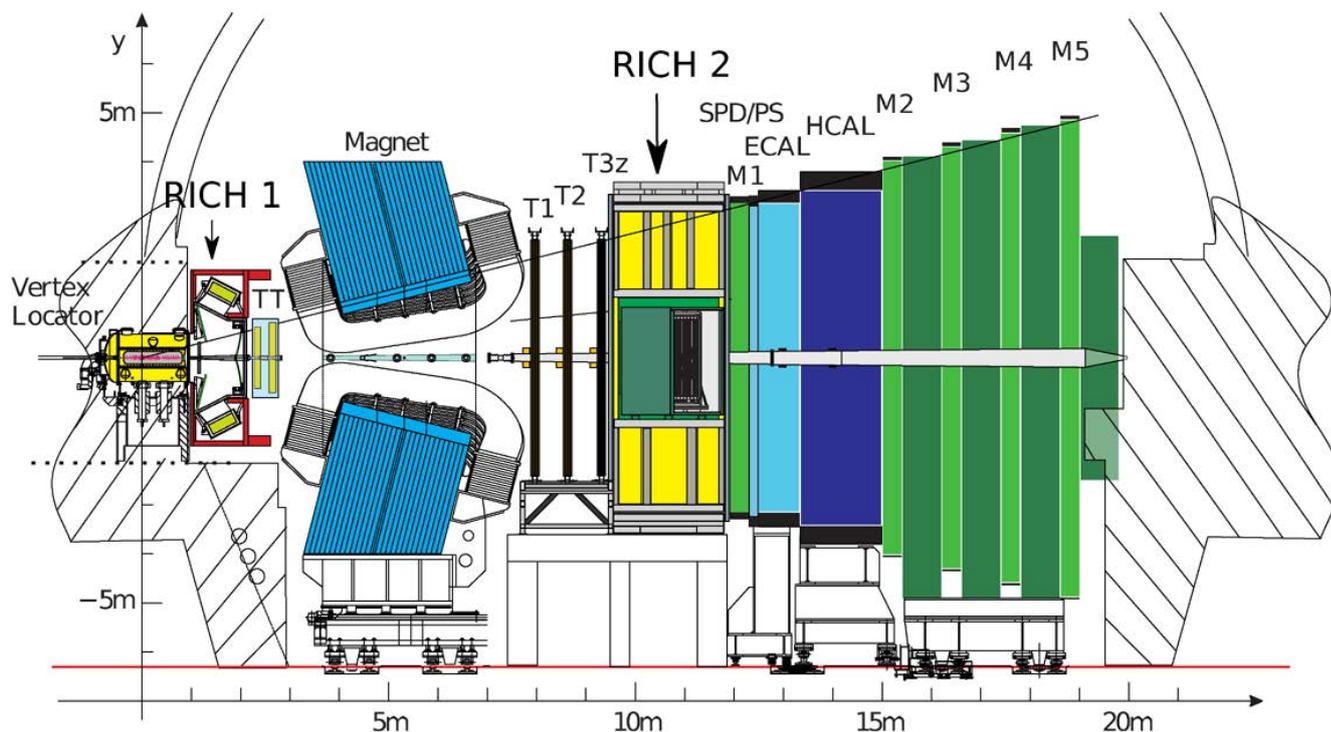


Рис. 1.14: Схема установки LHCb [33].

LHCb RICH обеспечивает идентификацию частиц в диапазоне импульсов от 2 до 100 ГэВ/с. Два детектора черенковских колец полностью охватывают необходимый угловой акцептанс 15–300 мрад по отношению к оси пучка. RICH-1 покрывает нижний и средний диапазон импульсов от 2 до 40 ГэВ/с во всём угловом акцептансе 25–300 мрад. RICH-2 покрывает диапазон высоких импульсов от 15 до 100 ГэВ/с в области 15–120 мрад. RICH-1 расположен

в диапазоне $990 \text{ мм} < z < 2165 \text{ мм}$, имеет высоту 4 м и радиус зеркала 2700 мм. RICH-2 расположен в диапазоне $9500 \text{ мм} < z < 11832 \text{ мм}$, имеет высоту 7.2 м и радиус зеркала 8600 мм. RICH-1 расположен по возможности близко к точке взаимодействия. С целью минимизации количества материала у RICH-1 нет отдельного входного окна — в качестве передней стенки контейнера для газового радиатора используется выходная стенка вакуумной камеры вершинного детектора VELO. Выходное окно RICH-1 изготовлено из лёгкого материала, представляющего собой сэндвич-панель из углепластика и жёсткого пористого полимера.

RICH-2 располагается за магнитом и трекинговыми детекторами. Так же, как и в случае RICH-1, входное и выходное окна RICH-2 выполнены из легких сэндвич-панелей из пористого материала, покрытых углепластиком и алюминием соответственно. По причине низкой дисперсии в качестве Черенковских радиаторов используются фтор-углеродные газы — C_4F_{10} в RICH-1 и CF_4 в RICH-2 — при комнатной температуре и нормальном давлении. Коэффициенты преломления соответственно равны 1.0014 и 1.0005 при $\lambda = 400 \text{ нм}$. Около 5% CO_2 было добавлено в CF_4 для тушения сцинтилляции в газе.

Порог по импульсу каонов для черенковского света в C_4F_{10} составляет 9.3 ГэВ/с. Для идентификации частиц при низких импульсах на входе в RICH-1 был помещён второй радиатор: стенка толщиной 50 мм, составленная из 16 плиток аэрогеля с коэффициентом преломления равным 1.03.

Оба детектора имеют схожую оптическую систему, состоящую из наклонённых сферических зеркал в паре с плоскими зеркалами. Наличие двух зеркал позволяет значительно сократить габариты детектора вдоль направления пучка. Каждая оптическая система разделена на две половины: RICH-1 — симметрично относительно горизонтальной оси, RICH-2 — симметрично относительно вертикальной оси. Разделение фокусирующей и детектирующей подсистем RICH-1 на симметричные половины было выполнено из-за необходимости наличия магнитного экрана вокруг фотодетекторов для защиты от магнитного поля от расположенного в непосредственной близости дипольного магнита. Сферические зеркала RICH-1 (4 сегмента) собраны из четырёх квадрантов на углепластиковой основе, в то время как зеркала RICH-2 (56 сегментов) и все плоские зеркала (16 и 40 сегментов у RICH-1 и RICH-2 соответственно) собраны из более мелких элементов на основе из тонкого стекла.

Черенковские фотоны, рождённые заряженной частицей, проходящей сквозь радиаторы, фокусируются в кольца на плоскости фотодетекторов, расположенных за пределами акцептанса спектрометра. Инновационные гибридные фотодетекторы (HPD) были разработаны специально для применения в LHCb RICH. HPD представляют собой вакуумную трубку, имеющую активный диаметр 75 мм, с кварцевым окном и многощелочной фотокатод. Фотоэлектроны фокусируются на массив кремниевых пикселей посредством ускоряющего напряжения -16 кВ. Фотодетектор работает в режиме счета фотоэлектронов, формируя логический фронт на каждый зарегистрированный фотоэлектрон. Пиксели организованы в массив 32×32 , всего 1024 пикселя на трубку. Размер пикселя составляет $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$ на уровне фотокатода. В общей сложности 484 HPD формируют 4 плоскости фотодетекторов. Каждый из двух RICH детекторов использует две плоскости, 196 HPD в RICH-1, 288 — в RICH-2. Плоскости фотодетекторов отделены от радиатора кварцевым окном. Чипы передней электроники смонтированы непосредственно в вакуумном пространстве внутри HPD. С целью повышения быстродействия предусмотрено обновление детектора, включающее в себя замену HPD на многоанодные ФЭУ H12700 — такие же, как и в детекторе черенковских колец эксперимента CBM.

Рассмотренные детекторы интересны для CBM тем, что реализовано деление оптической системы по вертикали, имеет место работа фотодетекторов в магнитном поле, используются (в обновленной версии) такие же фотоумножители и через детектор проходит вакуумная пучковая труба. Важным отличием LHCb является значительно больший бюджет, приходящийся на детектор черенковских колец.

Детектор RICH эксперимента HERA-b

HERA (нем. Hadron-Elektron-RingAnlage или англ. Hadron-Electron Ring Accelerator) — первый и единственный на данный момент лептон-протонный коллайдер, функционировавший с 1992 г. по 2007 г. в DESY, Гамбург, Германия. HERA-b — один из четырёх экспериментов на HERA — представляет собой эксперимент с фиксированной мишенью для измерения редких распадов B -мезонов, рождающихся в столкновениях протонов с импульсом 920 ГэВ/с с фиксированной мишенью. Отличительной особенностью этого эксперимента является то, что в роли мишени выступали 8 проволочек из различных материалов, помещаемых в гало протонного пучка. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.15.

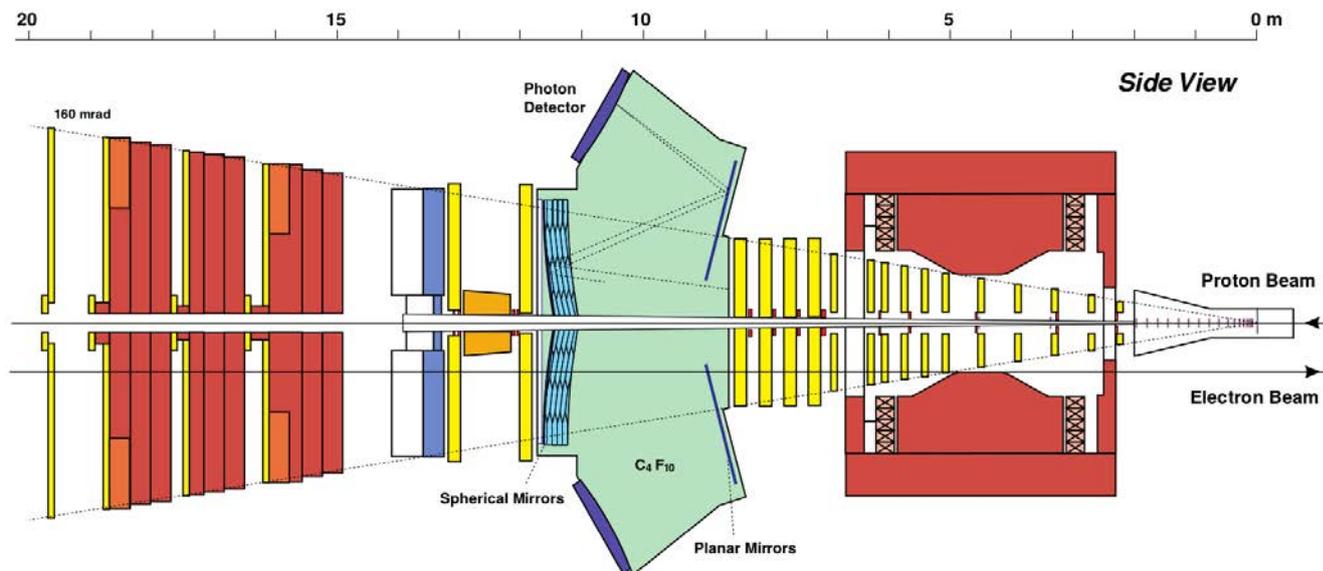


Рис. 1.15: Схема установки HERA-b [34].

HERA-b RICH — один из основных компонентов спектрометра HERA-b. Его задача — идентификация заряженных адронов, в частности K -мезонов, рождающихся в распадах B -мезонов. Идентификация заряженных K -мезонов означает их отделение от π -мезонов в диапазоне импульсов 3–5 ГэВ/с при частоте первичных взаимодействий до 40 МГц.

Детектор RICH эксперимента HERA-b имеет газовый радиатор C_4F_{10} объёмом 108 м³. Длина радиатора 2.8 м, коэффициент преломления $n = 1.00137$, порог импульса для рождения Черенковских фотонов для π -мезонов и K -мезонов составляет 2.7 ГэВ/с и 9.6 ГэВ/с соответственно. Для частиц с $\beta = 1$ Черенковский угол равен 51.5 мрад (52.4 мрад), а разница между π -мезонами и K -мезонами составляет 0.9 мрад при 50 ГэВ/с. Радиатор поддерживается при избыточном давлении 2.5 мбар. В среднем регистрируется 33 хита на кольцо.

Корпус детектора изготовлен из нержавеющей стали, кроме передней и задней стенок, сделанных из алюминия толщиной 1 мм. После фокусировки фотоны выходят из корпуса через стенку толщиной 2 мм из оргстекла, прозрачного в ультрафиолетовой области. Передняя стенка HERA-b RICH расположена на расстоянии 8.5 м от мишени.

Система фокусировки состоит из двух пар зеркал, расположенных симметрично относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Первое зеркало сферическое, второе — плоское. Сферические зеркала составлены из 80 полных или обрезанных шестиугольных сегментов, имеют радиус кривизны 11.4 м и толщину 7 мм. Они покрывают прямоугольную область 6×4 м. Каждый сегмент крепится к раме тремя моторизованными актуаторами с удалённым управлением. Для фокусировки за пределы геометрического акцептанса сферические зеркала наклонены на 9° от пучка. Каждое из двух плоских зеркал состоит из 18 сегментов. Для учёта неидеальности позиционирования сегментов зеркал

использовалась специальная методика, основанная на анализе большого массива экспериментальных данных [35, 36, 37].

HERA-b RICH имеет две фоточувствительные камеры, расположенные соответственно над и под пучком. Одна фоточувствительная камера составлена из 7 супермодулей $1.1 \times 0.4 \text{ м}^2$. Поверхность камеры аппроксимирует эллиптический цилиндр. Один супермодуль состоит из 16×6 модулей, каждый экранирован от магнитного поля тонкими пластинами из пермаллоя. В общей сложности было установлено 1488 МА ФЭУ R5900-00-M16 и 752 МА ФЭУ R5900-03-M4 фирмы Hamamatsu т.е. 26816 каналов. Габариты одного такого МА ФЭУ составляют $28 \times 28 \text{ мм}^2$, а чувствительная площадь $18 \times 18 \text{ мм}^2$. Перед каждым МА ФЭУ стоят две линзы для того чтобы привести в соответствие площадь, занимаемую МА ФЭУ, и чувствительную. Использование линз приводит к тому что размер пикселя становится равным $9 \times 9 \text{ мм}^2$ у 16-пиксельного R5900-00-M16 и $18 \times 18 \text{ мм}^2$ у 4-пиксельного R5900-03-M4.

МА ФЭУ монтируются на платы-адаптеры размером $70 \times 70 \text{ мм}^2$, на которых осуществляется распределение высокого напряжения и аттенюация сигнала с МА ФЭУ. Платы передней электроники построены на основе чипа ASD8 — предусилителя, формирователя и дискриминатора. Сигналы с передней электроники передаются по 16-канальному кабелю типа витая пара длиной 7.5 м к драйверам передней электроники (front end driver, FED). 1 FED имеет 4 дочерние платы, к каждой из которых подключено 16 кабелей, и одну материнскую. 1 FED обрабатывает 1024 канала, всего используется 28 таких наборов. Материнская плата выполняет роль интерфейса к DAQ системе всей установки HERA-b и имеет буфер, в котором может храниться до 128 событий в ожидании сигнала от триггера первого уровня.

Конструкция детектора черенковских колец эксперимента HERA-b имеет много общего с CBM RICH: реализовано деление оптической системы по вертикали, фоточувствительная поверхность имеет неплоскую форму, используются многоанодные ФЭУ, через детектор проходит вакуумная пучковая труба, а для позиционирования сегментов зеркал используются актуаторы с удалённым управлением. Кроме того, интерес представляет разработанная методика поправок на смещения зеркал.

Отметим, что все рассмотренные детекторы черенковских колец отличаются от аналогичного детектора эксперимента CBM, во-первых, меньшим угловым захватом, во-вторых, большим расстоянием до точки взаимодействия (за исключением LHCb RICH-1) и, в-третьих, идентифицируемыми частицами. В случае CBM идентификации подлежат электроны и позитроны, а в рассмотренных детекторах — легкие адроны.

1.2.2 Особенности детектора RICH эксперимента CBM

Конструкция и компоновка детектора черенковских колец эксперимента CBM подвергается постоянной оптимизации [38]. Ниже рассмотрена версия, актуальная на момент написания данной диссертации. Модель CBM RICH представлена на рис. 1.16. Значительная часть выполненных к настоящему времени работ по оптимизации описана в главе 3. Разработке и исследованиям прототипа системы считывания CBM RICH в составе полнофункционального прототипа детектора RICH посвящены главы 4 и 5.

Акцептанс детектора, с учётом расширения по горизонтали из-за наличия магнитного поля, разводящего частицы, представляет собой конус $0^\circ\text{--}25^\circ$ с вершиной в точке первичного взаимодействия, растянутый по горизонтали в 1.5 раза.

Продольный размер RICH-детектора определяется доступным пространством между кремниевой трековой системой STS, расположенной внутри магнита, и детектором переходного излучения TRD. С одной стороны, высокая длина радиатора предпочтительна, т.к. она определяет высокий выход черенковских фотонов. С другой стороны, чем меньше расстояние между последней станцией STS и первой станцией TRD, тем выше эффективность трекинга. Не последнее значение имеют финансовые аргументы. Уменьшение длины детектора озна-

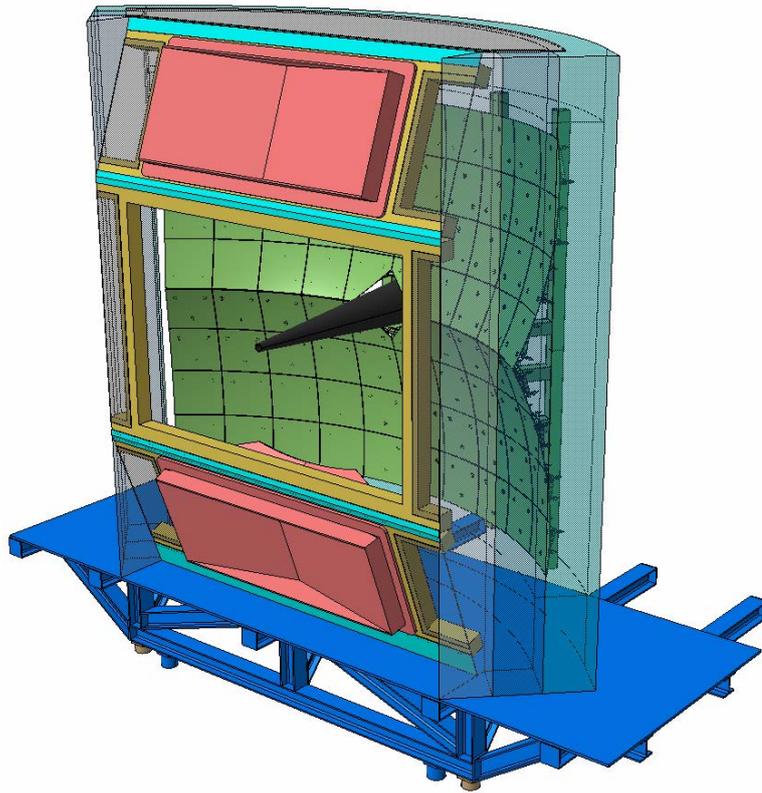


Рис. 1.16: Модель детектора RICH эксперимента CBM.

чает уменьшение размеров фоточувствительной камеры, следовательно уменьшение количества фотодетекторов и уменьшение площади зеркал, то есть снижение стоимости прибора. Из этих соображений для RICH отведено пространство от 1800 мм до 3700 мм по оси пучка, не ограниченное по другим осям ничем, кроме пола. Длина этого пространства вдоль оси пучка составляет 1900 мм. Перед RICH и за ним отведено ещё по 100 мм общего пространства для стыковки магнита, STS, RICH и различных сегментов пучковой трубы. Зеркало расположено на расстоянии 3500 мм от точки взаимодействия, таким образом, рабочая длина радиатора составляет 1700 мм. Исходя из того факта, что зеркала должны полностью покрывать геометрический аксептанс, ширина детектора выбрана 5268 мм, а высота 4420 мм.

CBM RICH будет иметь корпус из алюминия толщиной 5 мм. Передняя и задняя стенки, находящиеся в аксептансе, будут выполнены из каптона толщиной 250 мкм для снижения толщины материала [15].

Радиатор

Разделение электронов и π -мезонов в диапазоне импульсов до нескольких ГэВ/с требует низкого коэффициента преломления радиатора. Поэтому в CBM RICH планируется использование углекислого газа. CO_2 имеет пороговый гамма-фактор $\gamma_{th} = 1/\sqrt{1 - 1/n^2} = 31.6$, где $n = 1.0005$ — коэффициент преломления для ближнего ультрафиолета при нормальных условиях. Максимальный черенковский угол составляет $\theta = \arccos(1/n) = 1.81^\circ$. Порог черенковского излучения для заряженных π -мезонов составляет $p = 4.41$ ГэВ/с, а для электронов и позитронов — $p = 0.03$ ГэВ/с. При этом порог для каонов составляет ≈ 16 ГэВ/с. Верхняя граница по импульсу составляет ≈ 10 ГэВ/с и определяется тем, что кольца от электронов и π -мезонов должны быть дискриминированы по радиусу с эффективностью около 90%.

Нижняя граница длин волн, пропускаемых CO_2 , составляет 185 нм. Оценки показывают, что вклад сцинтилляции радиатора в общий счёт фотоэлектронов пренебрежимо мал.

Газовая система

Закрытая газовая система сконструирована на основе опыта экспериментов STAR и PHENIX. Система автоматического регулирования поддерживает CO_2 при избыточном давлении 2 мбар. В контуре принудительной рециркуляции до 30% газа ответвляется в систему очистки на основе активной меди и осушки для избавления от кислорода и влаги. Система мониторинга следит за попаданием параметров газовой системы в установленные пределы и запускает необходимые процедуры коррекции в случае выхода за эти пределы.

Система фокусировки

Фокусировка черенковского света на фоточувствительные камеры достигается однократным отражением черенковских фотонов от двух сегментированных сферических зеркал радиусом 3000 мм, расположенных на расстоянии 3500 мм от точки взаимодействия. Центры сферических поверхностей и сами зеркала расположены симметрично относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Зеркала полностью покрывают аксептанс детектора. Площадь каждого зеркала составляет приблизительно 7.5 м^2 . Линия, соединяющая центр поверхности зеркал и центр сферы, наклонена вокруг оси X приблизительно на 10° в направлении от пучка, что позволяет разместить фоточувствительные камеры не только за пределами аксептанса, но и вывести их в зону слабого магнитного поля. Оптимизация формы зеркал подробно рассмотрена в разделе 3.2.1.

Для того чтобы выполнить требование к точности, зеркало такого размера технологически возможно изготовить только из сегментов. Прототипы сегментов тестировались на однородность и отражательную способность. Были выбраны зеркала, произведённые фирмой JLO-Olumouc, Чехия. Зеркала будут выполнены из SIMAX-стекла толщиной 6 мм и покрыты слоем $Al + MgF_2$ с внутренней стороны. Алюминий с покрытием хорошо отражает фотоны от видимого света до дальнего УФ. Слой MgF_2 используется как защитный слой с целью предотвращения появления пленки оксида алюминия, который поглощает ультрафиолет. Характерный размер сегмента — 40–50 см. Каждое зеркало будет разделено на 40 сегментов, расположенных в четырёх горизонтальных рядах.

Каждый сегмент зеркал будет крепиться на раме с помощью трёх винтов. При этом, в прототипе и при калибровочных запусках полномасштабного детектора могут использоваться моторизированные актуаторы, необходимые для оптимизации положения сегментов по ходу сеанса. Далее рассматривается возможность замены, с помощью специально разработанной процедуры, механизированных актуаторов на легкие опорные винты, что позволит сохранить оптимальную юстировку и снизить количество вещества в аксептансе.

Метод CLAM [39] позволяет оценивать неравномерность отклонений отдельных сегментов зеркал по результатам анализа фотографий отражённых прямых линий. Планируется применение данного метода для калибровки CBM RICH.

Фотодетекторы

Фоточувствительная камера разрабатывается для регистрации одиночных фотонов с высокой эффективностью. Для успешной реконструкции событий необходима точная регистрация координат и времени прилёта каждого фотона. Используется две камеры цилиндрической формы, расположенные над и под пучком в фокальной плоскости сферических зеркал. Черенковский свет, отражённый от верхнего зеркала, регистрируется верхней камерой. Соответственно, свет, отражённый от нижнего зеркала, регистрируется нижней камерой.

В качестве фоточувствительных элементов будут применяться многоанодные фотоэлектронные умножители Hamamatsu H12700, см. раздел 4.1. Использование данной модели МА ФЭУ не требует дополнительных фокусирующих элементов. Для повышения эффектив-

ности регистрации область перекрытия спектров черенковских фотонов и чувствительности камеры будет расширена за счёт использования слоя сместителя спектра на поверхности входного окна МА ФЭУ [40, 41]. Один такой МА ФЭУ имеет габариты 52×52 мм². Для защиты камеры от магнитного поля будут использоваться экраны из магнитно-мягкого железа. Планируется, что одна фоточувствительная камера будет составлена из 7×14 модулей, содержащих 2×3 МА ФЭУ. С учётом зазора в 1 мм между МА ФЭУ для запаса по точности, размер модуля составляет $158 \text{ мм} \times 105 \text{ мм}$.

Помимо МА ФЭУ в модуль входят 12 плат передней электроники DIRICH [42], одна плата, обеспечивающая питание, и одна плата концентрации данных. Механической основой модуля служит плата-адаптер, к которой с одной стороны подсоединяются МА ФЭУ, а с другой — все платы, см. также 3.2.3.

Система считывания и сбора данных CBM RICH подчиняется концепции, описанной в разделе 1.1.2. Исследованию прототипа этой системы посвящены главы 4 и 5.

Реконструкция и анализ CBM RICH

Стремление к уменьшению общей стоимости детектора привело к уменьшению его размеров. Количество зарегистрированных фотонов пропорционально длине радиатора вдоль пучка, а значит уменьшение детектора приводит к понижению его эффективности. Так, например, HERA-b RICH (см. раздел 1.2.1) регистрирует 33 фотона на кольцо, в то время как в соответствии с моделированием в CBM будет регистрироваться 28 фотонов на кольцо.

То, насколько хорошо хиты выстраиваются на кольце, зависит от углового разрешения детектора для черенковских фотонов. В работе [15, 43] подробно рассмотрены факторы, влияющие на это разрешение. Показано, что основные вклады вносят: гранулярность камеры, неидеальности зеркала, многократное рассеяние излучающей частицы и хроматическая дисперсия черенковского света в радиаторе, отклонение траектории частицы от прямолинейной в паразитном магнитном поле. Вклады многократного рассеяния и паразитного магнитного поля возрастают при уменьшении импульса. В качестве характерной величины приведём $\sigma = 0.38$ мрад для электронов с импульсом $p = 8$ ГэВ/с.

Процедура восстановления события в CBM RICH схематично показана на рис. 1.17, подробнее см. [44]. 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 и описанный в работах [45, 46]. После этого определяются параметры кольца и далее осуществляется реконструкция треков частиц с применением информации с других детекторов.

Ниже обсуждаются характеристики детектора CBM RICH, которые были получены в результате моделирования в среде CbmRoot с применением генератора UrQMD [47] и реалистичной диджитализации, основанной на результатах анализа данных пучковых тестов прототипа.

Вследствие большой множественности в центральных столкновениях в одном событии в RICH регистрируется до 65 колец. На рис. 1.18 приведено изображение на одной плоскости реконструкции в одном смоделированного события $Au + Au$ 25 ГэВ/нуклон.

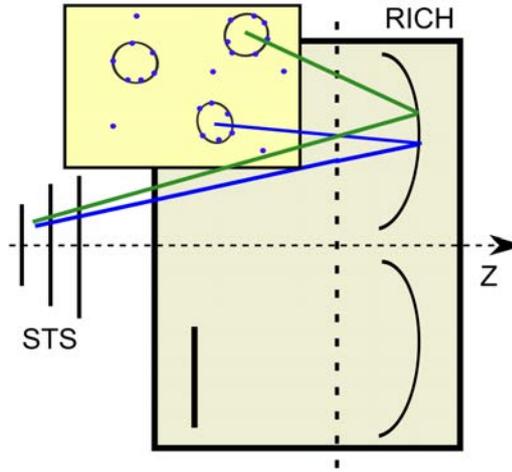


Рис. 1.17: Сначала независимо выполняется реконструкция треков в STS и восстановление колец в RICH. Затем трек STS экстраполируется до зеркала и рассчитывается пересечение отражённого продолжения с плоскостью реконструкции RICH. Последний этап — сопоставление продолженных треков с центрами колец [44].

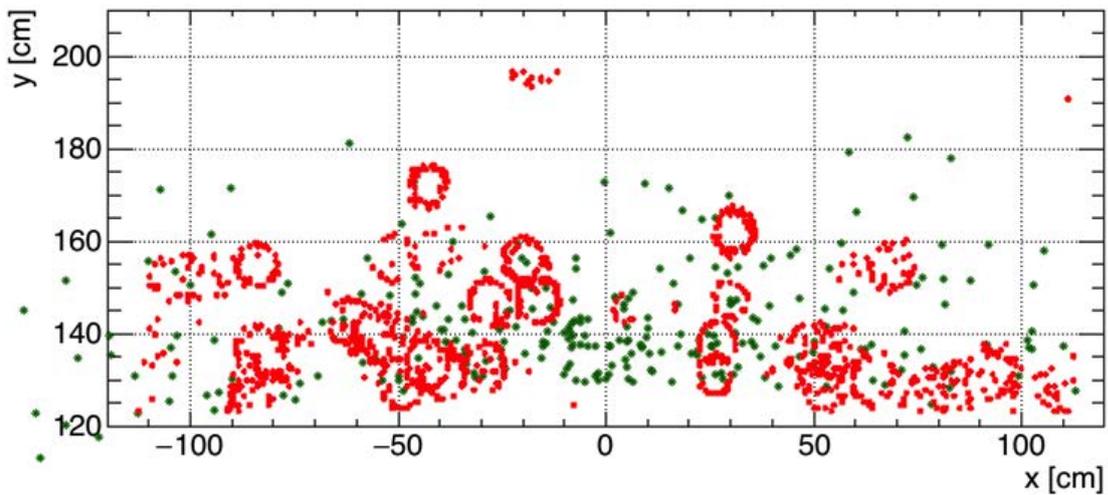


Рис. 1.18: Типовое событие (UrQMD, 25 ГэВ/нуклон) в одной фотодетектирующей плоскости RICH. Красные точки — хиты RICH, зелёные — продолжения треков STS.

Плотность хитов в одиночном событии достигает значения 0.5 хитов/см². Алгоритмы реконструкции должны быть достаточно быстрыми, рассчитанными на достаточно широкий диапазон количества хитов на кольцо (от 5 до 40), и способными работать с эллиптической формой колец.

Для определения характеристик СВМ RICH с помощью моделирования в каждое событие к частицам UrQMD были подмешаны по $5e^+$ и $5e^-$ из точки взаимодействия, имеющих поперечный импульс, разыгранный в соответствии с равномерным распределением в диапазоне от 0 до 3 ГэВ/с, и направлением в пределах геометрического акцептанса. В моделировании при энергии пучка 8 ГэВ/нуклон был исключён детектор TRD.

На рис. 1.19 показана эффективность реконструкции колец, которая определяется как отношение N_{rec}/N_{acc} , где N_{rec} — количество верно найденных колец после реконструкции, а N_{acc} — количество колец, находящихся в акцептансе RICH, которые возможно реконструировать, т.е. колец, имеющих минимум 7 зарегистрированных хитов в RICH.

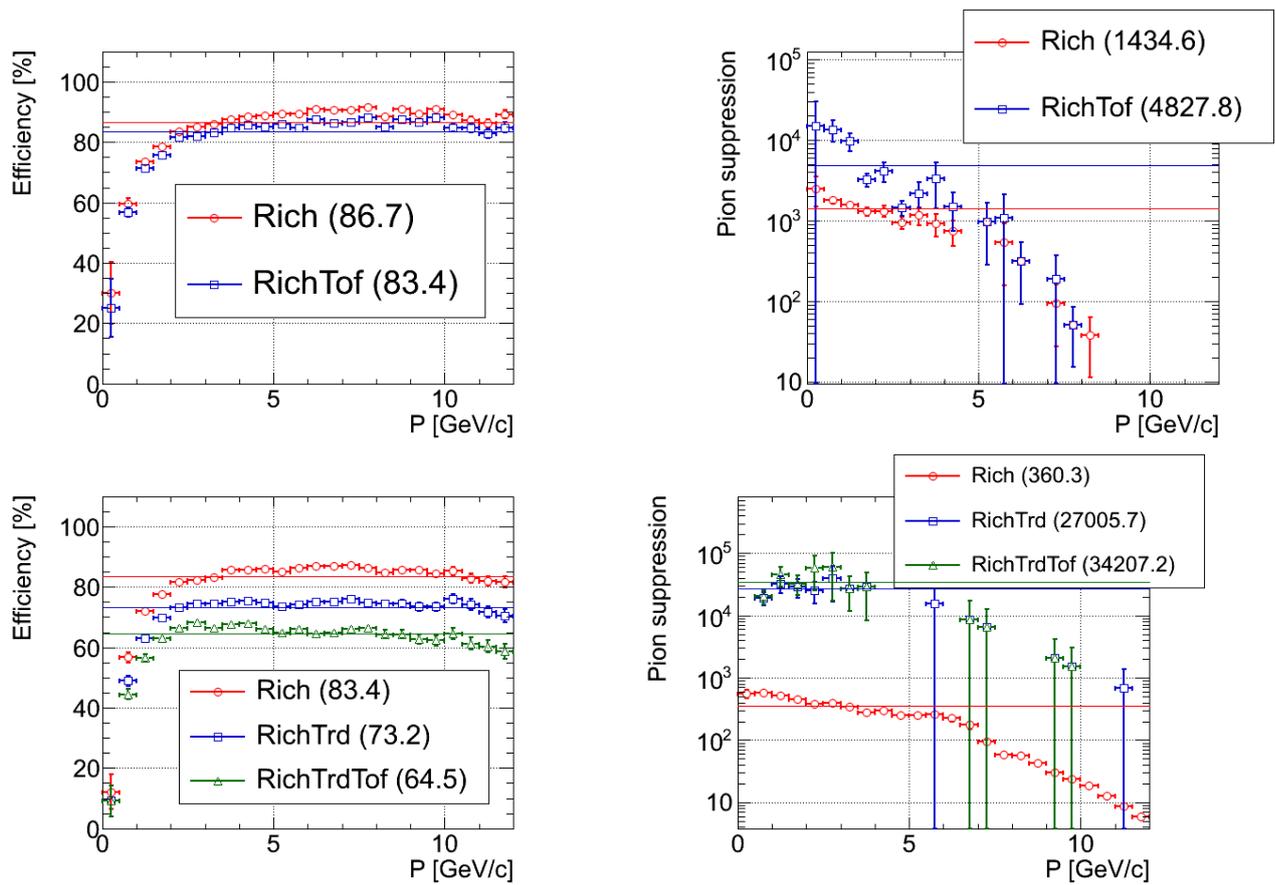


Рис. 1.19: Слева — эффективность идентификации электронов, справа — фактор подавления пионов; сверху — 8 ГэВ/нуклон, снизу — 25 ГэВ/нуклон.

На рис. 1.20 показаны смоделированные спектры инвариантных масс диэлектронов при распаде лёгких векторных мезонов с учётом разнообразных фонов, а в таблице 1.3 собрана информация о фонах и отношении сигнал-фон при реконструкции этих частиц с помощью СВМ RICH.

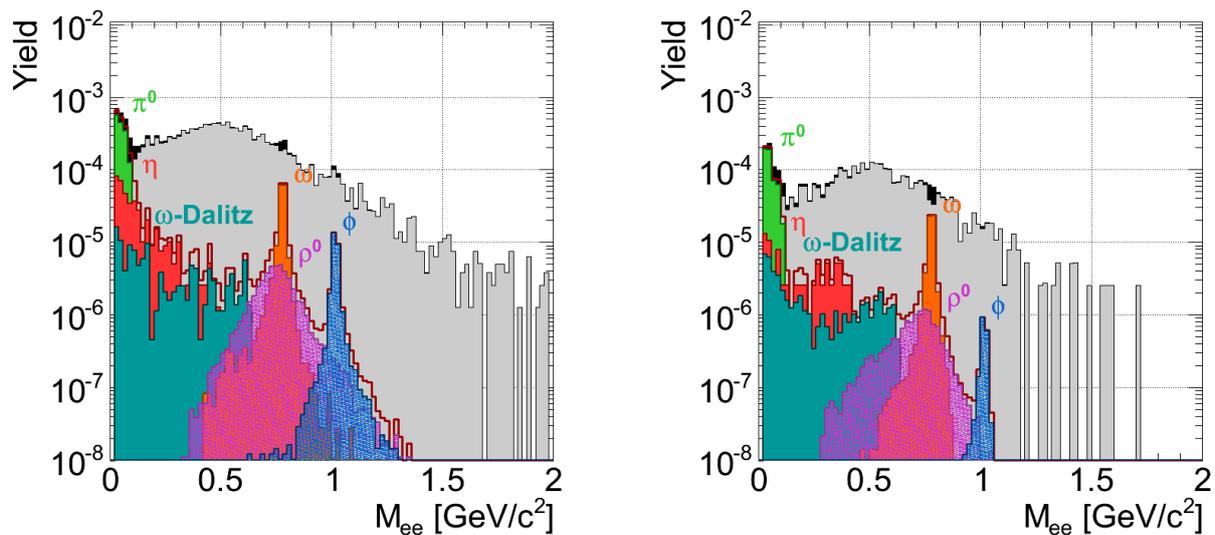


Рис. 1.20: Смоделированные спектры инвариантных масс диэлектронов после применения всех критериев отбора для энергии 8 ГэВ/нуклон (SIS100, 100000 событий, слева) и 25 ГэВ/нуклон (SIS300, 200000 событий, справа) [15]. Серым цветом показан фон.

Таблица 1.3: Отношение сигнал-фон (S/B), вклад e^+e^- -пар из распада Далица и конверсии гамма-квантов в полный комбинаторный фон в процентах и вклад ложно идентифицированных π^\pm в процентах от полного числа электронов после применения всех критериев отбора [15]. Для достижения чувствительности к лёгким векторным мезонам необходимо чтобы физические источники сигнала доминировали над фоном, что требует фактор подавления π -мезонов более 5000.

Фактор подавления π	100	500	1000	2500	5000	10000	идеальн.
8 ГэВ/нуклон							
$\omega: S/B$	0.012	0.14	0.27	0.47	0.67	0.83	0.89
$\phi: S/B$	0.001	0.015	0.03	0.05	0.07	0.12	0.14
Физич. фон, %	1.8	18.4	34.7	55.6	69.8	79.5	86.9
Ложн. идентиф. π^\pm , %	83.5	53.4	36.4	19.3	10.6	5.7	0.0
25 ГэВ/нуклон							
$\omega: S/B$	0.005	0.05	0.10	0.19	0.24	0.26	0.30
$\phi: S/B$	0.002	0.02	0.04	0.07	0.10	0.12	0.14
Физич. фон, %	1.8	18.7	35.9	57.1	69.1	76.9	86.0
Ложн. идентиф. π^\pm , %	83.9	52.7	36.0	18.5	10.4	5.2	0.0

1.3 Некоторые задачи, связанные с разработкой детектора RICH эксперимента CBM

Важным аспектом разработки CBM RICH является тщательная оптимизация всех основных систем, выполняемая с применением как разнообразного моделирования, так и с исследованиями прототипов. Под моделированием подразумевается как моделирование методом КЭ механических свойств и магнитных полей, так и моделирование методом Монте-Карло прохождения частиц, необходимое для исследования физических характеристик прибора и его влияния на другие детекторы.

Для многократного и детального обмена геометрической информацией между САПР CATIA v5 и пакетами МК-моделирования было решено разработать инструментарий “CATIA-GDML geometry builder”. Данной разработке посвящена **глава 2**. САПР CATIA v5 была выбрана по той причине, что именно она является основной в таких научных центрах как CERN и GSI. Во многих других центрах, например ОИЯИ, данная САПР является одной из официально поддерживаемых.

Технические решения, касающиеся механических конструкций, магнитных экранов, ионопровода, систем фокусировки и регистрации черенковских фотонов должны быть выверены с точки зрения обеспечения требуемых физических характеристик прибора, технологичности, стабильности работы, влияния на детекторы, стоящие ниже по пучку. Применение упомянутого выше инструментария для оптимизации конструкции и компоновки указанных систем CBM RICH, так же как и некоторые другие случаи применения разработанной методики, рассмотрены в **главе 3**.

Для достижения наилучших физических характеристик CBM RICH, необходимо собрать и исследовать прототип системы считывания и сбора данных как в пучковых тестах в составе полнофункционального прототипа детектора черенковских колец, так и в лабораторных условиях. Описание созданных установок и разработанного ПО содержится в **главе 4**.

В **главе 5** анализируются результаты упомянутых тестов и исследуются 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 2

“CATIA-GDML geometry builder”

2.1 Представление геометрической информации в различных видах ПО

Сведения, содержащиеся в данном разделе, необходимы для понимания принципов работы “CATIA-GDML geometry builder”. Выбор САПР CATIA для разработки пакета обсуждался в конце вводной части раздела 1.1.2. При рассмотрении представления геометрии в САПР мы, естественным образом, будем приводить примеры из CATIA, имея в виду, что в других САПР картина в большой степени аналогична.

2.1.1 Дерево построений

Наиболее полная информация о 3D-модели содержится в так называемом дереве построений, в котором хранятся исходные каркасные элементы (точки, кривые, эскизы) и все дальнейшие формообразования. При построении тел используются пять видов основных формообразований: выдавливание (экструзия), заметание, вращение, построение по сечениям и заполнение замкнутых оболочек, полученных с помощью мощных инструментов поверхностного моделирования. Каждое из перечисленных формообразований может быть реализовано с добавлением или с вычитанием материала. Многие другие формообразования, такие как фаски и скругления, разрезы, отверстия, на самом деле являются лишь вариациями перечисленных. Все идентификаторы и числа, определяющие форму и структуру модели, хранятся в таблице параметров и могут подвергаться изменению на любом этапе. Если в процессе построения модели принцип параметризованного моделирования нарушается, САПР предупреждает пользователя перед выполнением операции, которая приведёт к разрыву связи с параметром. При изменении каких-либо параметров геометрическая модель перестраивается интерактивно — от долей секунды до нескольких секунд в зависимости от сложности модели.

Информация об истории построения может быть изъята по решению пользователя или как следствие ограничений, возникающих при обмене информацией. В этом случае в дереве построений остаётся непараметризованное твердое тело, к которому можно применять в дальнейшем различные формообразования.

Во многих САПР существуют стандартные объекты в дереве построений, обозначающие детали и сборки. В САПР CATIA v5 существует отдельный тип документа CATPart для детали и отдельный тип документа CATProduct для сборки. Внутри документа типа CATPart есть минимальный набор обязательных элементов — 3 стандартные взаимно перпендикулярные плоскости в начале системы координат детали и главное тело детали, по умолчанию называемое PartBody. В документе типа CATProduct присутствует возможность добавлять в качестве дочерних компонентов либо документы CATPart либо другие документы CATProduct.

2.1.2 Граничное представление BREP

Граничное представление (Boundary representation, BREP) — наиболее распространённый способ точного описания геометрии в ЭВМ, используемый геометрическими ядрами всех современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Корректными сущностями BREP являются как тела, так и отдельные каркасные элементы. САПР генерирует описание геометрии в BREP на основании дерева построений.

В BREP есть два типа понятий — геометрические («точка», «кривая», «поверхность», этот список естественно продолжить понятием «пространство») и топологические («вершина», «ребро», «грань», «оболочка»). «Точка» — это тройка координат в некоторой системе координат в трехмерном пространстве. «Кривая» — это уравнение, задающее множество точек, принадлежащих данной кривой. Кривую удобно описать с помощью параметрического уравнения от одной переменной. «Поверхность» — это уравнение, задающее множество точек, принадлежащих данной поверхности. Соответственно, поверхность удобно описать с помощью параметрического уравнения от двух переменных. Топологические сущности задаются на базе геометрических. «Вершина» лежит в некоторой геометрической точке. «Ребро» лежит на некоторой геометрической кривой и ограничено двумя вершинами. Очевидно, что эти вершины должны принадлежать кривой, то есть и соответствующие геометрические точки должны принадлежать кривой. «Грань» лежит на некоторой поверхности и ограничена замкнутым циклом из рёбер. Также очевидно, что эти рёбра должны принадлежать поверхности, как и кривые, на которых они лежат, как и вершины и точки, ограничивающие эти рёбра. Замкнутая несамопересекающаяся «оболочка» из граней с указанием внешних сторон этих граней ограничивает некоторую область пространства, называемую «телом».

В памяти ЭВМ или обменном файле создаётся древовидная структура. Терминальными вершинами этого дерева чаще всего являются геометрические точки, представляющие собой тройки чисел с плавающей запятой. Далее вверх по дереву, имеются узлы типа вершина со ссылками на геометрические точки. Ребро также представляется в виде узла дерева, от которого идёт ссылка на геометрическую сущность, описывающую уравнение кривой, на которой это ребро построено, и ссылки на вершины, ограничивающие это ребро.

В соответствии с BREP параллелепипед, например, задаётся следующим образом (см. рис. 2.1). Имеется 8 вершин, каждое из 12 рёбер лежит на некоторой прямой и ограничено двумя вершинами. Описание вершин не дублируется, на одну и ту же сущность может быть множество ссылок. Каждая из 6 граней ограничена прямоугольником — циклом из четырёх рёбер на заданной плоскости, поэтому от каждой сущности типа грань идёт 4 ссылки на рёбра. Тело представляется как замкнутая оболочка из поверхностей, поэтому от сущности типа solid идут ссылки на 6 граней. Помимо представленной на рисунках структуры, имеется дополнительная информация, без которой корректное и однозначное описание было бы невозможным, например, направления рёбер, направления обхода в цикле из рёбер, направления нормалей граней, уравнения кривых и поверхностей и т.д.

Более подробные сведения о геометрическом моделировании в САПР можно почерпнуть в монографии [48].

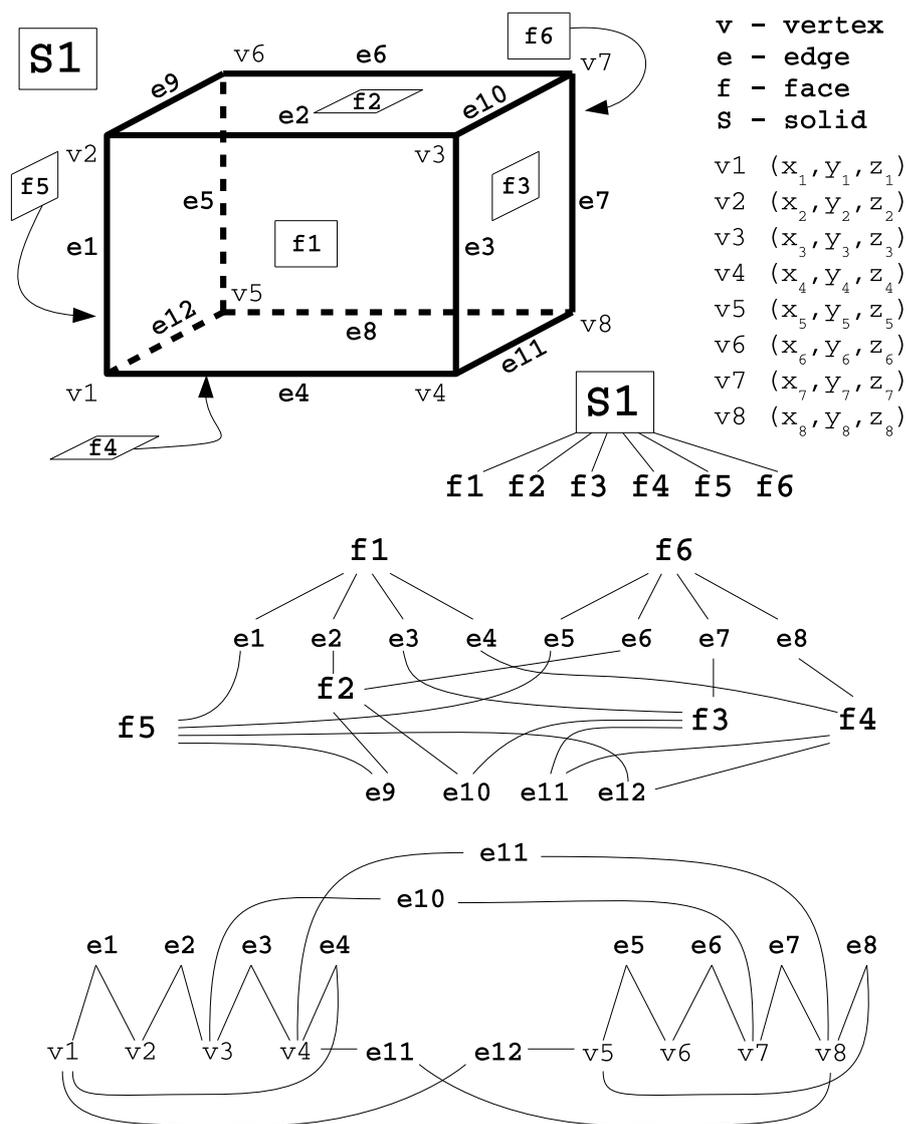


Рис. 2.1: Описание вершин, рёбер, граней и тела параллелепипеда методами BREP.

2.1.3 Конструктивная твердотельная геометрия CSG

Конструктивная твердотельная геометрия (Constructive Solid Geometry, CSG) — один из способов описания геометрии в ЭВМ, в котором твёрдое тело (“solid”) представляет собой примитив либо результат булевой операции над другими твёрдыми телами.

Изначально CSG использовался как основной способ представления геометрии в САПР, но по мере развития последних от CSG перешли к BREP. При этом во многих САПР осталась возможность создавать CSG-геометрию. CSG до сих пор активно применяется в некоторых приложениях, см., например, [49] и раздел 2.3.

В качестве строительных блоков в CSG используются примитивы из списка реализованных в системе. Список примитивов может включать в себя как относительно простые примитивы, типа тетраэдра, параллелепипеда, сегмента цилиндра, сегмента конуса, так и достаточно сложные, типа эллипсоида, параболоида, скрученных примитивов. Форма твёрдого тела может быть описана либо как примитив, либо как результат булевой операции над примитивами или над результатом других булевых операций. Определены три булевы операции (приведены соответствующие названия в CATIA v5), см. также рис. 2.2:

- Объединение (Add);
- Вычитание (Remove);
- Пересечение (Intersect).

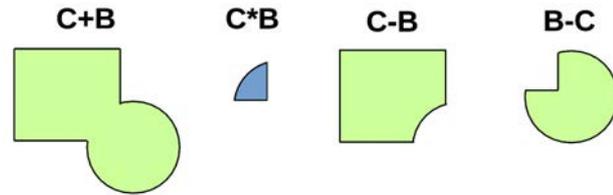


Рис. 2.2: Булевы операции.

Булевы операции не изменяют уравнений поверхностей границ примитивов, а лишь могут сгенерировать новые рёбра на пересечениях граней примитивов. За счёт этого булевы операции позволяют задать практически любую геометрическую форму, имеющую границы из тех, что применяются в примитивах.

2.1.4 Полигональное геометрическое представление

Строительным элементом полигональных (тесселированных, фасеточных) моделей является плоский многоугольник. Несколько таких многоугольников может стыковаться по рёбрам или вершинам, образуя поверхность, возможно описывающую границы некоторого объекта.

В отличие от моделей твёрдых тел, где обязательно должны быть определены границы, отделяющие материал этого тела от окружающего пространства, объект полигональной модели не обязан быть замкнутым. Между многоугольниками могут быть зазоры, поскольку полигональные модели изначально рассчитаны только на быструю визуализацию. Наибольшее применение нашли такие полигональные модели, у которых в качестве полигонов выступают треугольники. Соответствующее представление называется триангулированным. Такие модели могут очень быстро обрабатываться 3D-конвейером графического адаптера ЭВМ. Триангулированная геометрия применяется не только для визуализации, но и в 3D-сканировании, прототипировании и литографии.

2.1.5 Конечно-элементное (КЭ) геометрическое представление

В инженерной практике широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, динамики жидкостей и газов, теплообмена, электродинамики и т.д. МКЭ, как и некоторые другие численные методы, использует геометрическую модель в качестве входных данных.

МКЭ получил своё название от способа разбиения расчётной области на элементарные блоки — конечные элементы (КЭ). Строго говоря, КЭ — это не только геометрическая форма, но и модель аппроксимации решения внутри области, ограниченной этой формой. Существует огромное множество типов КЭ, причём существуют элементы имеющие одинаковую геометрию, но разные математические модели. Расчётная область может быть разбита на элементы различных типов и размеров. Исходя из условий решаемой задачи инженер-расчётчик выбирает, какими элементами разбивать расчётную область. В простом случае расчётной областью является пространство заполненное материалом, т.е. сама деталь, а конечным элементом — тетраэдр. Модель, в которой деталь представлена множеством КЭ, соответственно называют КЭ-моделью.

2.2 Соотношение различных представлений

На рис. 2.3 показана одна и та же геометрическая форма в различных геометрических представлениях. На панели (a) показаны отдельные примитивы до выполнения булевой операции. Можно видеть кривые пересечения примитивов, однако точный расчет уравнений кривых на пересечении поверхностей не был выполнен. На панели (b) показано твёрдое тело после выполнения булевой операции. Здесь рёбра на пересечениях уже явно рассчитаны. На панели (c) показана модель, триангулированная системой моделирования для визуализации, в таком режиме, когда показываются только рёбра треугольников. Отметим, что именно в такой форме, но с закрасненными треугольниками, все модели, независимо от внутреннего описания — BREP, CSG или какое-либо другое — визуализируются на дисплее ЭВМ. За счёт того, что угол между рёбрами треугольников, аппроксимирующими гладкое ребро исходного тела, очень мал, визуально создаётся ощущение плавных кривых. На панели (d) показана КЭ-модель, полученная разбиением исходной BREP модели на тетраэдральные конечные элементы с помощью пакета Netgen [50]. Видны только треугольники на поверхности, но на самом деле на тетраэдры разбито всё твёрдое тело. Стоит отметить отличие триангуляции поверхностей для КЭ-модели и модели для визуализации. Это объясняется разными критериями алгоритма триангуляции в силу разных целей моделей.

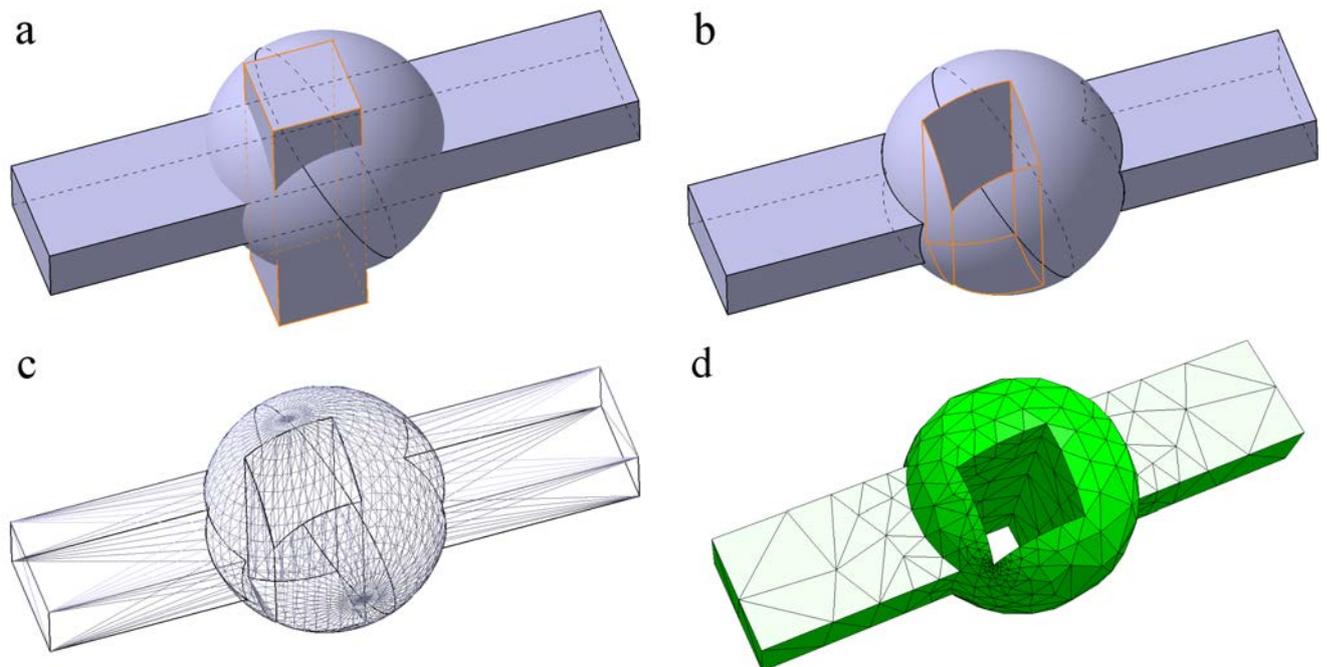


Рис. 2.3: Одна и та же геометрическая форма, описанная различными представлениями: (a) отдельные примитивы до выполнения булевой операции; (b) BREP после выполнения булевой операции; (c) геометрия, триангулированная для визуализации; (d) КЭ-модель.

2.2.1 Обмен геометрической информацией

Следует различать геометрическое представление и формат, в котором данные записаны в файл. В большинстве случаев, однако, формат подразумевает один способ представления геометрии. Данные могут быть записаны в файл как в виде текста, так и в бинарном виде. Проприетарные форматы в большинстве своём не имеют открытой спецификации, поэтому файлы этого формата бинарные, создаются и читаются ограниченным списком программ, в который, в первую очередь, входят продукты от фирм, являющихся авторами этих форматов. Также иногда эти фирмы дают возможность купить лицензию на модуль импорта/экс-

порта того или иного формата для реализации его поддержки в стороннем ПО.

Из множества популярных форматов для хранения и передачи геометрической информации, не подразумевающей перевод между различными представлениями, рассмотрим несколько наиболее употребимых в нашей области.

STEP (STandard for Exchange of Product model data) — независимый стандарт ISO-10303, получивший наибольшее распространение в инженерной практике для обмена информацией об изделии, в том числе геометрическими моделями. Особенностью данного стандарта является наличие большого количества инструментов для описания BREP-геометрии. В то же время, следует отметить, что несмотря на то что практически все современные САПР используют идентичные подходы к моделированию и имеют поддержку данного формата, STEP-файлы не хранят дерево построения модели. Обменные файлы STEP являются текстовыми. С одной стороны, это значительно упрощает разработку модулей для их импорта и экспорта, но с другой стороны, это приводит к тому, что для крупных моделей размер STEP-файлов становится достаточно большим, а следовательно и растёт время их обработки.

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) — независимый стандартизированный формат для обмена информацией между САПР, в том числе геометрическими моделями. В настоящее время многие САПР имеют поддержку IGES, однако данный формат можно рассматривать как устаревший, практически вытесненный стандартом STEP.

STL (STereoLithography) — текстовый формат для обмена тесселированной геометрией, который, возможно, является самым распространённым на данный момент форматом для передачи моделей в сфере 3d-сканирования и 3d-печати.

OBJ — очень простой и открытый текстовый формат для обмена полигональными моделями. В файл OBJ записаны координаты вершин, списки индексов вершин каждого полигона и некоторые вспомогательные данные, типа текстурных координат и др.

CGR (Catia Graphical Representation) — проприетарный формат Dassault Systemes, используемый для хранения триангулированной модели, готовой для быстрой визуализации на дисплее. Позволяет одновременно, в одном файле, хранить несколько моделей, что широко применяется для хранения нескольких уровней детализации.

2.2.2 Возможности автоматического перевода между представлениями

Геометрическое моделирование может выполняться различными программными средствами, но практически всегда в результате получается модель, представленная с помощью BREP или, реже, CSG. Для выполнения расчётов и визуализации необходимы соответственно конечно-элементные и полигональные модели, которые могут быть получены автоматически из BREP или CSG. Также присутствует возможность автоматического преобразования CSG в BREP. Возможные направления автоматического перевода геометрических моделей показаны на рис. 2.4. Единственное направление перевода, имеющее практическую ценность, и не имеющее возможности автоматизации — BREP → CSG. “CATIA-GDML geometry builder” нацелен, в первую очередь, на упрощение передачи геометрии в этом направлении.

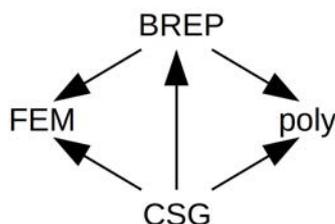


Рис. 2.4: Возможные направления автоматического перевода геометрических моделей.

Конвертация CSG в BREP

Поверхности, используемые в качестве границ примитивов CSG, — это чаще всего поверхности, описываемые относительно простыми уравнениями первого и второго порядка. Очевидно, что перевод отдельных примитивов в BREP-описание не представляет сложности независимо от вида уравнений, описывающих их границы — для этого не требуется никаких дополнительных вычислений. Чуть более сложная задача, но всё же полностью решённая, — автоматический перевод формы, полученной в результате булевой операции, в BREP-описание. В случае булевой операции в CSG нет явного описания рёбер и вершин, полученных в результате пересечения отдельных граней примитивов, однако эти рёбра и вершины напрямую получаются из параметров операндов и их позиционирования. Таким образом, возможна быстрая и полностью автоматическая конвертация CSG-модели в BREP, и она реализована, возможно в неявном виде, во всех САПР.

Конвертация BREP в полигональное представление

Суть получения полигональной геометрии из BREP-описания заключается в аппроксимации всех граней набором плоских фасеток. Очевидно, что если исходная грань не плоская, то аппроксимирующая полигональная сетка будет иметь от неё некоторое отклонение. Давно разработаны и хорошо отлажены алгоритмы для такой аппроксимации. Многие из них основаны на триангуляции Делоне, разработанной в начале 20 века. Точность аппроксимации — управляющий параметр процедуры. Для более точной аппроксимации требуется больше полигонов, а следовательно возрастает нагрузка на графический адаптер. Из того что возможен автоматический перевод из CSG в BREP вытекает, что возможен также и перевод из CSG в полигональную. Таким образом, возможна конвертация любой BREP-модели в полигональную с заданной точностью, и она реализована, возможно в неявном виде, во всех САПР.

Конвертация BREP в FEM

Существуют алгоритмы, позволяющие эффективно получить разбиение исходной геометрической модели, например представленной с помощью BREP и построенной в САПР, на конечные элементы.

Первый этап процедуры разбиения твёрдого тела на конечные элементы заключается в получении полигональной сетки на его поверхности и выполняется теми же алгоритмами, что и для получения полигональных моделей из BREP, но с другими настройками. Затем на основе разбиения граней строится пространственная сетка. Процедура разбиения тела на КЭ сложна и для сложной детали выполняется в несколько итераций. Расчетчик контролирует соблюдение желательного уровня детализации и отсутствие вырожденных по форме элементов.

Конвертация BREP в CSG

Если тело имеет форму примитива CSG, описанного средствами BREP, то представляется возможным реализовать алгоритм, распознающий этот факт и определяющий параметры примитива. Задача усложнена тем, что в BREP одна фигура может быть описана большим количеством способов. Например, плоская прямоугольная грань может быть описана уравнением плоскости и замкнутым циклом из 4-х взаимно перпендикулярных рёбер (прямоугольник) на этой плоскости, а может быть разбита на два треугольника на той же плоскости, смежных по гипотенузе. Эти два описания обозначают геометрически эквивалентные формы, но во втором случае потребуется дополнительная процедура приведения двух треугольников к одному прямоугольнику — т.е. минимальному полному описанию. Перевод тел,

являющихся булевыми комбинациями множества примитивов, из BREP является сложной задачей, решенной лишь в частных случаях.

Основной фактор, делающий невозможным полный перевод BREP-модели в CSG, заключается в том, что CSG имеет ограниченный список уравнений поверхностей, чаще всего не выше второго порядка, в то время как BREP позволяет задавать грани на основе поверхностей, описанных сложными уравнениями, например NURBS.

Конвертация полигональной геометрии в BREP

Если полигонами описана замкнутая оболочка, то представляется возможным объявить эту оболочку границей твёрдого тела, таким образом переведя без потерь полигональное описание в BREP, чтобы в дальнейшем работать средствами твердотельного моделирования. Если до цельности оболочки нехватает некоторого количества полигонов, то система обычно позволяет автоматически заполнить дыры плоскими фасетками, чтобы дальше можно было получить твёрдое тело. Данная задача возникает, например, при обработке результатов 3d-сканирования. Если полигональная модель получена путём тесселяции BREP-модели, содержащей неплоские грани, то при конвертации в обратном направлении получившееся твёрдое тело совпадает с исходным с некоторой точностью, определяемой параметрами тесселяции.

2.3 Представление геометрии в GEANT/ROOT

Для описания геометрических форм в пакетах GEANT/ROOT применяется CSG (см. раздел 2.1.3). Примитив — это объект, имеющий геометрическое представление, для которого реализовано решение геометрических задач, возникающих при моделировании прохождения частиц через вещество. Среди таких задач можно отметить нахождение расстояния до ближайшей границы примитива от некоторой точки внутри объёма в одном заданном направлении или в любом возможном направлении. Эту задачу необходимо решать многократно в процессе проведения частицы для того чтобы определить так называемый максимальный допустимый геометрический шаг. Процедура проведения частиц подробно рассмотрена в документации GEANT4 [51]. Каждый примитив, как в GEANT, так и в ROOT, реализован как отдельный C++ класс, имеющий свои геометрические параметры среди членов данных, и решение описанных выше геометрических задач среди методов. Следует отметить, что есть только параметры примитива, но нет никакого описания типа BREP. Уравнения границ фигурируют лишь в неявном виде в коде методов для решения геометрических задач. Более подробно примитивы описаны в [51, 52].

Форма объёма в GEANT может быть описана как с помощью примитивов, так и с помощью тесселей. При этом, однако, скорость моделирования прохождения частиц через тесселированные объёмы заметно ниже, что делает невозможным полную замену ими примитивов. Тесселированная форма также может выступать в роли операнда булевой операции.

Задание формы с помощью булевых операций в GEANT/ROOT имеет важную особенность — система координат первого операнда должна совпадать с системой координат объёма. Это значит, что преобразования координат — повороты и сдвиг — могут быть применены только ко второму операнду.

Список реализованных в GEANT4 и ROOT примитивов совпадает практически полностью. В настоящее время в рамках проекта AIDA [53] в CERN ведётся разработка пакета Unified Solids [54], ставящего своей задачей получить единое описание геометрии в пакетах GEANT и ROOT.

Вторая составляющая геометрического представления в GEANT/ROOT — это иерархия объёмов. Введём понятия логического и физического объёмов, формы и материала. Логический объём (logical volume), или просто объём (volume), — это базовый элемент для по-

строения иерархии объёмов. Объём описывает непозиционированный объект и всё, что находится внутри него. Объём характеризуется формой (shape) и материалом (material). Форма — это границы пространства, заданные с помощью CSG по методу, описанному выше. Материал включает в себя описание химического состава, плотности, и т.д. При помещении одного логического объёма в другой, например объёма A в объём B , образуется так называемый физический объём (physical volume) в терминологии GEANT, или узел (node) в терминологии ROOT, с именем B_1 . Узел обозначает взаимоотношение между A и B как материнский-дочерний и характеризуется некоторой матрицей M_{B_1A} позиционирования B_1 внутри A . На рис. 2.5 приведена диаграмма объектов классов TGeo*, описывающая некоторую геометрию в памяти системы ROOT. Позиционирование дочерних объёмов осуществляется в системе координат (СК) материнского объёма, которая совпадает с СК его формы. Если форма задана примитивом, то СК формы совпадает с СК этого примитива. Если форма задана как результат булевой операции, то СК формы совпадает с СК первого операнда. Запрещены пересечения дочерних объёмов между собой внутри одного материнского и запрещён выход какой-либо части дочернего объёма за пределы материнского. Полное описание логического объёма также включает в себя список дочерних объёмов и соответствующих матриц позиционирования, информацию о наличии магнитного поля в объёме и о его чувствительности при прохождении частиц. Отметим, что той части материнского объёма, которая занята дочерним, приписывается материал дочернего объёма, т.е. происходит своего рода “вытеснение”.

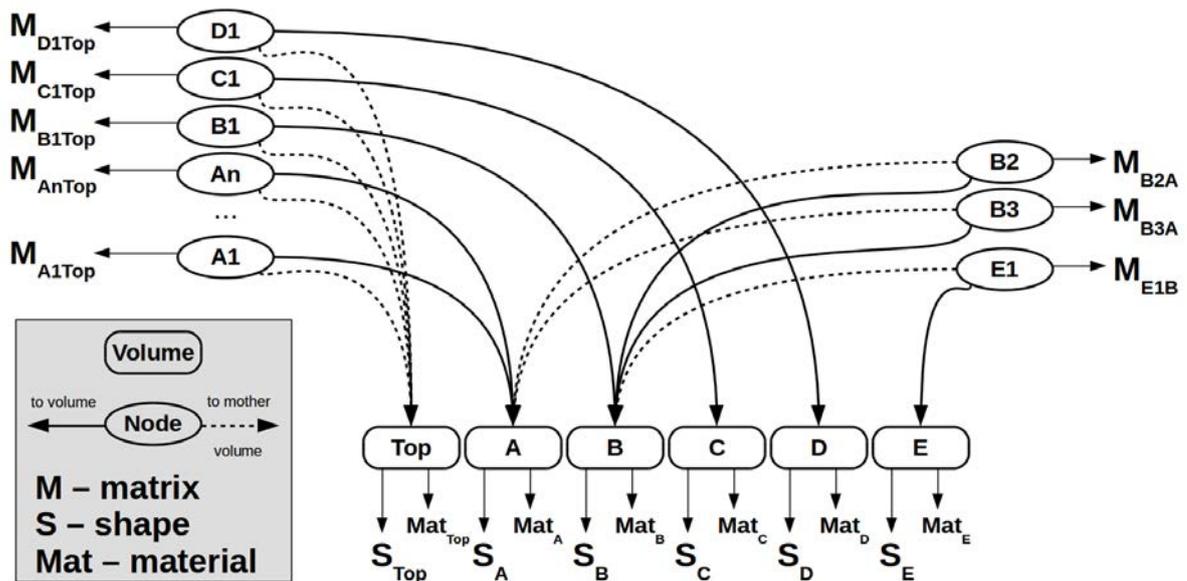


Рис. 2.5: Пример представления геометрии с помощью объектов классов TGeo* в памяти ЭВМ. Приведены только основные сущности — логические и физические объёмы (узлы), формы объёмов, материалы и матрицы позиционирования дочерних объёмов. Стрелки обозначают указатели C++.

В GEANT/ROOT существует тип объёмов, называемый Assembly, который характеризуется тем, что он не имеет формы и материала. Практически объём типа Assembly является контейнером без границ, который объединяет свои дочерние объёмы, что особенно удобно как минимум в двух случаях. Во-первых, если необходимо многократно позиционировать группу объёмов, которую невозможно охватить простой формой. Во-вторых, если преобразование координат при позиционировании одного или группы объёмов имеет сложную структуру и удобно представить его как суперпозицию двух преобразований.

Одна из продвинутых возможностей геометрической подсистемы GEANT/ROOT — это

деление объёмов. В GEANT эта возможность называется *replica*, а в ROOT — *division*. Суть заключается в том, что допускается деление некоторого объёма путём разрезания через равные промежутки вдоль одной из четырёх осей — X , Y , Z и ϕ , где ϕ — круговое направление. В результате деления получается набор одинаковых под-объёмов — долек, которые можно рассматривать как независимые вхождения одного объёма и позиционировать внутри другие объёмы. Отличие дольки от обычного объёма заключается в том, что для долек оптимизирован алгоритм проведения частиц. Деление возможно только для ограниченного числа форм, таких, что все доли имеют одинаковую форму. Например, примитив *box* можно делить в любом из трёх линейных направлений X , Y или Z , *tubs* — вдоль оси цилиндра, то есть вдоль линейной оси Z , или вдоль круговой оси ϕ .

2.3.1 Geometry Description Markup Language (GDML)

Существует несколько способов задать геометрию для пакетов Монте-Карло моделирования — с помощью текста в файлах типа *.geo* [55], в виде макроса на языке “С”, интерпретируемого, например, системой ROOT и формирующего выходной файл. Также возможно использование какого-либо специализированного программного инструмента. Некоторые из них описаны в разделе 2.5. Довольно удобно описывать и хранить GEANT/ROOT-геометрию с помощью специально разработанного XML-подобного формата GDML [56]. Рассмотрим этот формат подробнее, поскольку именно он используется в инструментарии, которому посвящена данная глава.

Файл формата GDML имеет следующую структуру. Тэг верхнего уровня `<gdml>` содержит 5 разделов: `<define>`, `<materials>`, `<solids>`, `<structure>`, `<setup>`.

В секции `<define>` объявлены объекты, которые могут многократно использоваться в других секциях: *constant*, *quantity*, *variable*, *position*, *rotation*, *scale*, *matrix*. Все объекты должны иметь уникальные имена, определённые в значении атрибута *name*.

Секция `<materials>` предназначена для определения материалов, которые будут использоваться в модели. При описании логического объёма в секции `<structure>` должна быть ссылка на соответствующий тэг `<material>` из секции `<materials>`.

В секции `<solids>` приведено описание форм логических объёмов, как с помощью CSG, так и в виде набора тесселей. Как и в случае с материалами, в секции `<structure>` при описании логического объёма должна быть приведена ссылка на соответствующий тэг из секции `<solids>`.

Секция `<structure>` — обычно самая большая секция, в которой описываются логические объёмы и их иерархия. Тэг `<volume>` имеет как минимум два дочерних тэга — ссылка на материал `<materialref>` с атрибутом *ref*, имеющим в качестве значения имя материала, определённого в секции `<materials>`, и ссылка на форму объёма `<solidref>` с атрибутом *ref*, имеющим в качестве значения имя формы, определённой в секции `<solids>`. Помимо этих двух обязательных дочерних тэгов могут присутствовать другие тэги, описывающие внутренний состав логического объёма. Самый распространённый случай — тэг `<physvol>`, обозначающий дочерний объём и имеющий атрибут *ref*, указывающий на определённое ранее описание другого объёма.

Последняя секция `<setup>` служит для объявления одного логического объёма в качестве объёма верхнего уровня. Также здесь задаётся название всей геометрической установки.

2.4 Сравнение представления геометрии в GEANT/ROOT и САПР

Разница между двумя способами описания геометрической информации в САПР и пакетах моделирования прохождения частиц через вещество GEANT/ROOT заключается в двух пунктах.

Во-первых, отличается способ задания геометрических форм. В САПР применяется граничное представление (BREP), пригодное для задания практически любых форм. В GEANT/ROOT применяется конструктивная твердотельная геометрия (CSG), которая оперирует понятиями «примитив» и «булева операция», т.е. набор возможных уравнений поверхностей ограничен конечным набором примитивов.

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. На нижнем уровне находятся материальные детали, не допускающие деления. Эти детали могут быть скомпонованы в узлы, под сборки, сборки, агрегаты и пр. Количество иерархических уровней может по мере надобности расти в сторону укрупнения, не будучи ограничено ничем, кроме здравого смысла. В GEANT/ROOT для описания взаимоотношения форм используется иерархия объёмов. Это объясняется тем, что такой метод более удобен для описания геометрии, где главной задачей является однозначное и быстродоступное задание материала в каждой точке пространства. Вводится понятие объёма — сущности, имеющей форму и материал. Из всех объёмов выбирается один, называемый объёмом верхнего уровня. Этот объём отличается от всех остальных тем, что не имеет позиционирования. Глобальная система координат принадлежит этому объёму. Все остальные объёмы помещены друг в друга, формируя таким образом дерево объёмов. По мере уточнения подробностей иерархия может прорасти вниз.

Указанные выше два кардинальных различия делают в общем случае невозможной прямую конвертацию геометрии САПР в геометрию GEANT/ROOT. Частные случаи, когда автоматическая конвертация возможна, рассмотрены в разделах 2.5.1 и 2.6.3. Важным аргументом против прямой конвертации в том или ином направлении является то, что она имеет малую практическую пользу. Одна и та же геометрическая модель с точки зрения разных задач может быть одновременно оптимальна и, наоборот, избыточна или недостаточна. Это просто понять на следующем примере. С точки зрения инженерного проекта массив болтов, вкрученных в корпус, представляет собой важную информацию. С точки зрения моделирования прохождения частиц через материал корпус с болтами представляет собой сплошное металлическое тело. В зависимости от расположения в общей установке подробности могут оказаться как критическими, так и наоборот излишними и вызывающими значительное увеличение времени выполнения моделирования. Например, форма ионопровода, который расположен в непосредственной близости к пучку, где присутствуют высокие потоки частиц, может оказать влияние на характеристики всей установки, в то время как форма корпуса детектора, имеющего размеры порядка нескольких метров и находящегося в отдалении от больших потоков частиц, может быть построена сильно упрощённой без потери реалистичности моделирования.

Принимая во внимание развитие вычислительной техники, в особенности резкое повышение производительности графических карт, их доступность широким массам, и вообще увеличение их значимости в вычислениях общего назначения, в перспективе представляется возможным разработка как новых алгоритмов проведения частиц через материал, учитывающих особенности геометрического представления в САПР, так и автоматизированного построения приближённой модели GEANT/ROOT на основе инженерной модели. Однако, на данный момент такие перспективы представляются туманными.

Таким образом, с целью упрощения взаимодействия физиков и инженеров было принято

решение не пытаться разработать конвертеры или какие-либо новые универсальные способы представления геометрии, а сосредоточиться на облегчении существующей процедуры за счёт плавной корректировки привычных методов и предоставления новых инструментов как физикам, так и инженерам. “CATIA-GDML geometry builder” — это как раз набор таких инструментов. Он описан в разделе 2.6.

2.5 Инструменты передачи геометрии

Частичное решение задачи обмена геометрией между САПР и пакетами МК-моделирования предлагается несколькими существующими программными продуктами, описанными ниже.

2.5.1 FASTRAD

FASTRAD — это программный продукт фирмы TRAD для выполнения анализа радиационных доз [57]. FASTRAD включает в себя подсистемы геометрического моделирования, расчёта, постпроцессинга и визуализации. В FASTRAD имеется как собственная реализация метода Монте-Карло для моделирования прохождения частиц через вещество, так и возможность экспортировать постановку задачи для расчёта с помощью GEANT4. Имеется возможность интеграции с САПР с помощью форматов STEP и IGES. При этом, однако, импортированное из САПР BREP-описание геометрии триангулируется и дальнейшее моделирование выполняется с фасеточной геометрией.

2.5.2 CADtoROOT interface

Данный интерфейс [58] разрабатывается в CERN, является частью ROOT и основан на Open CASCADE Technology [59] — открытой платформе для разработки 3d-приложений. Он позволяет выполнить анализ CSG-описания установки в менеджере геометрии ROOT и экспортировать его BREP-описание в STEP-файл.

2.5.3 CAD converter

Программный продукт “CAD converter” [60] разрабатывается в коллаборации PANDA. “CAD converter” импортирует входной файл формата STEP или IGES средствами OpenCASCADE, выполняет анализ BREP-форм и пытается распознать в них примитивы. После этого для найденных примитивов определяются параметры и матрица позиционирования, выполняется их экспорт в ROOT-файл, а нераспознанные формы экспортируются в другой STEP-файл.

Видно, что все рассмотренные инструменты имеют существенные ограничения по кругу решаемых задач, что делает актуальной разработку нашего инструментария, описанного в разделе 2.6.

2.6 Инструментарий “CATIA-GDML geometry builder”

Материалы данного раздела основываются на работах [61] и [62].

Концептуально “CATIA-GDML geometry builder” (далее просто “Builder”, [63]) базируется на трёх 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.

В состав пакета “Builder” входят файлы шаблонов, макропрограммы, файлы настроек окружения и инструкции по применению необходимого набора стандартных средств CATIA. “Builder” ставит своей задачей упростить и ускорить процесс создания CSG моделей с иерархией объёмов, напрямую совместимых с GEANT/ROOT.

Построение модели по правилам “Builder” делает возможной конвертацию МК-модели из CATIA v5 во внешний файл с целью дальнейшего импорта в GEANT/ROOT. В качестве формата для обмена был выбран GDML, см. раздел 2.3.1, для которого в GEANT и ROOT реализованы методы импорта и экспорта.

Во многих САПР, в том числе и CATIA v5, присутствует возможность так называемого контекстного редактирования компонентов. Это означает, что пользователь во время работы над сборкой в документе типа CATProduct, имеющей в качестве дочерних компонентов детали в файлах типа CATPart, может также редактировать эти детали, не переключая активный документ. Эта возможность широко используется в “CATIA-GDML geometry builder” — большая часть работы выполняется в контексте единственного продукта, что с точки зрения пользователя аналогично работе над всей экспериментальной установкой. Более того, в главный продукт “Builder” можно вставить в качестве компонента инженерную модель, чтобы проводить анализ и обмер исходной геометрии в той же самой среде, где ведётся построение МК-модели, см. раздел 3.1.2.

Вся МК-геометрия установки создаётся в одном документе типа CATProduct. Объёму соответствует деталь, хранящаяся в файле типа CATPart. Форме соответствует главное тело детали, по умолчанию называемое PartBody. В CATIA не записывается описание материала так, как это принято в GEANT/ROOT, а сохраняется только имя материала в пользовательском строковом параметре Material. Это возможно по той причине, что существует практика хранить описание материалов во внешнем файле или базе данных, считывать его перед выполнением моделирования и приписывать объёмам в соответствии с именами. Для обозначения физического объёма B внутри A в структуре документа, описывающего объём A , создаются тела с именами Body.B.*, где * по умолчанию обозначает номер вхождения. Операции translate и rotate задают позиционирование дочернего объёма. Подробнее см. раздел 2.6.8.

2.6.1 Примитивы в “Builder”

Любой примитив можно построить стандартными средствами САПР, используя эскизы и формообразования, но в таком случае конвертер не сможет автоматически определить, является ли построенная форма примитивом и, если да, определить параметры примитива. По этой причине был разработан принцип хранения формы примитива в МК-модели с помощью средства CATIA v5, называемого User-Defined Feature (UDF), и средства для автоматизации создания примитивов — макросы «AddShape» и «Poly». Каждый примитив реализован в своём файле типа CATPart, в котором создаётся описание UDF, превращая этот файл в шаблон. Некоторые объекты модели, в случае примитивов — некоторые стандартные плоскости, и параметры модели объявляются «внешними». Далее в другом документе возможно создать вхождение формы, определённой в файле-шаблоне, вызвав соответствующее формообразование. При этом в текущем документе потребуется лишь выбрать необходимые элементы, с которыми будут совпадать «внешние» объекты шаблона, и задать значения параметрам создаваемого вхождения. Примитивы в “Builder” построены так, чтобы этими совпадающими элементами были стандартные плоскости. За счёт этого при создании вхождения достаточно нажать кнопку “use identical names” и CATIA автоматически совместит правильные элементы. Более того, использование макроса «AddNewPart» автоматизирует этот процесс.

В “CATIA-GDML geometry builder” с помощью UDF реализованы следующие примитивы (см. рис. 2.6):

- arb8 — фигура общего вида, имеющая 8 вершин;
- box — прямоугольный параллелепипед;
- cons — сектор конуса (cone segment);
- ellipsoid — эллипсоид;
- elliptical cone — эллиптический конус;
- elliptical tube — эллиптический цилиндр;
- orb — шар (полный);
- para — параллелепипед общего вида (parallelepiped);
- sphere — сектор полого шара;
- torus — сектор открытого тора;
- trap — трапециод общего вида (general trapezoid);
- trd — трапециод частного вида (trapezoid);
- tubs — сектор полого цилиндра (tube section);
- twisted box — скрученный прямоугольный параллелепипед;
- twisted trap — скрученный трапециод общего вида (twisted general trapezoid);
- twisted trd — скрученный трапециод частного вида (twisted trapezoid);
- twisted tubs — скрученный сектор полого цилиндра (twisted tube section).

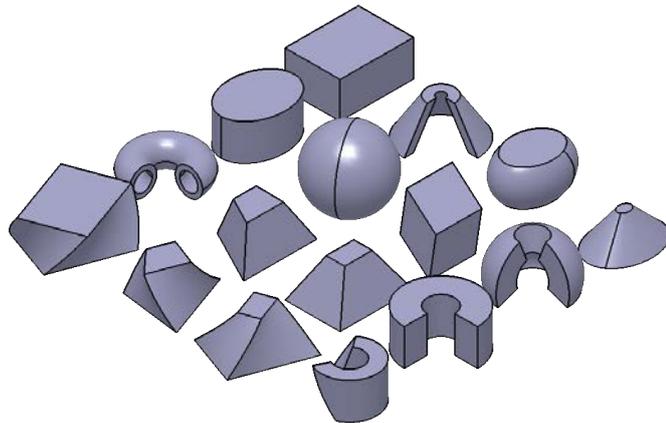


Рис. 2.6: Некоторые примитивы, реализованные в “CATIA-GDML geometry builder” с помощью UDF.

Особым образом реализованы примитивы *polycone* и *polyhedra*, см. описание макроса «Poly» в разделе 2.6.5.

Рассмотрим для примера реализацию примитива *Tubs* (tube section) в файле-шаблоне UDF системы CATIA. Примитив *Tubs* имеет 5 параметров — радиусы внутренней r_{min} и внешней r_{max} цилиндрических поверхностей, половина высоты примитива dz вдоль оси Z , начальный угол вращения $pSPhi$ и диапазон по углу $pDPhi$, откладываемые против часовой стрелки от оси X . Для получения формы примитива *Tubs* с помощью САПР необходимо

выполнить формообразование вращения прямоугольного профиля вокруг оси, находящейся в плоскости профиля и параллельной одной из сторон профиля.

На рис. 2.7 (слева) приведён документ-шаблон со стандартной комбинацией параметров, соответствующей наиболее общему случаю примитива Tubs, см. также рис. 2.8 (случай 1). Описанный файл-шаблон вызывается при построении формы и пользователь не видит подробностей его реализации — ему доступен лишь список управляющих параметров, см. рис. 2.7 (справа).

На рис. 2.8 приведены все возможные формы примитива Tubs, имеющие различную топологию геометрии, и получающиеся при некоторых комбинациях значений параметров. Если $r_{min} = 0$, то внутренняя цилиндрическая поверхность вырождается (случаи 2 и 4). Если $pDP\phi = 360$, то плоские грани сливаются образуя либо полный цилиндр (случай 4) либо кольцо (случай 3).

Не допускаются следующие комбинации: $r_{min} = r_{max}$ — примитив вырождается в тонкую поверхность; $r_{min} > r_{max}$ — САПР построит форму, в которой поменяются местами внутренняя и внешняя поверхность, однако поведение системы проведения частиц не определено; $r_{max} = 0$ (из правила $r_{min} < r_{max}$ это подразумевает, что $r_{min} = r_{max} = 0$) — примитив вырождается в отрезок на оси Z; $dz = 0$ — примитив вырождается в фигуру на плоскости (круг, сектор круга, кольцо или сектор кольца в зависимости от значений остальных параметров).

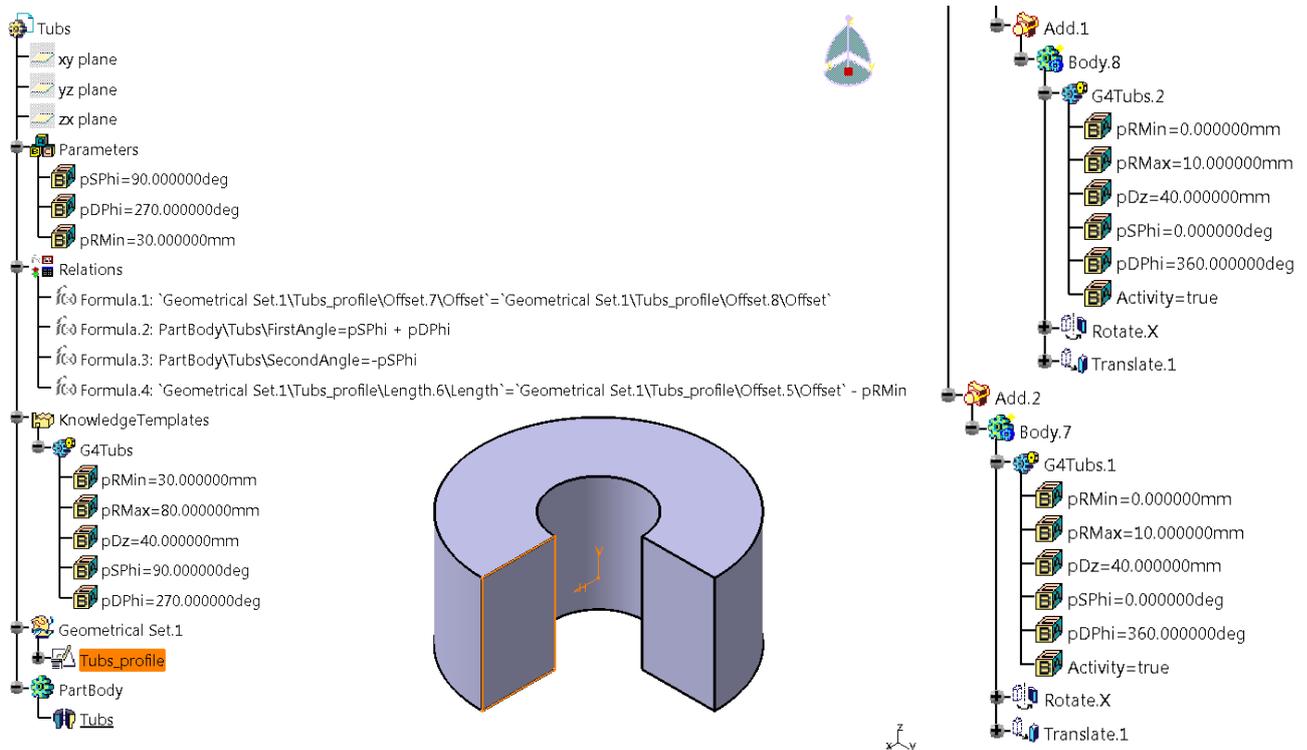


Рис. 2.7: Слева: примитив Tubs в файле-шаблоне САТИА; видна внутренняя реализация формы с помощью средств САПР. Справа: фрагмент дерева САТИА с описанием булевой формы с использованием примитива Tubs; для изменения доступны только управляющие параметры.

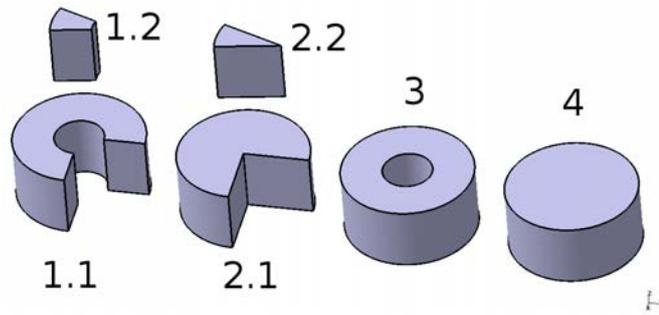


Рис. 2.8: Возможные варианты топологии формы примитива Tubs.

При создании скрученных примитивов (twisted box, twisted trap, twisted trd, twisted tubs) необходимо учитывать, что при нулевом угле скручивания они превращаются в обычные примитивы (соответственно box, trap, trd и tubs). Для построения скрученных примитивов в САТИА применяется формообразование “тело по сечениям”, а в качестве направляющей используется спираль, параметры которой зависят от угла скручивания, причём так, что если этот угол равен нулю, то спираль не может быть построена. Для корректной обработки такого исключения применяется возможность САТИА, которая называется rule и позволяет задать программу для того чтобы выполнять определённые действия при выполнении некоторых условий. На рис. 2.9 приведено описание примитива TwistedBox в файле-шаблоне, включая код правила, обрабатывающего особый случай, когда угол скручивания равен нулю.

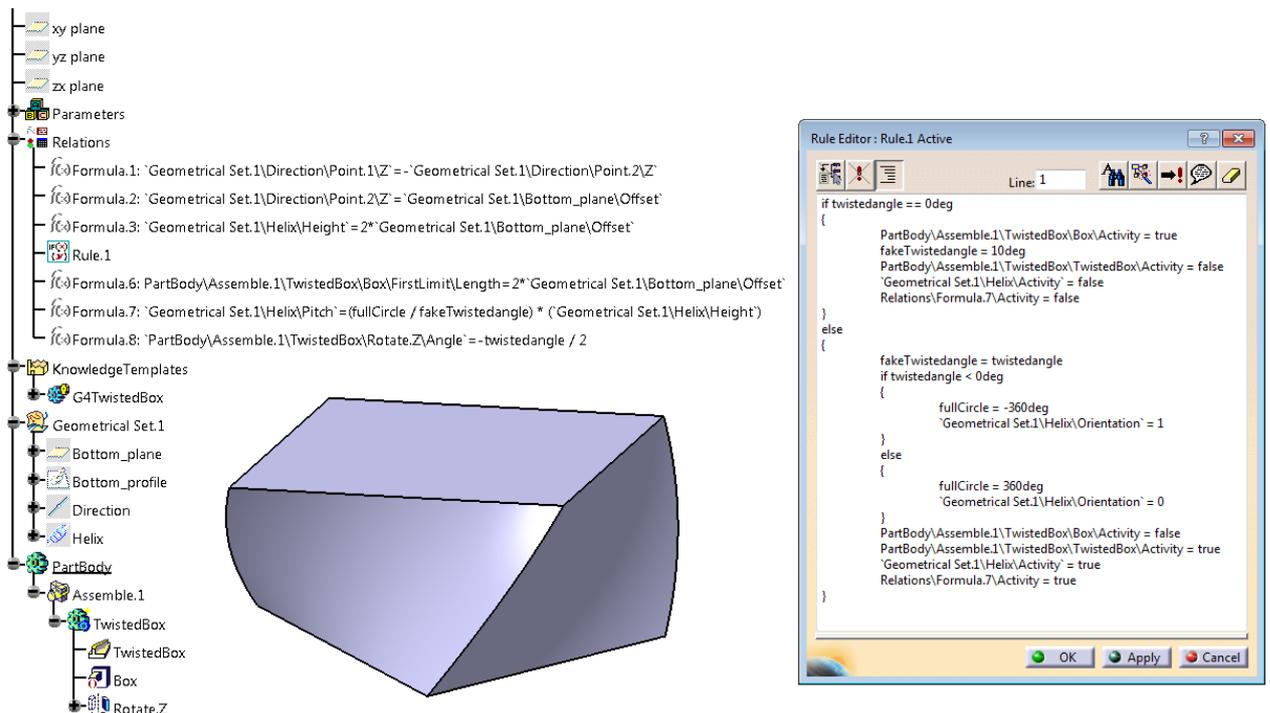


Рис. 2.9: Файл-шаблон примитива TwistedBox, в котором применяется rule для обработки случая нулевого угла скручивания.

2.6.2 Булевы операции

Форма объёма может быть задана как примитив либо булева операция над примитивами или результатами булевых операций (см. раздел 2.1.3), причём работает такое правило, что

первый операнд каждой операции не должен подвергаться каким-либо преобразованиям координат. При создании булевых операций матрица позиционирования второго операнда относительно первого задаётся тремя поворотами вокруг стандартных фиксированных осей и одним сдвигом, то есть так же, как и при позиционировании дочернего объёма в материнском. Разница заключается в том, что порядок поворотов обратный — сначала вокруг X, затем вокруг Y и вокруг Z. Сдвиг выполняется после поворотов.

Операндом и результатом булевой операции в МК-модели в CATIA v5, по правилам “Builder”, является тело — объект типа Body. Для того чтобы создать булеву операцию, необходимо к телу, обозначающему результат, присоединить первый операнд с помощью формообразования Assemble, а второй — с помощью одного из формообразований Add, Remove или Intersect, в зависимости от типа операции. Если операнд это просто примитив, то в теле будет одно формообразование типа UDF. Второй операнд может также иметь преобразования координат. На рис. 2.10 приведён пример формы, составленной четырьмя булевыми операциями — двумя объединениями и двумя вычитаниями.

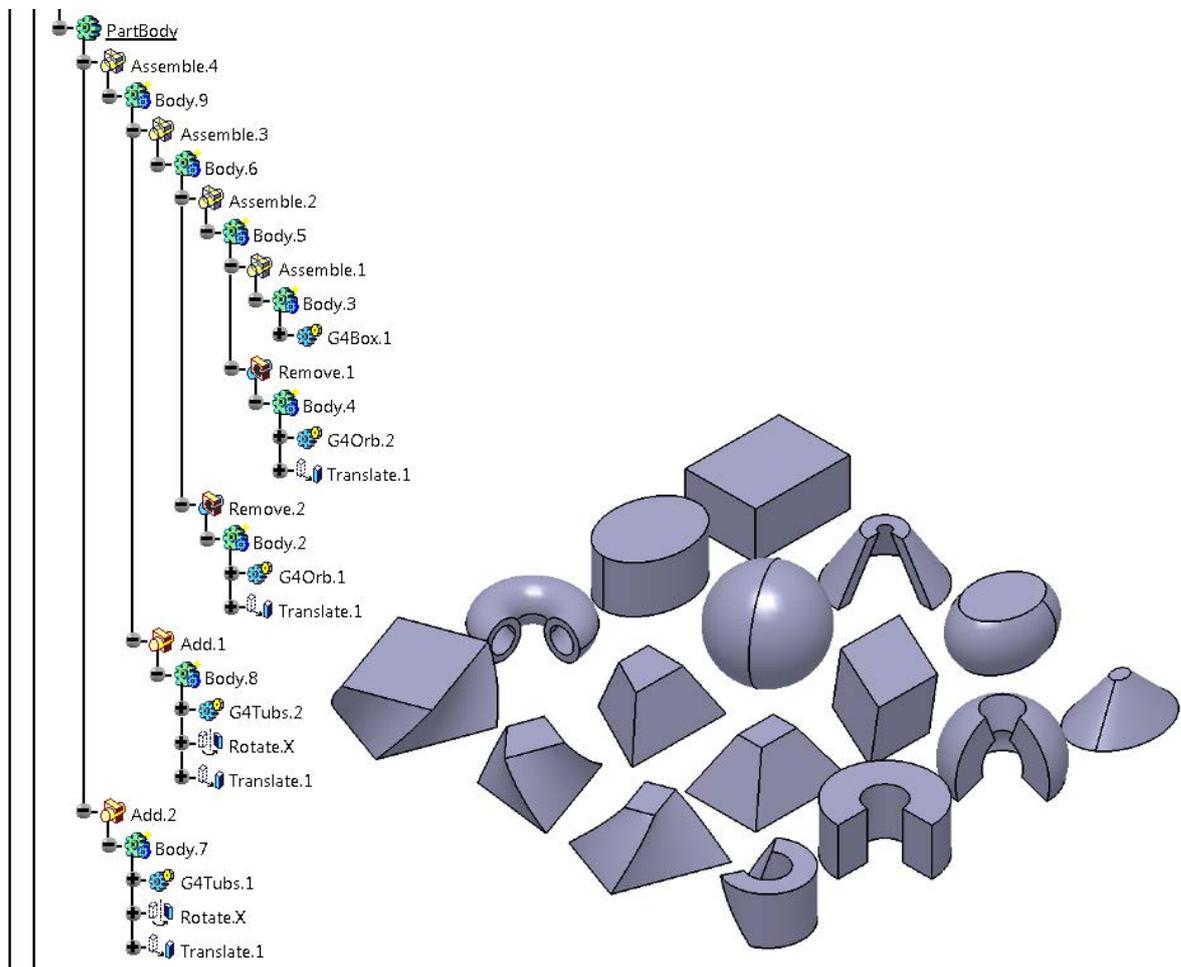


Рис. 2.10: Форма, составленная булевой операцией, представленная в CATIA по правилам “CATIA-GDML geometry builder”.

2.6.3 Тесселированная геометрия

В GEANT/ROOT реализована поддержка триангулированной геометрии (см. раздел 2.1.4), однако специфика этих систем накладывает строгое ограничение — с помощью треугольников должна быть описана только замкнутая оболочка, ограничивающая область пространства с заданным материалом, т.е., по сути, объём. Для реализации поддержки триангулиро-

ванной геометрии в “CATIA-GDML geometry builder” были разработаны правила её хранения в модели и необходимый код в конвертерах «CATIA2GDML» и «GDML2CATIA».

С помощью стандартных средств CATIA представляется возможным автоматически построить триангуляцию любой исходной геометрии с заданными параметрами точности. Далее, также стандартными средствами CATIA полученную триангулированную модель можно экспортировать во внешний STL-файл. В состав “Builder” входит специально разработанный на языке C++ инструмент для перевода STL в соответствующее описание в GDML. Поставляются как исходные файлы, которые можно скомпилировать под ОС Windows или Linux, так и собранный запускаемый exe-файл. Особенностью данного подхода является то, что модель, создаваемая в процессе импорта из GDML в CATIA, позволяет пользователю редактировать отдельные узлы сетки. Спецификация GDML позволяет совмещать в одной установке стандартное описание форм (примитивы и булевы операции) и тесселированное.

2.6.4 Параметризация

В “Builder” предусмотрена возможность создания параметризованных геометрических МК-моделей. У таких моделей имеются входные параметры и формулы, задающие зависимость между входными параметрами и внутренними переменными, а именно параметрами примитивов, значениями поворотов и смещений булевских операндов и дочерних объёмов. Также параметризация поддерживается форматом GDML и пакетами GEANT и ROOT, модули импорта которых вычисляют в каждом конкретном случае значения параметров, заданных формулами, перед непосредственно конструированием геометрии.

В модели CATIA v5 можно вводить пользовательские параметры как в документах типа CATProduct, так и в документах типа CATPart. При этом сборка в CATProduct файле может иметь свои пользовательские параметры и формулы, а дочерние компоненты в CATPart файлах — свои. Обязательное требование “Builder” заключается в том, что все параметры и формулы должны находиться в верхнем продукте, а не в файлах деталей. CATIA v5 позволяет задавать зависимости между любыми параметрами, в том числе внутренними, не являющимися пользовательскими, однако для успешного экспорта в GDML-файл формула должна в левой части иметь параметр примитива или угол поворота или значение сдвига, а в правой части — формулу только над пользовательскими параметрами. Пользовательский параметр CATIA v5, экспортируемый в переменную в GDML, должен обязательно иметь безразмерный тип Real. В связи с этим имеются правила оформления формул и приведения единиц измерения. Также имеется стандартная переменная DEGtoRAD для перевода значения углов из градусов в радианы.

В результате экспорта параметризованной геометрии из CATIA получается GDML-файл, у которого в <define> секции есть тэги <variable>, обозначающие входные параметры модели со значениями. При импорте параметризованной геометрии из GDML в ROOT все значения внутренних переменных рассчитываются в соответствии с формулами по значениям входных параметров. После этого геометрия не является параметризованной. Таким образом, значения входных параметров должны задаваться пользователем непосредственно в GDML-файле перед импортом в конечную систему.

2.6.5 Макропрограммы для CATIA v5

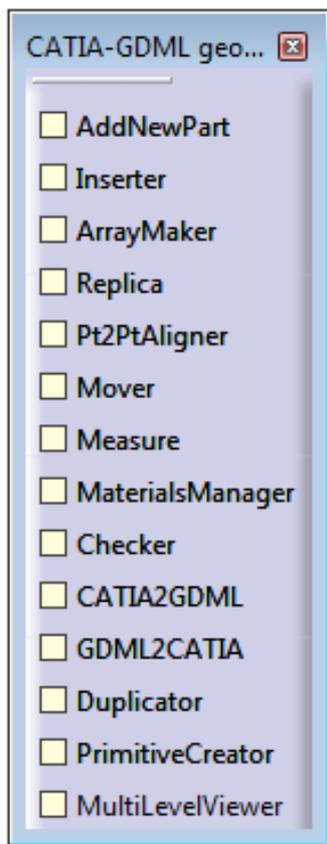


Рис. 2.11: Панель инструментов “CATIA-GDML geometry builder” в CATIA.

Макропрограммы для CATIA v5 написаны на языке Visual Basic for Applications с применением CATIA API. Все макропрограммы доступны пользователю в режиме работы над сборкой, кроме «AddShape» и «Poly», доступных при редактировании детали, см. рис. 2.11. Для комфортной работы с “Builder” в поставке также имеются файлы для настройки окружения CATIA. Часть функционала зависит от путей к файлам, которые прописаны в переменных окружения, поэтому настоятельно рекомендуется перед использованием “Builder” выполнить настройку, следуя инструкции, поставляемой в пакете. Пользователь может выполнить все операции, необходимые для получения МК-модели, самостоятельно без применения макропрограмм, но в этом случае велика вероятность упустить какой-либо шаг, что приведёт к ошибке, которую сложно диагностировать.

В МК-модели в CATIA есть строгие правила именования. Применение макросов избавляет пользователя от необходимости контролировать имена объектов в документах. Все имена, сгенерированные при использовании “Builder”, не конфликтуют между собой и позволяют получить корректный GDML-файл на выходе. Практически везде пользователь имеет право изменять суффиксы, не изменяя основного названия, несущего информацию о типе объекта — формообразования, тела, и т.д. Однако, в редких случаях суффикс имеет решающее значение, как например в именах поворотов — в имени “Rotate.X” суффикс “X” обозначает ось поворота, считываемую конвертером «CATIA2GDML».

Далее приводится краткое описание каждой макропрограммы “CATIA-GDML geometry builder”.

«AddNewPart»

Данная макропрограмма автоматизирует создание нового документа типа CATPart на основе шаблона, содержащего необходимые элементы — публикация главного тела детали, называемая PartBody, пользовательский параметр под названием Material со значением по умолчанию “vacuum”. Для удобства работы, в файле шаблона и во всех генерируемых новых документах типа CATPart погашены стандартные плоскости. Созданный документ автоматически сохраняется на диск в папку, в которой выполняется построение модели, и которая автоматически определяется из открытого документа типа CATProduct в момент вызова макроса. Путь можно изменить в окне графического интерфейса. Также созданная деталь добавляется в качестве компонента в открытую сборку. Новый документ открывается в дочернем окне CATIA и пользователь может как начать работу над объёмом, так и оставить его пустым и отложить редактирование. Достаточно закрыть это окно и система перейдёт обратно к редактированию сборки.

«AddShape»

«AddShape» используется для создания примитивов, в случае необходимости — вместе с поворотами и сдвигом. Макропрограмма играет роль интерфейса между пользователем и

файлами примитивов. При запуске макроса выводится окно со списком доступных примитивов, по нажатию на кнопку “создать” в рабочее тело детали вставляется выбранный примитив со значениями параметров по умолчанию. Если на форме графического интерфейса выбраны флаги создания поворотов и сдвига, то создаются соответствующие формообразования. Если форма объёма состоит из одного примитива, то повороты и смещение запрещены. Они имеют смысл только при создании второго операнда булевой операции. Список примитивов формируется из списка файлов, имеющих в папке примитивов, определённой с помощью относительного пути в переменной окружения, называемой “BuilderPath”.

«Poly»

В силу ограничений САТІА нет возможности представить полипримитивы (polycone и polyhedra), имеющие переменное число секций, с помощью UDF, как это сделано с остальными примитивами. Для полипримитивов была разработана специальная структура дерева и правила именования. Секции поликонуса представлены стандартными конусами. В случае polyhedra для представления секции используется hedra — специальный примитив, не поддерживаемый GEANT/ROOT. Формообразование translate обеспечивает сдвиг секций относительно друг друга. Для автоматизации построения полипримитивов в соответствии с этой структурой предоставляется макрос «Poly».

«Inserter»

Макрос «Inserter» — это инструмент для помещения одного выбранного объёма в другой. Также можно сказать, что «Inserter» создаёт физический объём, задающий связь материнский-дочерний между двумя существующими логическими объёмами. «Inserter» — возможно, самый используемый макрос, в результате работы которого в документе типа CATPart, представляющем материнский объём, создаётся тело с именем “Body.B.*”, где *B* — имя дочернего объёма. Внутри этого тела имеется ссылка на публикацию PartBody документа типа CATPart, представляющего объём *B*, и элементы преобразования типа Rotate и Translate — три поворота и сдвиг, задающие матрицу позиционирования *B* внутри *A*. Повороты выполняются вокруг фиксированных стандартных осей, а порядок строго определён — сначала вокруг оси *Z*, затем вокруг оси *Y* и в конце вокруг оси *X*.

«ArrayMaker»

В “Builder” есть возможность задавать линейные и круговые массивы — многократные вхождения дочернего объёма в материнский, позиционированные с некоторым шагом вдоль или вокруг некоторой оси соответственно. Макрос «ArrayMaker» схож с «Inserter» по идее и реализации. После выполнения вставки дочернего объёма в материнский, к созданному телу добавляется формообразование pattern вдоль указанной оси и с указанными шагом и количеством вхождений. Важно отметить, что при экспорте в GDML массив преобразуется в набор независимых вхождений.

«Replica»

Макропрограмма «Replica» автоматизирует позиционирование дольки в материнском объёме. Поскольку формы долек должны быть одинаковы, для описания разделённых объёмов в САТІА решено использовать тот же принцип, что и для описания массивов с тем отличием, что имя формообразования pattern должно соответствовать шаблону “Replica.Axis”, где Axis — ось реплицирования. Т.к. дольки должны заполнять всё пространство материнского объёма, возможен автоматический расчёт геометрических размеров дольки по двум входным параметрам — направлению деления и количеству.

«PointToPointAligner»

«PointToPointAligner» автоматизирует процесс позиционирования дочернего объёма внутри материнского. При вложении одного объёма в другой необходимо задать положение дочернего объёма в материнском. В “Builder” для этого используется три формообразования типа Rotate — последовательные повороты вокруг трёх фиксированных стандартных осей Z, Y и X — и одно типа Translate — параллельный сдвиг. Пользователь должен каким-то образом рассчитать значения углов и координаты сдвига. Типовая процедура определения этих значений заключается в том, что пользователь использует стандартные средства САПР для измерения углов и расстояний и затем вручную записывает эти значения в соответствующие параметры. В случае сложного поворота практически невозможно получить углы поворота прямым измерением — требуется активное интеллектуальное участие пользователя. Определение смещения, которое выполняется после всех поворотов, прямолинейно, но требует выполнения достаточно большого количества механических операций, которые автоматизированы в «PointToPointAligner».

Этот макрос предоставляет пользователю возможность выбрать две точки, которые совместятся придвижением первой ко второй. Первая точка должна быть вершиной, принадлежащей телу, обозначающему дочерний объём — только в этом случае в макропрограмме представляется возможным определить, какому телу принадлежит выбранная вершина, чтобы выбрать формообразования, описывающие матрицу позиционирования, которую необходимо изменить. Вторая точка может быть полученной в результате любой операции — это может быть как вершина тела, так и каркасный элемент. Она используется только для определения координат с целью дальнейшего расчёта параметров сдвига.

«Mover»

Нередко возникает такая ситуация, что требуется подвинуть группу дочерних объёмов внутри одного материнского на одинаковое расстояние. Если использовать существующие средства САПР, то нет никакого способа выполнить этот сдвиг для нескольких объёмов сразу. В ручном режиме пользователю требуется осуществлять сдвиг для каждого объёма отдельно путём изменения значений параметров формообразования Translate, отвечающего за позиционирование дочернего объёма в материнском. Чтобы автоматизировать этот процесс был разработан «Mover». При использовании «Mover» пользователь выбирает в графическом интерфейсе, какие дочерние объёмы он хочет подвинуть и на какое расстояние.

«Measure»

Макропрограмма «Measure» автоматизирует процесс измерения и записи результата измерения в какой-либо параметр модели. Необходимость выполнения подобной операции особенно часто возникает при работе одновременно с исходной САПР-моделью и разрабатываемой МК-моделью. Если требуется измерить какое-либо расстояние между объектами или размер какого-либо геометрического элемента, то пользователь может воспользоваться стандартными средствами САПР “Measure between” и “Measure item” соответственно. В результате появляется окно с результатами измерения, которое обычно включает также и компоненты по координатам. Чтобы перенести эти результаты измерения куда-либо, необходимо выделить и скопировать значение из поля, закрыть окно измерения, найти параметр в МК-модели, открыть его для редактирования и вставить в качестве значения содержимое буфера обмена. При использовании «Measure» список параметров модели отображается в окне графического интерфейса. Пользователь сначала выбирает тип измерения, затем выбирает измеряемые объекты в области геометрии. Результаты измерения выводятся в окне графического интерфейса и для того, чтобы записать выбранный результат в какой-либо параметр МК-модели,

достаточно выбрать его в дереве спецификации.

«MaterialsManager»

Приложение «MaterialsManager» предоставляет пользователю возможность изменять материалы отдельных объёмов, находясь на уровне верхнего продукта. Это избавляет от необходимости часто переключаться между документами либо режимами работы в случае контекстного редактирования. Также заметным преимуществом использования «MaterialsManager» является наглядность — информация о материалах всех объёмов представляется в компактном списке, присутствует возможность быстро изменять значения в нескольких элементах списка. Помимо этого, наличие «MaterialsManager» позволяет отложить работу с материалами на последний этап. Использование шаблона файла детали предотвращает такую ситуацию, что пользователь вообще не укажет материал объёма — по умолчанию указан вакуум (vacuum). В графическом интерфейсе «MaterialsManager» представлена таблица из трёх столбцов — имя документа (объём), текущий материал, новый материал. Все изменения применяются только к этому списку до тех пор, пока пользователь не нажмёт кнопку “Modify materials in documents” и изменения не внесутся в соответствующие документы типа CATPart.

«Checker»

Чтобы ускорить процесс моделирования необходимо отлавливать ошибки на как можно более раннем этапе. Макрос «Checker» позволяет выполнять проверку правильности построенной пользователем МК-модели в CATIA до экспорта в GDML, таким образом сокращая время отладки, которое ушло бы на экспорт геометрии в GDML, импорт в GEANT/ROOT и запуск проверки в конечной системе. Необходимость проверки возникает в силу того, что в разработанной структуре документов CATIA для МК-модели введено множество правил и ограничений, нетипичных для обычного использования САПР. «Checker» выполняет 2 типа проверок. Первый — корректность с точки зрения конвертера, т.е. соблюдение структуры документов, правильность именования, второй — корректность с точки зрения правил построения геометрии в GEANT/ROOT, см. рис. 2.12.

Использование разработанных интерактивных приложений ограждает пользователя от ошибок именования в итоговой МК-модели. Есть только одно место, где необходимо вручную указывать имя — формообразование-вращение при позиционировании операнда на уровне формы.

Корректность геометрии определяется по двум критериям:

1. любые два объёма, находящиеся на одном уровне, не должны пересекаться;
2. никакой дочерний объём не должен выходить за пределы материнского объёма.

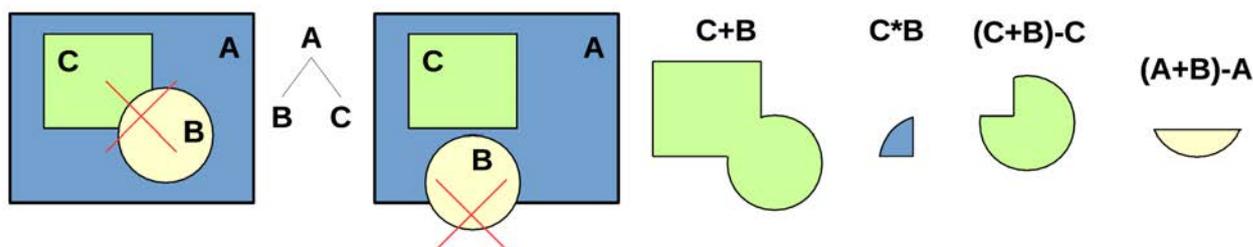


Рис. 2.12: Логические операции для определения правильности позиционирования объёмов.

Разработан специальный алгоритм проверки указанных условий. В цикле перебираются все пары объёмов, лежащих на одном уровне, и проверяется, не пусто ли множество пересечения текущей пары. В том случае, если не пусто, то возникает событие, оповещающее, что текущая пара объёмов расположена недопустимым образом.

Более детально описанный процесс выглядит следующим образом. В силу того, что физические объёмы описываются телами детали, перебор объёмов, лежащих на одном уровне, сводится к перебору всех тел детали, кроме PartBody. Чтобы исследовать множество пересечения пары тел, создаётся новое пустое тело и копии исходных. Затем применяется булева операция `Intersect` над копиями, и результат заносится в ранее созданное пустое тело. На этапе выполнения формообразования булевой операции выдаётся возможность отследить корректность результата. С точки зрения CATIA пустое пересечение является недопустимым результатом и возникает внутренняя ошибка. Именно программный отлов и обработка этой ошибки говорит о корректности расположения объёмов. После выполнения булевой операции результирующее тело удаляется, не оставляя таким образом никаких следов промежуточных преобразований.

Для того чтобы отследить, не выходит ли объём за пределы своего материнского, применяется схожий подход. Отличие заключается в последовательности булевых операций — вместо пересечения $A * B$ двух объёмов A и B проверяется объём, полученный последовательностью двух операций $((A + B) - A)$, где A — материнский объём, а B — дочерний. Присутствие результата операции $((A + B) - A)$ говорит о том, что какая-либо часть дочернего объёма расположена за пределами материнского.

«CATIA2GDML»

Конвертер «CATIA2GDML» проецирует дерево построения МК-модели из CATIA v5 в GDML-файл. За счёт того, что правила построения МК-модели в CATIA формулировались с ориентиром на структуру, принятую в GEANT/ROOT, базовый функционал прямого конвертера заключается в том, что он создаёт в выходном GDML-файле сущности, соответствующие найденным объектам в дереве построения в CATIA. Важной особенностью является то, что конвертер не обращается к самой геометрии, вся необходимая информация содержится в дереве построения модели.

Если исходная МК-модель параметризованная (см. раздел 2.6.4), то «CATIA2GDML» создаёт в `<define>` секции выходного GDML-файла тэги `<variable>`, соответствующие параметрам модели. Также всегда создаются ещё три объекта: нулевой поворот “identity”, нулевой сдвиг “central” и константа “DEGtoRAD” для перевода из градусов в радианы.

Макропрограмма «CATIA2GDML», помимо прямолинейного отображения дерева модели в CATIA на GDML, осуществляет преобразование некоторых особенностей, введённых в CATIA для упрощения процесса моделирования. Так, например, для отображения массива, которого нет в возможностях GDML, макрос рассчитывает повороты и положения каждого вхождения и создаёт независимые дочерние объёмы в GDML. В случае линейного массива задача проста — положение первого вхождения определяется напрямую из значений формообразований поворотов и смещения, а за счёт того, что линейные массивы могут быть только вдоль стандартных осей, положение каждого следующего вхождения рассчитывается изменением одной координаты на величину шага. В случае круговых массивов расчёт выполняется с применением матричных преобразований, обсуждаемых в разделе 2.6.8.

В дереве CATIA нет обособленного списка используемых в модели материалов, поэтому для создания такого в GDML выполняется нехитрый алгоритм, который при проходе в цикле по объёмам добавляет в выходной список имя материала, если такого ещё нет.

В “Builder” реализована возможность переноса цвета объёма с помощью вспомогательного тэга `<auxiliary>` GDML-файла, который позволяет добавлять произвольное поле данных

к описанию логического объёма. Цвет тела в CATIA никак не отображается в дереве, поэтому для формирования тэга при экспорте модели опрашиваются параметры визуализации главного тела детали (PartBody), содержащие в том числе и цвет.

«GDML2CATIA»

«GDML2CATIA» выполняет процедуру, обратную «CATIA2GDML», — проецирует GDML-файл на дерево модели CATIA v5. Если исходный GDML-файл содержит параметризацию, то генерируемая МК-модель в CATIA также будет параметризована. Аналогично прямому конвертеру, для передачи цвета автоматически выполняется дополнительная операция присвоения параметров визуализации тела если в GDML-файле встречается тэг <auxiliary>.

В GDML отсутствует возможность определять массивы с помощью pattern, поэтому при конвертации в обратном направлении, из GDML в CATIA, невозможно восстановить массив. Следовательно, одна из немногих операций, которые необходимо совершать после импорта геометрии из GDML в CATIA — ручной перевод множества дочерних объёмов в массив. Обычно это очень простая процедура, и заключается она в том, что удаляются все вхождения, кроме первого, и в список формообразований первого тела добавляется pattern, которому задаются необходимые параметры и имя.

«Duplicator»

Создание МК-модели более-менее сложной экспериментальной установки обычно требует создания нескольких вхождений параметризованных подборок с разными значениями параметров. Можно привести следующий пример. Рассмотрим детектор, состоящий из однотипных модулей, содержащих массив чувствительных объёмов (сенсоров), и какие-то другие элементы, например, платы передней электроники. Предположим, что существует несколько типоразмеров модулей, отличающихся количеством и размером сенсоров. Таким детектором может быть, например, калориметр, построенный из нескольких типов модулей, отличающихся гранулярностью — размер чувствительного объёма увеличивается по мере удаления от пучка. Очевидно, что если типы модулей отличаются лишь значениями каких-либо переменных, то представляется возможным построить одну параметризованную модель модуля, чтобы дальше использовать её многократно для построения всего детектора. К сожалению в GEANT/ROOT нет возможности так сделать — нужно для каждого типа иметь отдельное определение геометрии. Также это невозможно и в GDML и в CATIA.

В модели для каждой комбинации параметров, то есть для каждого модуля в нашем примере, должна существовать отдельная параметризованная подборка. При этом имена всех объёмов должны отличаться, а наборы параметров для каждого модуля должны быть независимы. В CATIA нет возможности быстро создать копию подборки вместе со всеми параметрами и зависимостями. Для того, чтобы автоматизировать процесс создания такой копии используется «Duplicator». Случай применения «Duplicator» описан в разделе 3.3.5.

«Primitive creator»

Многие детали, которые необходимо моделировать, составлены из простых форм, вроде параллелепипедов, цилиндров, трапециевидов, и т.д. При построении МК-модели на основе САПР-модели часто возникает задача аппроксимации какой-либо формы одним примитивом. Целый ряд примитивов — trap, trd, para, box, sphere, cons, tubs — имеют в общем случае одинаковую топологию геометрии, отличающуюся наличием восьми вершин (см. рис. 2.1). Представляется возможным автоматически рассчитать параметры примитива и его позиционирование в любой СК по восьми выбранным точкам.

Последовательность операций, выполняемых макропрограммой «Primitive creator», можно разбить на несколько блоков. Сначала с помощью средств API CATIA выполняются вспомогательные построения — в зависимости от выбранного типа примитива строятся различные линии, соединяющие выбранные точки, оси, плоскости, и др. У многих примитивов одну плоскую грань ограничивают четырёхугольники, при этом в процессе вспомогательных построений плоскости строятся по трём точкам. В таком случае выполняется дополнительная проверка того, что 4-я точка принадлежит плоскости построенной по трём точкам. На порядок обкликивания точек накладываются ограничения, однако выполнение подобных проверок позволяет автоматически определить некоторые случаи некорректного порядка и скорректировать индексы точек. В процессе вспомогательных построений генерируются также и орты системы координат примитива.

Второй этап работы «Primitive creator» — расчёт параметров примитива путём измерения расстояний и углов между элементами, построенными на первом этапе.

На третьем этапе происходит опрос координат точек ортов и формируется матрица позиционирования примитива в глобальной СК. По этой матрице и матрицам, построенным по известным углам и координатам из имеющейся иерархии объёмов, в соответствии с преобразованиями, описанными в разделе 2.6.8, определяются углы поворотов и координаты сдвига генерируемого примитива.

Далеко не всегда в геометрии присутствуют элементы, которые можно выбрать в качестве вершин аппроксимирующего примитива. На рис. 2.13 приведён пример такой исходной формы, для которой требуется выполнить дополнительные построения для получения точек, которые можно выбрать в «Primitive creator». Справа представлена часть дерева спецификации документа, описывающего некоторый объём Trap, имеющий форму примитива trap. До распознавания примитив имеет значения параметров по умолчанию. На определённом этапе работы «Primitive creator» пользователю будет предложено выбрать UDF, в который занесутся рассчитанные параметры (G4Trap.1), и формообразование типа translate, которое должно быть последним формообразованием в теле. Это тело должно обозначать либо вхождение данного объёма (Trap) в его материнский объём (Translate.1 внутри Body.Trap.1, см. рис. 2.13, слева), либо второй операнд булевой операции.

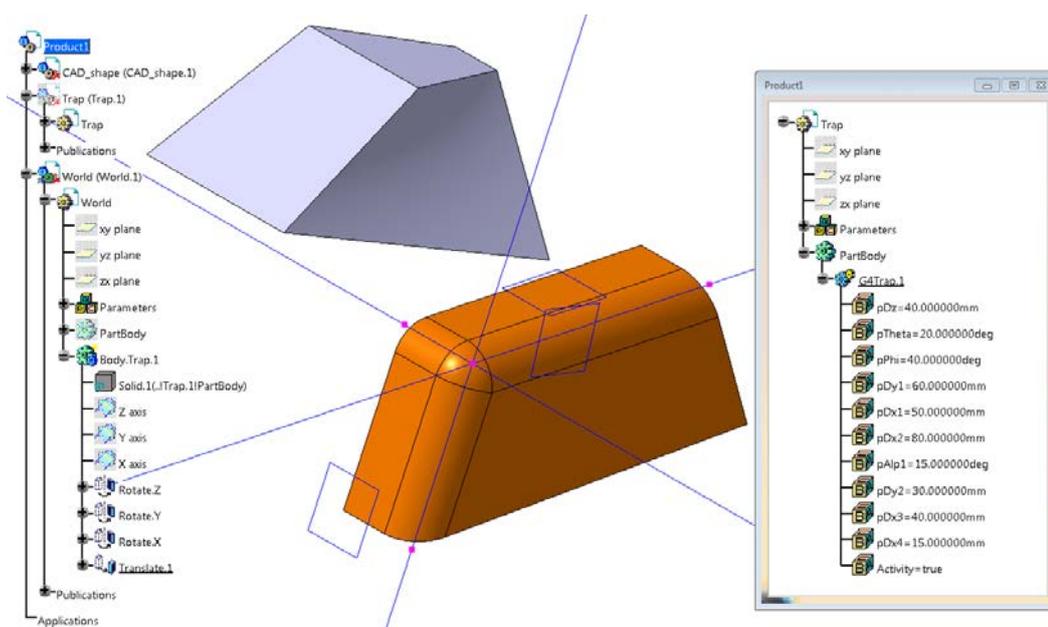


Рис. 2.13: Исходная форма, которую требуется аппроксимировать, не является точно примитивом trap. Для получения 8 точек, по которым будет построен примитив, необходимо построить несколько плоскостей, прямых и их пересечений.

«MultiLevelViewer»

В соответствии со структурой документов, определённой в “CATIA-GDML geometry builder”, и позволяющей экспорт во внешний файл, в один момент можно визуализировать только один уровень вложенности. На рис. 2.14 (слева) представлены отдельные объёмы, причём одновременно в области геометрии есть возможность увидеть только форму текущего объёма и позиционированные внутри формы дочерние объёмы. Следует отметить, что если дочерние объёмы позиционированы нетривиально относительно системы координат материнского объёма, то без выполнения дополнительных действий невозможно увидеть положение внучатых объёмов в материнском.

Для того чтобы визуализировать несколько уровней вложенности в CATIA реализован следующий подход. Во всех документах типа CATPart, то есть для всех объёмов, все тела, обозначающие дочерние объёмы, вычитаются из главного тела PartBody. После выполнения такого вычитания получившаяся форма объёма представляет собой непосредственно ту часть пространства, которая осталась после вытеснения дочерними объёмами соответствующих областей. Если применить аналогичную операцию и для дочерних объёмов, то в объёме верхнего уровня появятся границы всех дочерних объёмов вплоть до самого нижнего уровня. Их можно увидеть при каркасном режиме визуализации CATIA. Описанная процедура автоматизирована в макропрограмме «MultiLevelViewer». На рис. 2.14 (справа) представлен результат работы «MultiLevelViewer» — геометрия, в которой визуализация выполняется вглубь по всему дереву иерархии объёмов. Функционирование «MultiLevelViewer» подразумевает редактирование документов, в результате которого будет невозможно экспортировать модель в GDML, поэтому «MultiLevelViewer» создаёт новую копию всех документов и выполняет преобразование в них.

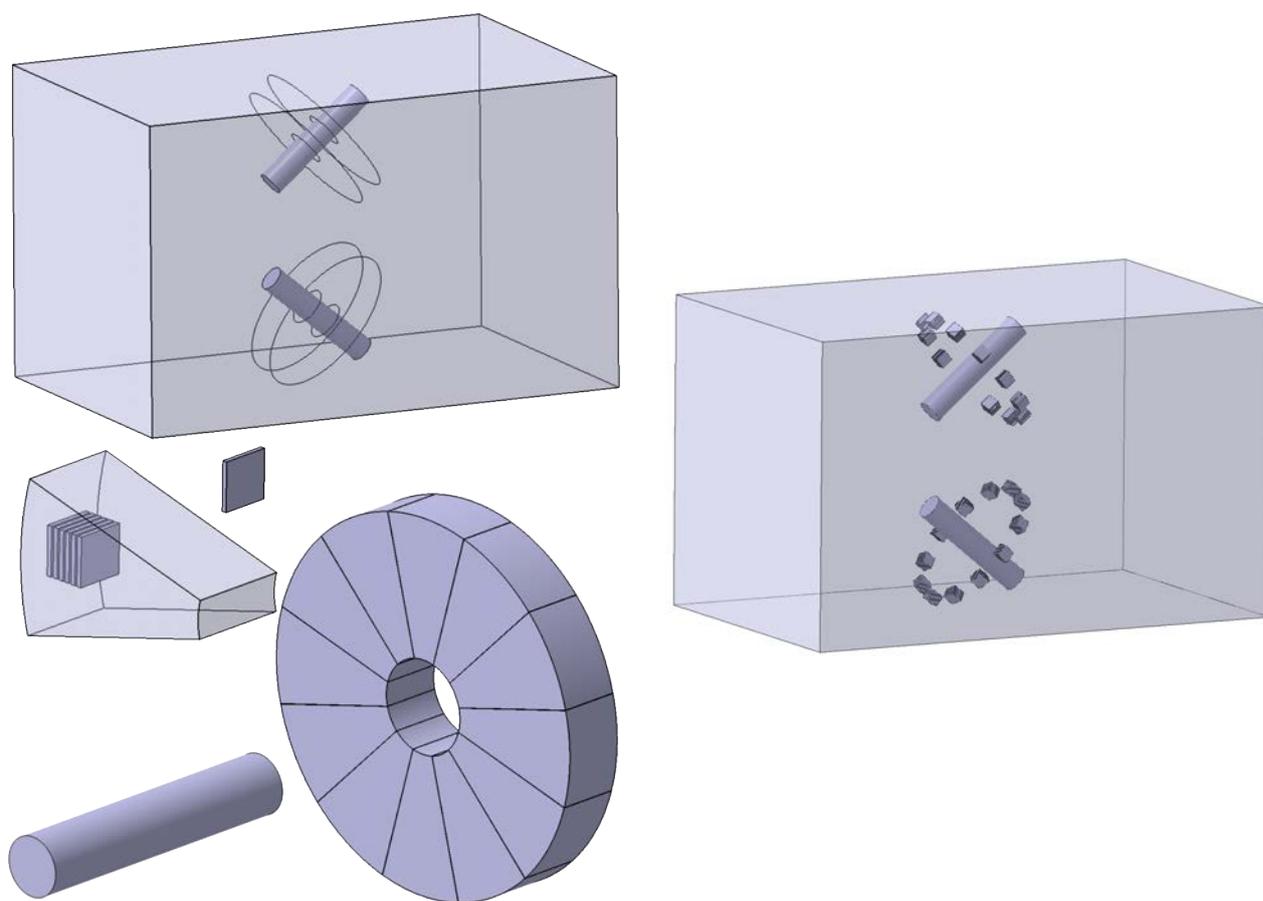


Рис. 2.14: Слева: отдельные объёмы и их дочерние; справа: результат работы «MultiLevelViewer».

2.6.6 Применение CATIA DMU Optimizer для построения МК-геометрии

САПР CATIA v5 в своём составе имеет модуль DMU Optimizer, который позволяет решать задачу оптимизации. Пользователь должен сформировать критерий и определить входные параметры, возможно с допустимыми диапазонами изменения. Также необходимо выбрать метод оптимизации и тип постановки задачи оптимизации — приведение критерия к минимуму, максимуму, либо целевому значению. В качестве критерия можно выбрать существующий параметр системы CATIA v5, задать аналитическое выражение над параметрами, либо результат измерения средствами CATIA расстояния или угла между какими-либо геометрическими элементами, измерение длины элемента, или даже площади или объёма элемента.

Допустим, имеется геометрическая модель объекта, которую необходимо перевести в МК-совместимый формат с упрощением форм, но сохранением габаритов, например подробная инженерная модель некоторого узла, упрощаемого до одного объёма. В этом случае наиболее эффективный вариант это сначала создать структуру формы с приблизительными размерами “на глаз”, а затем с помощью оптимизации подобрать параметры. Критерий может быть составлен, например, как сумма квадратов расстояний между соответствующими точками САПР-модели и МК-модели, а входные параметры — все или некоторые размеры примитивов, параметры позиционирования операндов. Как второй, более сложный вариант, можно создать измерение объёма деталей узла, измерение объёмов МК-геометрии и поставить задачу минимизации их разницы. При этом, однако, нужно предварительно очень тщательно продумать структуру МК-геометрии и ограничить как можно больше параметров.

В целом, можно сказать, что оптимизация — это полезный инструмент, с помощью которого можно решить некоторые проблемы, не решаемые другими способами. Однако невозможно свести нахождение всех параметров МК-модели к одной задаче оптимизации, т.к. с каждым новым входным параметром вырастает сложность проблемы и время, необходимое для решения. Более того, правильно составить критерий сложнее, чем явно задать размер примитива или параметр позиционирования, например с помощью измерения.

2.6.7 Адаптация FairRoot для работы с GDML

Целевым пакетом для большинства МК-моделей, разработанных с помощью “CATIA-GDML geometry builder”, в частности CBM RICH, является пакет CbmRoot, в котором выполняется моделирование, реконструкция, приём и анализ данных эксперимента CBM. CbmRoot — это фреймворк, написанный на основе FairRoot, который в свою очередь написан на основе ROOT. Это означает, что многие классы CbmRoot унаследованы от классов FairRoot, а многие из классов FairRoot — от классов ROOT. Также “Builder” применялся для других экспериментов FAIR (см. раздел 3.3), в которых используются схожие FairRoot-наследованные пакеты PandaRoot и R3bRoot.

Любой элемент экспериментальной установки в системе FairRoot описывается классом, наследованным от базового класса *FairModule*. Для импорта геометрической информации из внешнего файла в классе *FairModule* предусмотрен метод *ConstructGeometry*. Данный метод не выполняет непосредственно чтение информации, а лишь определяет тип файла и выбирает какой метод необходимо вызвать. Поддерживаются различные форматы входных файлов, поэтому существуют отдельные методы, отвечающие за соответствующие форматы:

- *ConstructROOTGeometry*;
- *ConstructASCIIGeometry*;
- *ConstructGEOGeometry*;
- *ConstructGDMLGeometry*.

Методы *ConstructASCIIGeometry* и *ConstructGEOGeometry* не имеют реализации в классе *FairModule* — в соответствии с существующей структурой *FairRoot*, они должны быть реализованы в дочерних классах. В то же время, в методе *ConstructROOTGeometry* класса *FairModule* запрограммирован импорт геометрии из ROOT-файла. Нами в класс *FairModule* был добавлен метод *ConstructGDMLGeometry* с реализацией импорта из GDML-файлов с применением класса *TGDMLParse* из ROOT.

Импорт GDML-геометрии в ROOT подразумевает по умолчанию задание в одном или нескольких связанных друг с другом GDML-файлах всей геометрии установки. Также подразумевается описание в GDML-файле всех использованных материалов. В нашей практике такой подход был бы неудобен. Ниже описаны особенности использования класса *FairModule* в *FairRoot*.

Импорт GDML осуществляется стандартными средствами ROOT. Вместо метода *Import* класса *TGDMLParse*, выполняющего все необходимые шаги и вызывающего метод *CloseGeometry*, после которого внесение каких-либо изменений в геометрию невозможно, используется метод *GDMLReadFile*, который выполняет практически те же действия, что и *Import*, но не закрывает геометрию. Данная возможность используется в *FairRoot* для того чтобы организовать сборку установки из нескольких файлов, содержащих отдельные детекторы, и, возможно, имеющих различные форматы. При импорте GDML-файла в ROOT описание материалов берется из секции `<materials>`. При считывании в *FairRoot* из GDML-файла считываются только имена материалов, остальная информация о материалах игнорируется. Методы *ConstructGDMLGeometry* и вспомогательные *ExpandNodeForGDML*, *ReAssignMediaId* и *AssignMediumAtImport* были написаны нами так, что вся информация о материале подгружается из внешней базы. Тем не менее, для того чтобы GDML-файл считался корректным, при экспорте файла из “Builder” мы используем минимальное формально необходимое описание материала.

Для работы с форматом GDML в ROOT должна быть скомпилирована соответствующая динамическая библиотека. Эта опция может быть активирована флагом `gdml` при компиляции ROOT, управляемой пакетом *FairSoft*. Поддержка GDML по умолчанию была активирована в *FairSoft* по нашему запросу.

Для геометрии, импортируемой из GDML, добавлена возможность позиционировать детектор непосредственно в макросе путём указания координат смещения и углов поворота. Данные параметры необязательны — в случае их отсутствия детектор позиционируется по умолчанию. Для каждого элемента установки необходимо указать такие значения по умолчанию в заголовочном файле соответствующего класса. Такая возможность позволяет продвинутому пользователю оперативно менять установку, а наличие значений по умолчанию ограждает неопытных пользователей от ошибок.

Для удобства работы было решено хранить в репозитории как исходный GDML-файл детектора, так и ROOT-файл, полученный в результате процедуры импорта GDML и экспорта в ROOT.

При желании можно реализовать поддержку передачи цвета объёма через тэг `<auxiliary>` GDML-файла путём модификации исходного кода класса *TGDMLParse* фреймворка ROOT.

2.6.8 Избранные подробности реализации “CATIA-GDML geometry builder”

Каждый макрос “Builder” — это VBA проект, который хранится в отдельном `catvba`-файле. Проект состоит из трёх разделов — элементы графического интерфейса (формы), процедурные модули и модули классов. Большинство макросов “Builder” написано в соответствии с идеологией структурного программирования, без применения классов, и разделение на модули выполнено из соображений читаемости кода. Обычно в отдельный модуль выносился

функционал, объединённый некоторой задачей. Так, например, во многих макросах имеется модуль “CommonDigitalString” для продвинутой работы со строками, модуль “Support”, в который объединены типовые процедуры типа создания осей, геометрических ограничений, формообразований позиционирования и др. В некоторых случаях естественным образом требовалось использовать классы. Так, например, был реализован класс матрицы с методами нахождения углов поворота, который использовался в «Primitive creator» и «CATIA2GDML» и более подробно описан ниже.

Переменные окружения

“Builder” использует возможности CATIA v5 по настройке окружения. Пакет поставляется с соответствующими инструкциями и папкой CATSettings, которая должна быть указана как папка с настройками при конфигурировании окружения перед началом использования пакета. В настройках окружения, помимо прочего, определены переменные окружения, значения которых активно используются из кода макропрограмм. В первую очередь необходимо задать переменную “BuilderPath”, в которой указывается путь к папке с “Builder”. Настройка окружения необходима для работы некоторых макропрограмм и пользовательских панелей инструментов “Builder” в CATIA.

Работа с матрицами позиционирования в “CATIA-GDML geometry builder”

При создании иерархии объёмов возникает необходимость задавать положение дочернего объёма в материнском, которое в GEANT/ROOT хранится в виде матрицы 4×4 . Эта матрица легко разбивается на две компоненты — сложный поворот в трёхмерном пространстве и параллельный сдвиг, выполняемый после поворотов. Есть несколько интуитивно понятных человеку способов задать поворот тела в некоторой неподвижной системе координат, которой в нашем случае является система координат материнского объёма. В соответствии со спецификацией формата GDML позиционирование дочернего объёма в материнском в “CATIA-GDML geometry builder” выполняется с помощью трёх последовательных поворотов вокруг постоянных осей Z, Y и X с последующим параллельным переносом. Три угла поворота — α вокруг Z, β вокруг Y, γ вокруг X — и три координаты сдвига — a вдоль X, b вдоль Y, c вдоль Z — однозначно задают матрицу позиционирования, которая рассчитывается как произведение

$$M_{tXYZ} = M_t \cdot M_X \cdot M_Y \cdot M_Z$$

$$M_Z = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_Y = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & -\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 \\ \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & -\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & -\cos(\beta) \cdot \sin(\gamma) & 0 \\ -\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

Следует отметить, что α , β и γ не являются углами Эйлера, которые задают повороты вокруг изменяемых осей.

При работе макропрограммы «Primitive creator» возникает следующая задача с матрицами.

Примем, что объём A_0 — объём верхнего уровня. Индекс означает номер уровня в иерархии объёмов. Допустим, что объём A_i позиционирован внутри объёма A_j , тогда $i = j + 1$. Назовём $M_{i,j}$ матрицу позиционирования, заданную тремя последовательными поворотами вокруг осей Z, Y, X на углы $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \gamma_{i,j}$ и сдвигом вдоль X, Y, Z на $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}$.

Тогда некоторый объём A_k будет иметь относительно системы координат объёма верхнего уровня матрицу $M_{k,0} = M_{k,k-1} \cdot M_{k-1,k-2} \cdot \dots \cdot M_{2,1} \cdot M_{1,0} = M_{k,k-1} \cdot \prod_{i=1}^{k-1} M_{i,i-1} = M_{k,k-1} \cdot M_{k-1,0}$.

Требуется определить позиционирование A_k внутри его материнского объёма A_{k-1} , т.е. матрицу $M_{k,k-1}$. $M_{k,0}$ строится по результатам обкликивания восьми точек. $M_{k-1,0}$ рассчитывается как произведение $\prod_{i=1}^{k-1} M_{i,i-1}$ по известным углам поворотов и величинам сдвигов.

Из определения обратной матрицы $M_{k-1,0} \cdot M_{k-1,0}^{-1} = E$, следовательно

$$M_{k,0} \cdot M_{k-1,0}^{-1} = M_{k,k-1} \cdot M_{k-1,0} \cdot M_{k-1,0}^{-1} = M_{k,k-1} \cdot E = M_{k,k-1}.$$

Обратная матрица $M_{k-1,0}^{-1}$ находится с помощью матрицы алгебраических дополнений

$$M_{k-1,0}^{-1} = \frac{\text{adj}(M_{k-1,0})}{\det(M_{k-1,0})}.$$

Определитель рассчитывается через миноры.

Для нахождения углов из матрицы преобразования примем, что элемент матрицы в i -й строке j -го столбца обозначается $m[i, j]$. Введём следующие промежуточные значения:

$$A = \frac{m[0,2]}{1-(m[0,2])^2} = \frac{\sin(\beta)}{1-\sin^2(\beta)} = \frac{\sin(\beta)}{\cos^2(\beta)}$$

$$\begin{aligned} B &= m[1,0] + A \cdot m[1,2] \cdot m[0,0] = \\ &= \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + \frac{\sin(\beta)}{\cos^2(\beta)} \cdot (-\cos(\beta) \cdot \sin(\gamma)) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \\ &= \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) - \frac{\sin(\beta) \cdot \cos^2(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha)}{\cos^2(\beta)} = \\ &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= m[2,1] + A \cdot m[2,2] \cdot m[0,1] = \\ &= \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + \frac{\sin(\beta)}{\cos^2(\beta)} \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot (-\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta)) = \\ &= \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) - \frac{\sin(\beta) \cdot \cos^2(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha)}{\cos^2(\beta)} = \\ &= \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D &= m[1,1] + A \cdot m[1,2] \cdot m[0,1] = \\ &= -\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + \frac{\sin(\beta)}{\cos^2(\beta)} \cdot (-\cos(\beta) \cdot \sin(\gamma)) \cdot (-\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta)) = \\ &= -\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + \frac{\sin(\beta) \cdot \cos^2(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha)}{\cos^2(\beta)} = \\ &= \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= m[2,0] + A \cdot m[2,2] \cdot m[0,0] = \\ &= -\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + \frac{\sin(\beta)}{\cos^2(\beta)} \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \\ &= -\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + \frac{\sin(\beta) \cdot \cos^2(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha)}{\cos^2(\beta)} = \\ &= \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) \end{aligned}$$

Из тригонометрических соотношений “синус/косинус суммы/разности” следует:

$$\begin{aligned} \sin(\alpha + \gamma) &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) = B + C = G \\ \sin(\alpha - \gamma) &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) = B - C = H \\ \sin(\gamma - \alpha) &= \sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha) - \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha) = C - B = -H \\ \cos(\alpha + \gamma) &= \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) = D - F = J \\ \cos(\alpha - \gamma) &= \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) = D + F = K \\ \cos(\gamma - \alpha) &= \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha) = D + F = K \end{aligned}$$

При этом искомые углы α и γ рассчитываются как

$$\alpha = \frac{(\alpha+\gamma)+(\alpha-\gamma)}{2}, \quad \gamma = \frac{(\alpha+\gamma)-(\alpha-\gamma)}{2}$$

Решение описанных уравнений сопряжено с такой сложностью, что при некоторых значениях углов матрицы меняют свой вид из-за того, что определённые элементы становятся равными нулю. Ниже приведены все частные случаи, которые необходимо обработать особым образом для получения решения на полном диапазоне углов.

1. $\beta = 0^\circ$ ($\beta = -360^\circ, \beta = 360^\circ$), $\cos(\beta) = 1, \sin(\beta) = 0$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & \mathbf{0} & 0 \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

2. $\beta = 180^\circ$ ($\beta = -180^\circ$), $\cos(\beta) = -1, \sin(\beta) = 0$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha) & \sin(\alpha) & \mathbf{0} & 0 \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & -\cos(\gamma) & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

Два приведённых выше случая отлавливаются по признаку $m[0, 2] = 0$.

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin(-m[0, 1]); & \cos(\alpha) = m[0, 0] \\ \beta = 0^\circ \\ \gamma = \arcsin(m[1, 2]); & \cos(\gamma) = m[2, 2] \end{cases}$$

3. $\beta = 90^\circ$ ($\beta = -270^\circ$), $\cos(\beta) = 0, \sin(\beta) = 1$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + & -\sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + & 0 & 0 \\ + \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + & \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + & 0 & 0 \\ + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & 0 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \\ G & J & 0 & 0 \\ -J & G & 0 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

Данный случай отлавливается по признаку $m[0, 2] = 1$.

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin(m[1, 0]); & \cos(\alpha) = m[1, 1] \\ \beta = 90^\circ \\ \gamma = 0^\circ \end{cases}$$

4. $\beta = 270^\circ$ ($\beta = -90^\circ$), $\cos(\beta) = 0$, $\sin(\beta) = -1$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + & \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) + & 0 & 0 \\ + \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & + \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + & -\sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) + & 0 & 0 \\ + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & + \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma) & 0 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ H & K & 0 & 0 \\ K & -H & 0 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{pmatrix}$$

Данный случай отлавливается по признаку $m[0, 2] = -1$.

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin(m[1, 0]); & \cos(\alpha) = m[1, 1] \\ \beta = -90^\circ \\ \gamma = 0^\circ \end{cases}$$

5. $\alpha = 90^\circ$ ($\alpha = -270^\circ$), $\cos(\alpha) = 0$, $\sin(\alpha) = 1$

$$M_{tXYZ} = \begin{pmatrix} 0 & -\cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 \\ \cos(\gamma) & -\sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) & -\cos(\beta) \cdot \sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) & \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Данный случай отлавливается по признаку $m[0, 0] = 0$.

$$\begin{cases} \alpha = 90^\circ \\ \beta = \arcsin(m[0, 2]); & \cos(\beta) = -m[0, 1] \\ \gamma = \arcsin(m[2, 0]); & \cos(\gamma) = m[1, 0] \end{cases}$$

При условии, что известно значение $x = \sin(\alpha)$, а функция $f(x) = \arcsin(x) = \arctg(\frac{x}{\sqrt{1-x^2}})$ возвращает угол в диапазоне $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ значение некоторого угла α определяется одновременно по $\sin(\alpha)$ и $\cos(\alpha)$, см. табл. 2.1.

Таблица 2.1: Формулы для однозначного нахождения некоторого угла α на полном диапазоне по известным значениям $\sin(\alpha)$ и $\cos(\alpha)$.

$\sin(\alpha) < 0, \cos(\alpha) < 0$	$\alpha \in (-\pi; -\frac{\pi}{2})$	$\alpha = \pi - f(x)$
$\sin(\alpha) < 0, \cos(\alpha) > 0$	$\alpha \in (-\frac{\pi}{2}; 0)$	$\alpha = 2\pi + f(x)$
$\sin(\alpha) > 0, \cos(\alpha) > 0$	$\alpha \in (0; \frac{\pi}{2})$	$\alpha = f(x)$
$\sin(\alpha) > 0, \cos(\alpha) < 0$	$\alpha \in (\frac{\pi}{2}; \pi)$	$\alpha = \pi - f(x)$

Глава 3

Применение “CATIA-GDML geometry builder”

3.1 Основные сценарии работы с “CATIA-GDML geometry builder”

3.1.1 Создание МК-модели с нуля

Создание Монте-Карло геометрии состоит из следующих этапов: создание и сохранение на диск нового документа типа CATProduct; создание для каждого объема документа типа CATPart, сформированного из специального шаблона, с помощью макроса «AddNewPart»; описание форм объемов с использованием макросов «AddShape» и «Poly» и задание материалов; задание иерархии объемов, то есть вставку и позиционирование одних объемов внутри других с помощью макросов «Inserter», «ArrayMaker», «Replica», «Mover»; редактирование материалов объемов менеджером материалов «MaterialsManager»; проверка модели на наличие ошибок макросом «Checker»; экспорт во внешний GDML-файл макросом «CATIA2GDML». При необходимости используются макропрограммы «Duplicator» для создания множественных идентичных, но не связанных, параметризованных подборок и обратный конвертер «GDML2CATIA» для импорта GDML-файла.

3.1.2 Создание МК-модели на основе существующей САПР-модели

Инженерная модель может быть создана как в CATIA, так и с помощью любой другой САПР и затем передана в CATIA, например, с помощью файла STEP (см. раздел 2.2.1). Чтобы пользоваться макропрограммами “Builder”, необходимо чтобы продукт с МК-сборкой находился на верхнем уровне, поэтому импортированную инженерную модель помещают в продукт с МК-моделью, одновременно удобно позиционируя относительно СК МК-модели, см. рис. 3.1. Перед экспортом МК-модели в GDML необходимо удалить компонент с САПР-моделью, т.к. конвертер «CATIA2GDML» не сможет определить, что этот компонент не является частью описания МК-модели и должен быть проигнорирован. Анализируя САПР-модель и имея представление о принципах работы и функциональном членении системы, пользователь определяет желаемую иерархию создаваемой МС-модели и то, какими формами будут описаны те или иные элементы установки. Далее пользователь строит МК-модель, опираясь на САПР-модель и применяя, помимо инструментов, упомянутых в предыдущем разделе, макропрограммы «PointToPointAligner» и «Measure».

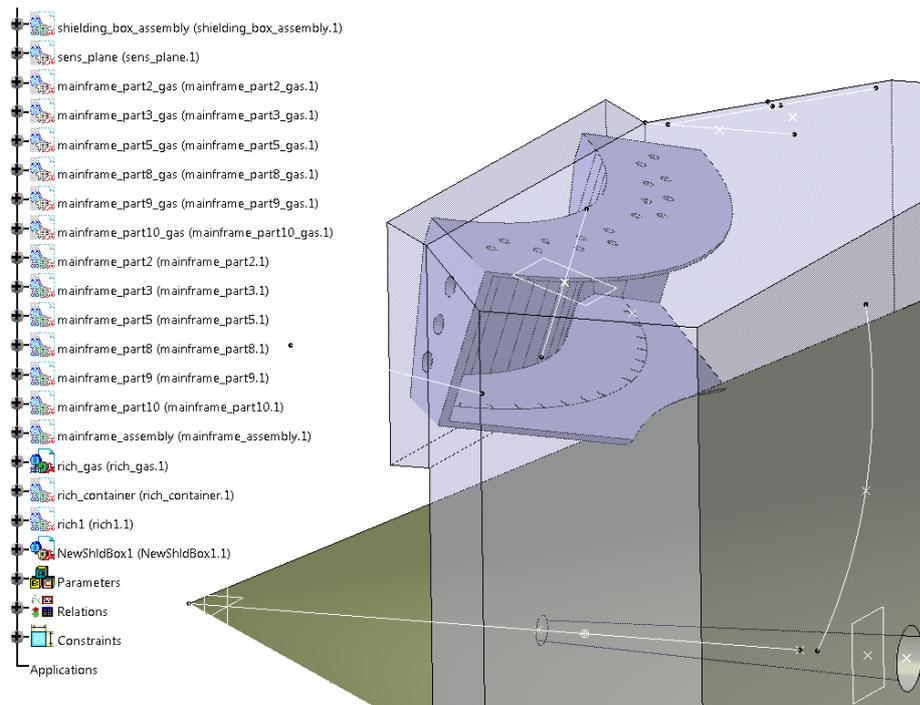


Рис. 3.1: Модель, импортированная из обменного файла STEP, в составе продукта с МК-моделью, позиционированная для выполнения построения форм объёмов.

3.1.3 Создание МК-модели на основе существующей МК-модели

“Обратный” конвертер «GDML2CATIA» позволяет импортировать в CATIA ранее созданную МК-модель, записанную в GDML-файл, например средствами GEANT или ROOT.

Сначала создаётся новый документ типа CATProduct, затем запускается макропрограмма «GDML2CATIA», где выбирается входной GDML-файл и запускается импорт. Данную процедуру рекомендуется выполнять в новой сессии CATIA, т.к. CATIA иногда хранит в фоновом режиме информацию о ранее открытых документах, а это может приводить к коллизии имён и, следовательно, некорректному результату. Полученное таким образом представление МК-модели в CATIA используется, как правило, одним из трёх способов: составление технического задания на эскизное проектирование установки по завершении проверки концепции в простом МК-моделировании; составление более сложной МК-модели имеющей аналогичную структуру и габариты, но учитывающую значительно большее количество подробностей; валидация МК-модели путем сравнения ее с САПР моделями реализованных устройств.

3.1.4 Поддержка МК-модели с помощью “Builder” на протяжении процесса проектирования детектора

МК-модели детекторов используются для решения следующих основных задач: быстрая проверка реалистичности изучения того или иного физического процесса; точное исследование эффективностей и фонов; разработка и отладка алгоритмов реконструкции частиц; оптимизация конструкции и компоновки детектора. Для каждой из этих задач служит свой вариант геометрической модели, причём варианты отличаются как по подробности описания, так и по способу хранения геометрической информации. Все задачи, кроме последней, не нуждаются в гибкости, предоставляемой параметризованной моделью, поэтому на каждом этапе разработки экспериментальной установки имеются рабочие версии геометрии с высоким и

низким уровнем детализации, используемые для подробного и быстрого моделирования соответственно. Эти рабочие версии генерируются из параметризованного описания при определенных значениях параметров и хранятся в формате ROOT. Для решения задач, связанных с конструкцией детектора, когда требуется варьировать параметры, целесообразно загружать в пакет моделирования геометрию непосредственно из параметризованного GDML-файла.

Экспериментальная установка, как правило, обладает различными симметриями, характеризующими расположение аналогичных объектов в пространстве. Использование симметрий при построении даже подробных геометрических моделей позволяет значительно экономить усилия. Тем не менее, на каком-то этапе работы, возникают задачи, требующие учета неидеальности позиционирования элементов. Тогда приходится строить новую модель, в которой вместо создания массивов различных типов используется независимое позиционирование элементов.

Поскольку инженерный проект изменяется в процессе разработки, необходимо постоянно поддерживать соответствие МК-модели и САПР-модели. В процессе проектирования можно выделить два вида изменений — радикальные перемены в структуре и уточнение существующих узлов. В первом случае бывает удобно с нуля перестроить МК-модель, может быть используя некоторые созданные ранее под сборки. Тогда достаточно выделить повторно используемые файлы, описывающие некоторые объёмы, и вставить их в качестве компонентов в головной документ типа CATProduct разрабатываемой новой геометрии. Если между документами существовала связь типа дочерний-материнский, то она нарушится, т.к. изменится контекст. Для восстановления достаточно выполнить операцию автоматического переопределения связей с помощью операции `define contextual links`.

3.2 Применение “CATIA-GDML geometry builder” к СВМ RICH

Материалы данного раздела основываются на работах [35, 64, 65, 66].

Самая сложная и гибкая МК-модель, построенная с помощью “Builder”, это модель СВМ RICH, предназначенная для использования в пакете CbmRoot. Модель имеет многоуровневую структуру, обоснованную как физической структурой сборки, так и стремлением к повышению эффективности проведения частиц [67]. По мере развития геометрии необходимые изменения вносились и в CbmRoot [68].

В детекторе RICH можно выделить несколько подсистем — зеркала, система опор зеркал, фоточувствительная камера, магнитный экран вокруг камеры, часть ионопровода в RICH, корпус детектора. Несмотря на то, что некоторые из этих систем пассивные, они всё же оказывают влияние на эффективность детектора, т.к. частицы взаимодействуют с их материалом и в результате могут изменить направление и импульс, поглотиться или произвести вторичные. Рассмотрим эволюцию каждой подсистемы в МК-модели, построенной с помощью “CATIA-GDML geometry builder”.

3.2.1 Фокусирующая система — сферические зеркала

Особенности конструкции сферических зеркал обсуждены в разделе 1.2.2.

Форма сферических зеркал в целом

Изначально рассматривался вариант, в котором каждое из двух зеркал симметрично относительно плоскости, проходящей через центр соответствующей сферы. Для того, чтобы сфокусировать кольца на чувствительной поверхности, находящейся вне геометрического аксептанса детектора СВМ RICH, необходимо было поворачивать каждое зеркало относительно

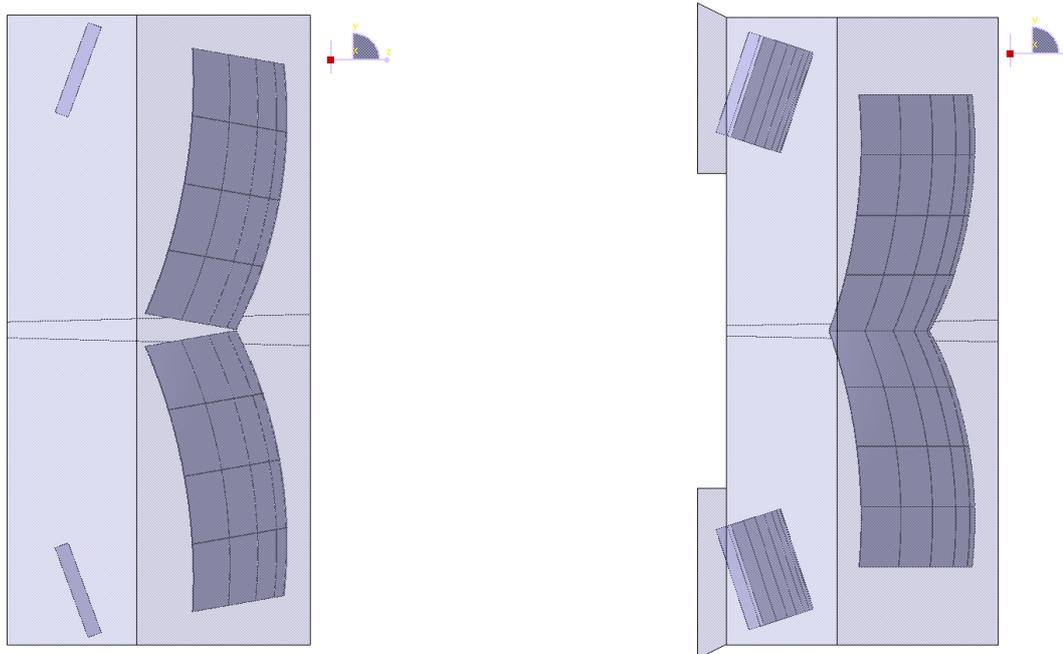


Рис. 3.2: Модель со старыми зеркалами (слева) и модель с новыми зеркалами (справа). В обоих случаях линия, соединяющая центр сферической поверхности и середину зеркала, наклонена на 10° относительно горизонтали. Отсутствие зазора в новой версии достигается выбором более правильной доли сферы.

горизонтальной оси, лежащей перпендикулярно оси пучка. Такая компоновка показана на рис. 3.2 слева. Недостатком этого решения является зазор между верхним и нижним зеркалами, который приводит к потере значительного количества частиц, летящих в горизонтальной плоскости.

По нашему предложению осуществлён переход от формы зеркал, симметричной относительно горизонтальной плоскости, к особой форме, позволяющей стыковать два зеркала практически без зазора (см. рис. 3.2). Новые зеркала не требуют поворота, т.к. они имеют форму соответствующего сегмента сферы. Однако это приводит к необходимости иметь не 2, а 4 типоразмера сегментов зеркал и немного усложняет их изготовление. Такая модификация позволяет увеличить геометрическую эффективность на несколько процентов в зависимости от углового распределения регистрируемых частиц.

Модели сегментированного зеркала

Первая из реализованных моделей сегментированных зеркал использовала последовательно две осевые симметрии при организации множественных вхождений одинаковых элементов.

Примитив сегмент шара (sphere) в наиболее общем виде имеет 6 граней — внешнюю и внутреннюю сферические поверхности, две плоскости (проходящие через ось Z примитива) и две конические поверхности (имеющие вершины в начале системы координат примитива). Для этого примитива допускается реплика только в направлении ϕ , т.е. сегмент шара разрезается плоскостями, проходящими через ось Z примитива. В результате такого деления сегмент шара разбивается на более мелкие сегменты, стыкующиеся по плоскостям.

Дальнейшее объяснение удобно вести, предполагая, что ось Z вертикальна.

Контейнер для одной вертикальной полосы *RICH_mirror_and_support_belt_strip*, также называемый долькой, имеет форму сегмента шара. Сборка опорной структуры для одного сегмента зеркала, выполненная с помощью *assembly-volume sup_element*, многократно вставляется в *RICH_mirror_and_support_belt_strip* с помощью кругового массива вокруг

горизонтальной оси, перпендикулярной вертикальной плоскости симметрии сегмента шара контейнера (см. рис. 3.3). Здесь возможны варианты, но если задать форму контейнера так, чтобы плоскость симметрии проходила через ось X (это будет означать, что параметр примитива $\phi_{start} = -\Delta\phi/2$), т.е. совпадала с плоскостью ZX в системе координат примитива, то осью массива будет ось Y .

Сегменты зеркал, являющиеся дочерними объёмами в контейнере дольки, на одном уровне с массивом опорных структур, имеют центр в начале координат сферы контейнера и стыкуются по коническим поверхностям (возможно с зазором). Зеркало формируется из долек путём реплицирования последних вокруг оси Z внутри *RICH_mirror_replica*. Полная модель зеркала состояла в этом случае из двух реплик по четыре дольки в каждой и укороченной дольки, оставляющей место под трубу, которая была расположена посередине, см. рис. 3.4. Последним этапом необходимо поместить всё зеркало в объём газа-радиатора, причём ось Z в этой системе — горизонтальная ось пучка. Для этого при позиционировании необходимо выполнить два последовательных поворота на 90° — вокруг оси Z и затем вокруг оси X — так, чтобы ось Z примитива совпадала с осью Y глобальной системы координат, а ось X примитива — с осью Z глобальной системы координат.

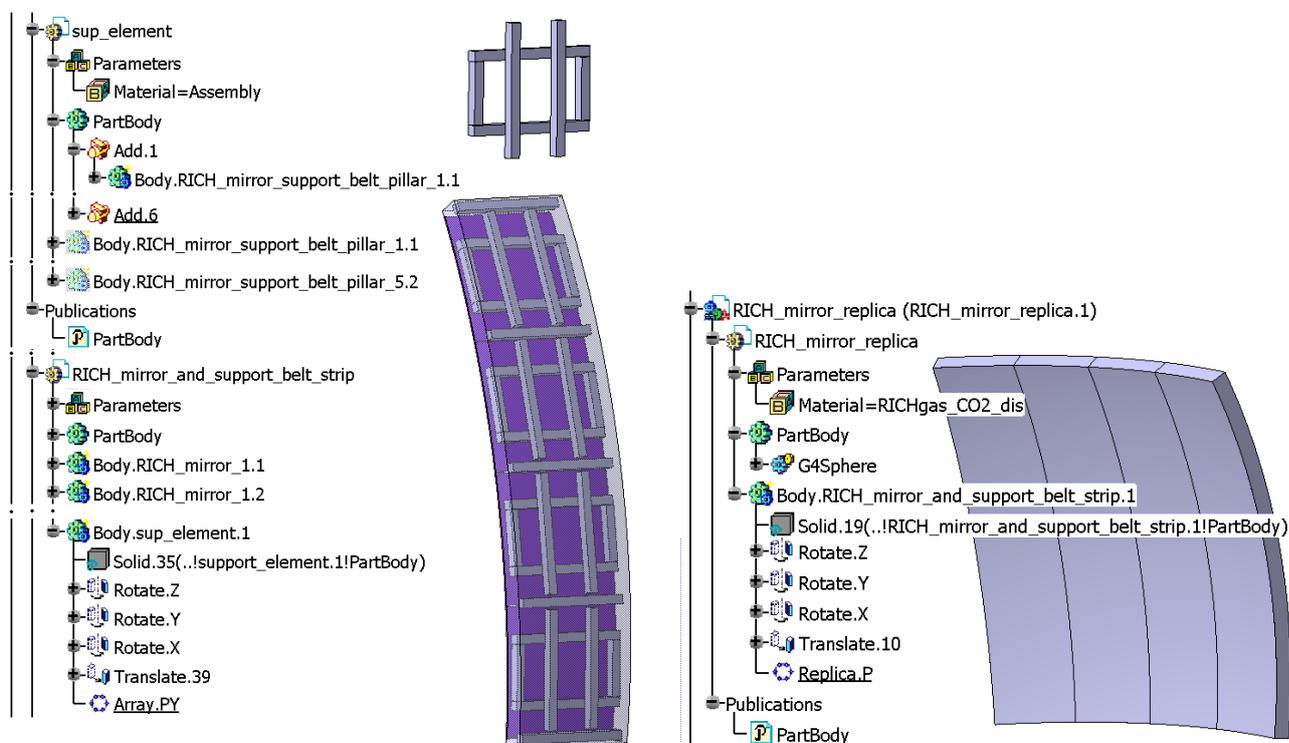


Рис. 3.3: Слева — контейнер со вставленными в него сегментами зеркал и массивом опор; справа — реплика из 4-х контейнеров, составляющая часть зеркала.

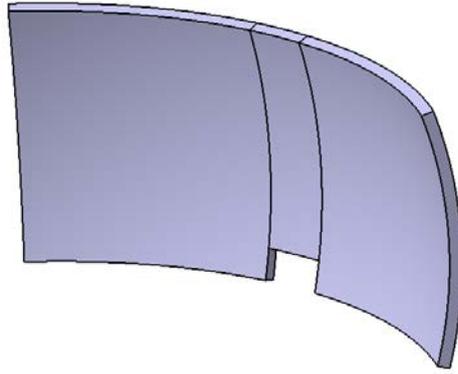


Рис. 3.4: Устройство МК-модели одного зеркала в случае применения реплики.

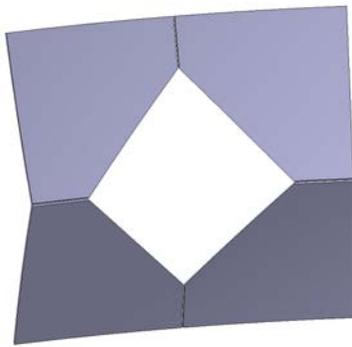


Рис. 3.5: Особые сегменты зеркал (тип 4 и тип 5), имеющие вырез для ионопровода.

В последней полосе, наиболее близкой к пучку, не было возможности также использовать деление объёма из-за наличия прорези для пучковой трубы. Это привело к тому, что помимо четвёртого типа сегментов зеркал, было введено два дополнительных типа сегментов зеркал, имеющих симметричную форму (см. рис. 3.5). При таком описании между сегментами зеркал отсутствуют зазоры. Они не были реализованы, т.к. на том этапе эта подробность не имела значения, однако присутствовала возможность легко их добавить введя один дополнительный уровень вложенности. Данная версия геометрии длительное время использовалась в качестве основной.

Модель с индивидуальными отклонениями сегментов зеркал

Материалы данного раздела основываются на работе [35].

Для отладки методов калибровки положения зеркал необходимо выполнять моделирование с геометрией, имеющей отклонения сегментов зеркал, заданные определённым образом. В технике CLAM (см. раздел 1.2.1) предполагается, что отклонение каждого сегмента может быть получено в результате двух вращений относительно фиксированных осей с началом координат в середине сегмента сферы. Обратим внимание, что форма примитива *sphere* имеет начало координат в центре сферической поверхности, а не в середине сегмента. По этой причине по умолчанию повороты выполняются относительно осей, расположенных далеко от сегмента.

Введём для каждого сегмента зеркала центр в точке на внутренней сферической поверхности и локальную систему координат с осями \vec{a} , \vec{b} и \vec{n} . Ось \vec{n} — это нормаль к сферической поверхности, направленная от центра сферы. Оси \vec{a} , \vec{b} и \vec{n} образуют правую тройку координат, как и стандартные оси X , Y , Z . После выполнения позиционирования сегмента так, чтобы ось \vec{n} была направлена вдоль оси Z экспериментальной установки, ось \vec{a} совпадёт с осью X , а ось \vec{b} — с Y . Тогда вращение должно осуществляться последовательно вокруг \vec{b} (Y) и \vec{a} (X).

Для того, чтобы это было возможно в разработанной МК-модели SVM RICH потребовалось ввести два промежуточных уровня вложенности — один для каждого типа зеркал и ещё один для каждого сегмента. Первый промежуточный уровень вложенности переносит

центр сегмента в начало координат. Второй обеспечивает вращение вокруг оси \vec{b} (Y). При позиционировании в газ вводится отклонение вокруг второй оси \vec{r} (X).

Одна из задач, которую приходится решать с описываемой геометрией — выполнять многократно моделирование прохождения частиц с разными значениями отклонения сегментов зеркал. Это означает, что пользователь должен иметь возможность легко модифицировать геометрию. По этой причине значения отклонений каждого сегмента зеркала были вынесены в качестве параметров модели, что выглядит как список из 160 параметров в `<define>` секции GDML-файла. Имя каждого параметра построено по правилу “misalign_AXIS_A_B”, где AXIS — ось вращения — “x” либо “y”, $A \in [0, 7]$ — номер сегмента вдоль вертикального направления, а $B \in [0, 9]$ — номер сегмента вдоль горизонтального направления.

В итоге получается две модели RICH — одна для общего пользования с идеально позиционированными зеркалами и вторая — отдельно для отладки методов коррекции положения зеркал. Для того чтобы упростить поддержку модели, оба зеркала смоделированы в одной CATIA сборке, а разделение на два GDML-файла выполняется путём комментирования некоторых частей одного GDML-файла, экспортируемого из CATIA. Использование геометрии с индивидуальными отклонениями зеркал для моделирования в общей установке СВМ не рационально, т.к. в такой геометрии больше объёмов. Кроме того, в геометрии с отклонениями зеркал по запросу пользователя были выключены некоторые подробности (такие как, например, каркас детектора и опоры зеркал), т.к. они не оказывают никакого влияния на исследование CLAM, но замедляют моделирование.

3.2.2 МК-геометрия механических конструкций RICH

Несущие конструкции СВМ RICH основаны на двух рамных конструкциях, внутренняя предназначена для поддержки зеркал, а наружная поддерживает корпус и фотодетекторы. Чтобы оценить влияние материала механических конструкций на функционирование детектора необходимо максимально точно смоделировать количество материала в аксептансе [69]. Применение “CATIA-GDML geometry builder” сильно облегчает процесс моделирования пассивного материала, т.к. стандартными средствами CATIA можно измерить объём или площадь сечения детали сложной формы, чтобы затем использовать это значение для расчёта формы упрощённой детали.

На рис. 3.6 показана модель рамы, поддерживающей зеркала в САПР (слева) и в CbmRoot (справа).

Для построения такой модели потребовалось смоделировать балки, имеющие в сечении сложный профиль, показанный на рис. 3.7 (слева). Удобно заменить такой профиль прямоугольным кольцом с совпадающими внешними размерами и площадью сечения, см рис. 3.7 (справа). Упрощённую таким образом балку можно смоделировать с помощью двух вложенных объёмов, имеющих форму trap. Более крупный объём выполнен из металла, а дочерний — из материала окружающей среды (в случае СВМ RICH — газ-радиатор). Для автоматизации расчётов параметров внутреннего трапецоида был разработан документ, называемый Hollow_trap_template.CATPart. В модели используется множество балок, имеющих разные размеры и ориентацию в пространстве. Для автоматизации построения таких балок путем обкликивания 8-ми вершин на полученной от конструкторов САПР-модели был разработан инструмент «TrapCreator», ставший прототипом более общего инструмента «PrimitiveCreator».

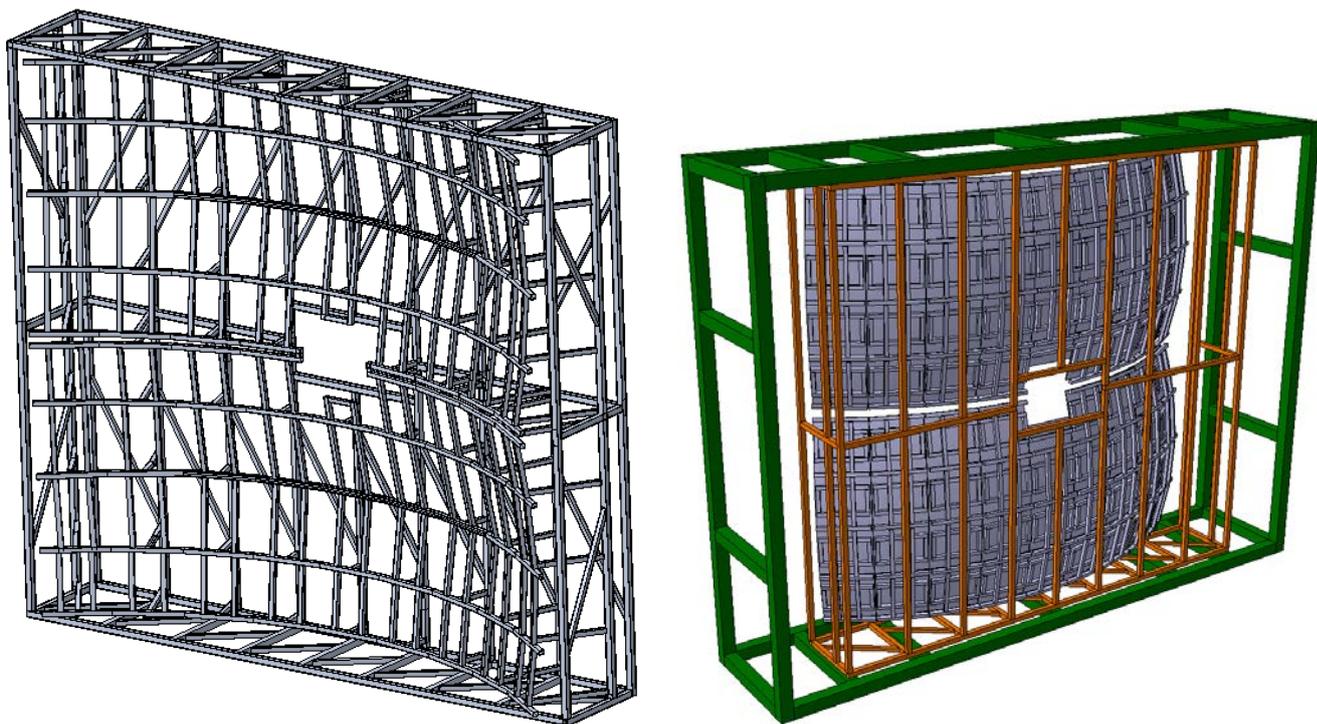


Рис. 3.6: Модель опор зеркал в САПР CATIA V5 (слева) и в CbmRoot (справа).

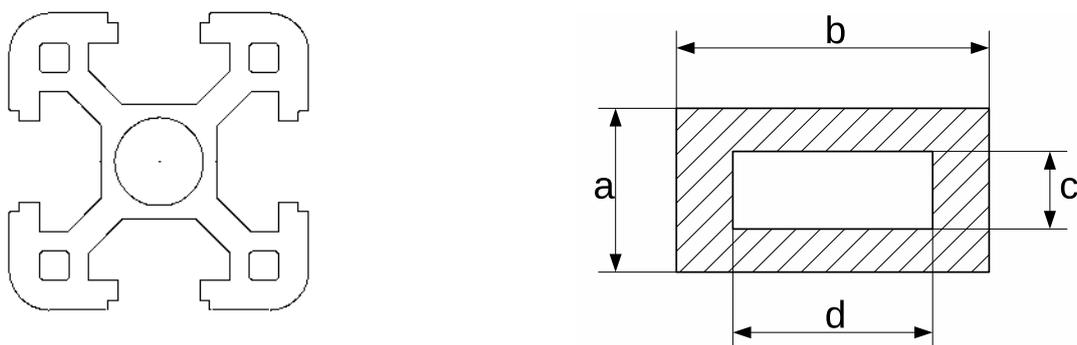


Рис. 3.7: Исходный профиль балки механических конструкций СВМ RICH в САПР-модели (слева) и итоговый профиль в МК-модели.

Наружная рама СВМ RICH была построена с использованием описанных выше инструментов. На рис. 3.8 приведена модель каркаса детектора в МК-формате в CATIA. Одинаковые балки моделируются одним объёмом, который многократно вставляется в контейнер. Для того чтобы упростить позиционирование каркаса в материнском объёме, вся конструкция была собрана в двух объёмах типа Assembly, см. рис. 3.9.

Выполненные в CbmRoot расчёты показали, что внутренняя рама содержит недопустимо много материала. В результате, в МК-модели были оставлены только опорные пояса под каждым сегментом, а остальная часть внутренней рамы была изъята. При этом было сформулировано задание на проектирование новой опорной конструкции со значительно меньшим количеством материала. Данная работа находится в стадии выполнения. Ожидается создание сетевидной лёгкой конструкции, аналогичной использованной в эксперименте COMPASS.

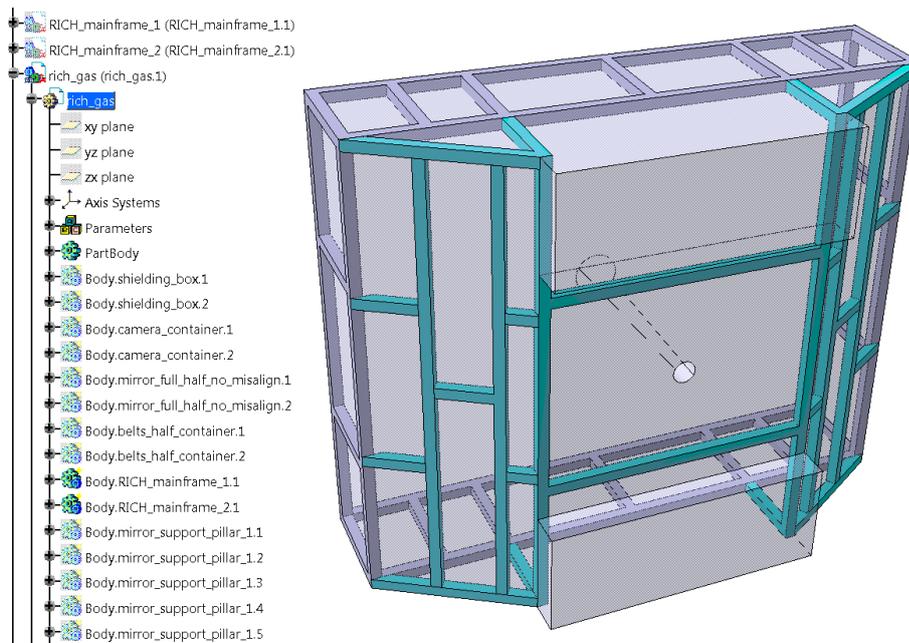


Рис. 3.8: МК-модель каркаса детектора СВМ RICH в материнском объёме в CATIA.

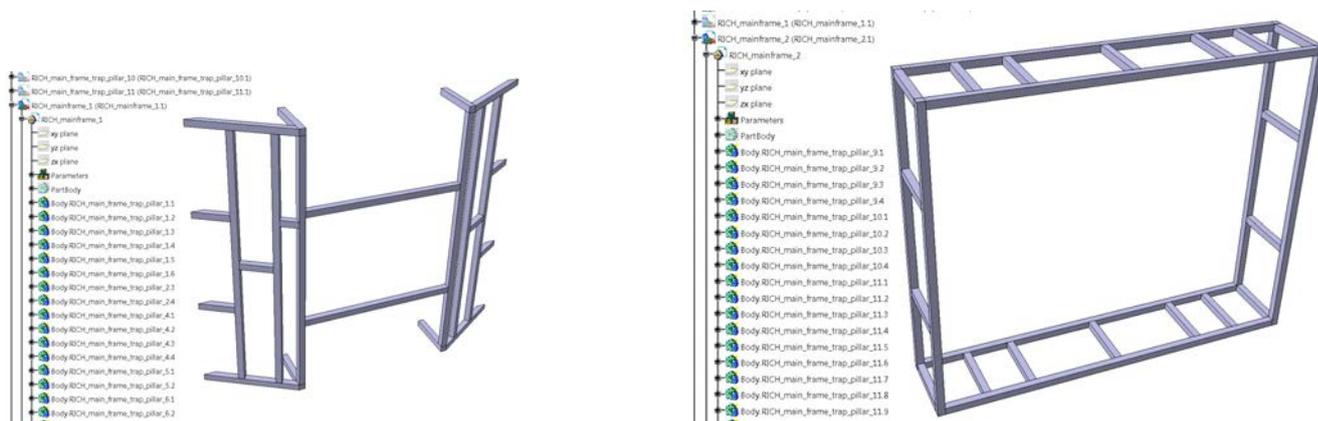


Рис. 3.9: МК-модель двух частей каркаса детектора СВМ RICH в CATIA.

3.2.3 Фоточувствительная камера

Представление о формировании изображения колец в фокальной плоскости сферического зеркала корректно только в случае, если размер зеркала много меньше его радиуса кривизны. В случае СВМ RICH это условие нарушено. Изображения колец формируются на фокальной поверхности, имеющей форму сферы, причём чем ближе траектория регистрируемой частицы к радиусу кривизны зеркала, тем лучше условия фокусировки. В СВМ RICH поверхность фоточувствительной камеры так или иначе приближается к фокальной поверхности.

Ниже обсуждены две изученные версии компоновки фоточувствительной камеры. Поиск оптимального решения определяется балансом двух факторов. С одной стороны, чем ближе форма поверхности камеры аппроксимирует форму фокальной поверхности, тем лучше фокусируются кольца. С другой стороны, для минимизации нечувствительной доли площади МА ФЭУ необходимо размещать на плоскости, а не на выпуклой поверхности.

Модель с примитивным фотодетектором

Первоначально использовался вариант модели, в котором фоточувствительная камера была выполнена из четырёх тонких пластин из активного материала, причём размер этих пластин был выбран так, чтобы полностью покрывать аксептанс, не учитывая какие-либо ограничения. На рис. 3.10 показана часть модели СВМ RICH с примитивным фотодетектором. С помощью этой модели было выполнено большое количество концептуальных исследований, не учитывающих особенности работы реального фотодетектора, но, тем не менее, позволяющих получить оценки физических параметров.

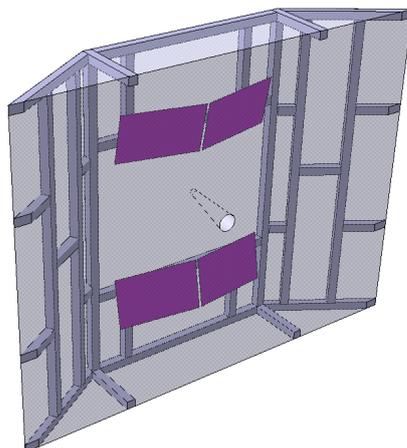


Рис. 3.10: Часть одной из наиболее ранних МК-моделей СВМ RICH, в которой фотодетектор был представлен тонкими чувствительными боксами.

Модели с подробной реализацией фотодетектора

По мере того как выяснялись подробности реализации фотодетекторов, возникла необходимость в построении более реалистичной модели [70]. Было решено, что в основе детектирующей системы RICH будет лежать МА ФЭУ Н12700. Его чертёж показан на рис. 3.11. Один такой МА ФЭУ имеет габариты 52×52 мм². Для гарантированной возможности сборки при монтаже необходимо оставлять зазор 1 мм между МА ФЭУ. Планируется, что фоточувствительная камера СВМ RICH будет составлена из модулей, содержащих 2×3 МА ФЭУ, см. рис. 3.12. Таким образом, размер модуля составляет $158 \text{ мм} \times 105 \text{ мм}$.

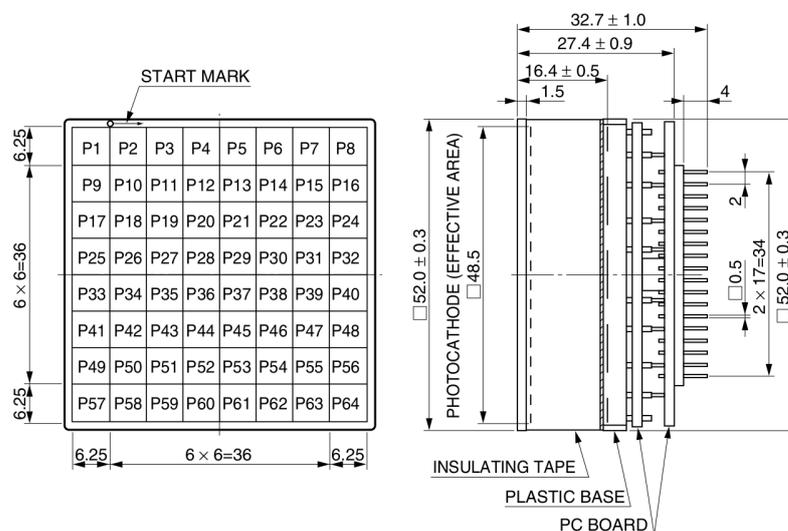


Рис. 3.11: Чертёж МА ФЭУ Н12700 из документации [71].

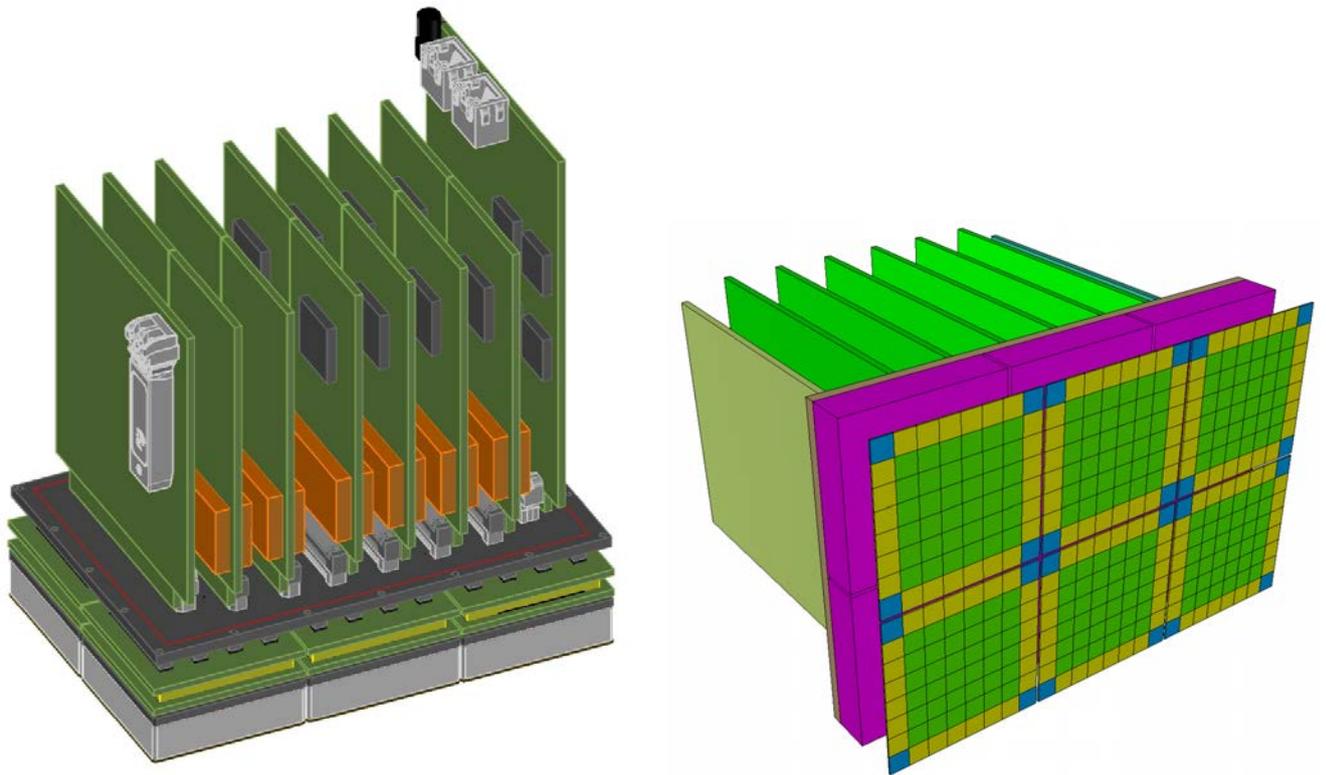


Рис. 3.12: САПР-модель (слева) и МК-модель (справа) модуля фоточувствительной камеры CBM RICH.

Иерархия объёмов, моделирующих модуль фоточувствительной камеры CBM RICH, приведена на рис. 3.13.

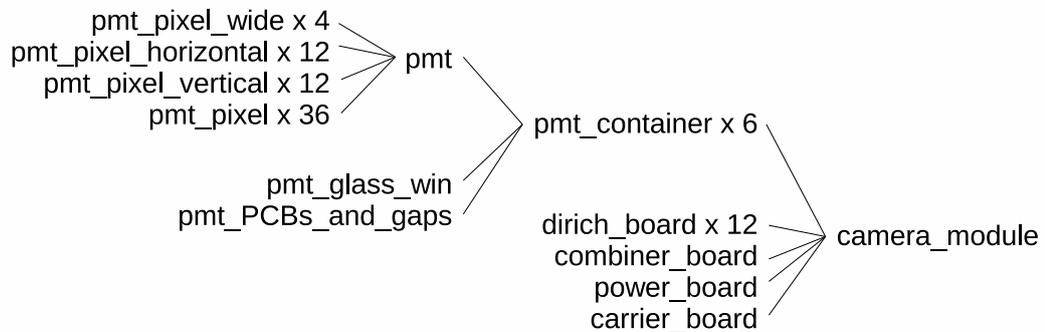


Рис. 3.13: Иерархия объёмов, моделирующих модуль фоточувствительной камеры CBM RICH.

МА ФЭУ моделируется до уровня пикселей. Это позволяет максимально приблизить моделирование прохождения частиц в CbmRoot и обработку реальных данных. В соответствии с документацией, у МА ФЭУ H12700 пиксели имеют разные размеры (см. рис. 3.11): угловые пиксели (№№ 1, 8, 57, 64) $6.25\text{мм} \times 6.25\text{мм}$, пиксели по краям, кроме угловых, — $6.25\text{мм} \times 6\text{мм}$, остальные, центральные пиксели — $6\text{мм} \times 6\text{мм}$. Для того, чтобы представить три типа пикселей в МК-модели, необходимо три отдельных объёма, имеющих разную форму. Чтобы сделать модель максимально понятной и гибкой принято решение отделить пиксели из крайних горизонтальных рядов от пикселей из крайних вертикальных рядов и моделировать их с помощью двух разных объёмов размером $6\text{мм} \times 6.25\text{мм}$ и $6.25\text{мм} \times 6\text{мм}$ соответственно. Это позволит позиционировать все пиксели без поворотов.

Таким образом, вводится 4 объёма:

- *pmt_pixel_wide* для угловых пикселей,
- *pmt_pixel_horizontal* для пикселей в крайних горизонтальных рядах,
- *pmt_pixel_vertical* для пикселей в крайних вертикальных рядах и
- *pmt_pixel* для всех остальных пикселей, расположенных в центральной зоне.

Все 4 объёма имеют форму примитива *box* с толщиной вдоль оси *Z*, равной 0.5 мм, материал *CsI*, который в данный момент используется в моделировании как активный материал для фоточувствительных элементов. Толщина выбрана произвольно, она не имеет значения, т.к. из-за того, что материал объёма активный, т.е. объём объявлен чувствительным, система проведения частиц будет вырабатывать сигнал о пересечении треком границы объёма и передавать управление методу *ProcessHits* класса детектора *CbmRich*. В реализации этого метода вырабатывается *point*, причём физика не оказывает никакого влияния.

Объём *pmt* соответствует части МА ФЭУ, включающей в себя фотокатод (пиксели) и динодную систему, и имеет толщину $16.4 - 1.5 = 14.9$ мм. Входное стеклянное окно МА ФЭУ моделируется отдельным объёмом *pmt_glass_win*, имеющим толщину 1.5 мм. Пространство за динодной системой, включающее в себя печатные платы и ножки в воздушном пространстве, моделируется объёмом *pmt_PCBs_and_gaps*. Все части МА ФЭУ, моделируемые перечисленными объёмами, вставляются в контейнер *pmt_container*.

Платы передней электроники, питания, концентрации данных и плата-адаптер моделируются объёмами, имеющими форму *box* и одинаковый материал, — *dirich_board*, *power_board*, *combiner_board*, и *carrier_board* соответственно. Объём *camera_module* выполняет роль контейнера, в который помещаются МА ФЭУ и платы. Далее составляется вертикальный массив из 7 модулей, называемый *camera_strip*.

В процессе разработки детектора сначала рассматривался вариант фоточувствительной камеры, состоящей из 4 плоскостей, расположенных симметрично относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей, проходящих через ось пучка. Исследовались разные варианты комбинаций размера, поворотов и положения четверти с целью нахождения оптимальных значений с точки зрения эффективности всего детектора. Одна итерация такой оптимизации заключается в запуске полного моделирования и анализа и является достаточно время-затратной процедурой.

В настоящее время прорабатывается вариант, в котором верхняя и нижняя половины фоточувствительной камеры составлены из сегментов шириной в один модуль и аппроксимирующих поверхность цилиндра [72]. Радиус 1650 мм, поворот 18° вокруг оси *X* и положение цилиндра также получены в результате оптимизации [73]. Модель такой камеры показана на рис. 3.14.

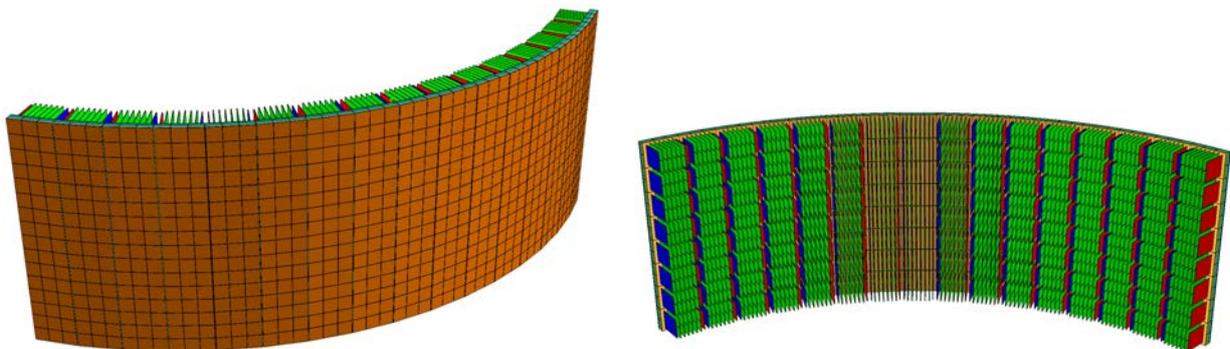


Рис. 3.14: МК-модель фоточувствительной камеры CBM RICH. На рисунке показаны платы электроники, но не показаны отдельные пиксели МА ФЭУ.

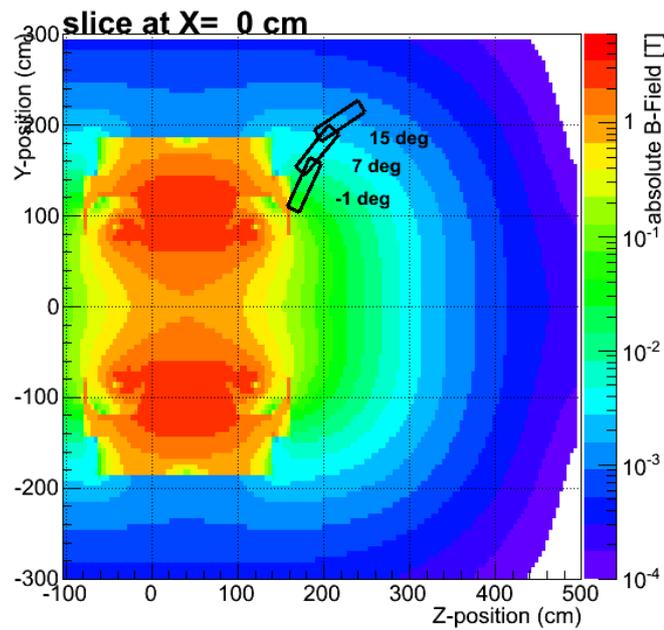


Рис. 3.15: Варианты расположения фоточувствительной камеры CBM RICH в магнитном поле в зависимости от угла наклона фокусирующих зеркал [74].

3.2.4 Магнитный экран

В CBM детектор RICH расположен непосредственно за дипольным магнитом, причём отражённые от сферических зеркал черенковские фотоны летят в направлении, противоположном пучку. В результате, фотодетекторы оказываются в области паразитного магнитного поля.

Моделирование распределения магнитного поля, созданного дипольным магнитом, с помощью пакета OPERA3d/TOSCA (см. рис. 3.15) показало, что фоточувствительная камера может быть расположена в области, где паразитное поле составляет 10–100 мТл. Измерения показали, что для планируемой к использованию модели МА ФЭУ эффективность регистрации одиночных фотонов значительно падает, если поле превышает уровень 1–2 мТл. Таким образом, магнитное поле в области фотосенсоров должно быть опущено до допустимого уровня.

Дальнейшее увеличение угла наклона зеркал позволило бы вывести фотодетектор далее вверх из области магнитного поля, но это приводит к снижению эффективности регистрации. Поэтому необходимо использовать магнитный экран.

Отметим характерный выступ в нижней части экрана, необходимый для концентрации линий магнитного поля. Протяжённость этого выступа ограничена двумя требованиями. Он не должен попадать в аксептанс детектора и не должен стоять на пути фотонов, отражённых от зеркал. В экране присутствуют отверстия необходимые для отвода кабелей и для обеспечения охлаждения. Моделирование в OPERA3d/TOSCA показало, что магнитный экран, изготовленный из магнитно-мягкого железа должен иметь нижнюю и заднюю (ближние к магниту) стенки толщиной 30 мм, а остальные — толщиной 10 мм. При этом масса каждого из двух экранов получилась равна 850 кг. Разработка магнитного экрана для цилиндрической камеры, которая была признана оптимальной, ведётся во время написания данной работы.

На рис. 3.16 показан чертёж первого рассчитанного магнитного экрана для плоского варианта камеры [75]. Для обеспечения высокого потока линий магнитного поля у магнитного экрана со стороны пучка предусмотрено утолщение. Геометрически оно ограничено аксептансом, а со стороны здравого смысла — габаритами и массой.

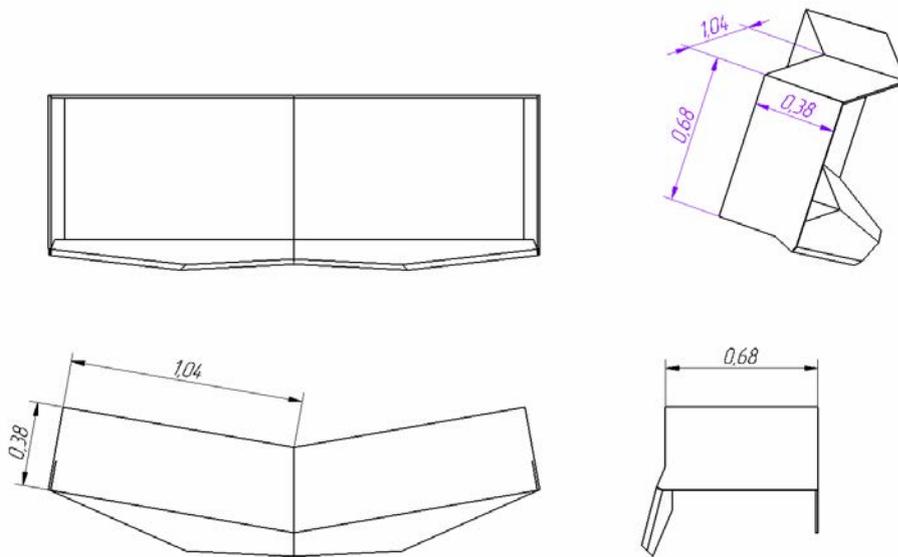


Рис. 3.16: Первый эскизный проект магнитного экрана.

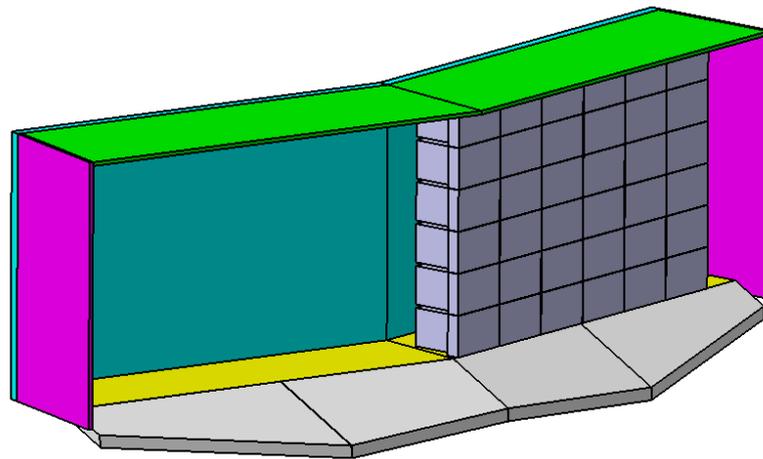


Рис. 3.17: Первая версия магнитного экрана в CbmRoot. Серым цветом показаны МА ФЭУ с платами электроники.

В первой версии МК-модели с магнитным экраном был введён дополнительный промежуточный объём, позиционированный параллельно системе координат объёма радиатора. В него были на одном уровне помещены пластины, представляющие стенки экрана и ещё два контейнера — с МА ФЭУ и электроникой (см. рис. 3.17). На момент написания работы магнитный экран выполнен как набор пластин, помещённых непосредственно в контейнер для камеры. Принципиальным отличием является то, что поворот и позиционирование экрана теперь выполняется вместе со всей камерой в системе координат объёма радиатора, в то время как в старой модели — отдельно в системе координат промежуточного контейнера.

3.2.5 Ионопровод

Пучок ионов, падающих на мишень в эксперименте СВМ, имеет расходимость в несколько миллирадиан. Только 1% налетающих ионов вступает в ядерное взаимодействие, остальные пролетают сквозь мишень, испытывая ионизационные потери и многократное рассеяние, в результате которого расходимость увеличивается.

Попадание пучковых ионов на стенки ионопровода приводит к рождению множества дельта-электронов и π -мезонов, что, в свою очередь, увеличивает фоновую засветку детек-

тора CBM RICH. Задача минимизации влияния ионопровода на характеристики детектора требует учета следующих факторов: форма трубы — конус или ступенчатый цилиндр; зависимость толщины стенки ионопровода от его диаметра (чем больше диаметр, тем толще должна быть стенка для обеспечения механической устойчивости); наличие дополнительного вещества в месте сочленения секции ионопровода, принадлежащей RICH, с секцией, находящейся в дипольном магните; поворот ионов в магнитном поле, которое в ходе эксплуатации установки может менять как величину, так и направление.

Для решения задач оптимизации ионопровода была создана описанная ниже параметризованная геометрическая модель.

RICH-секция ионопровода в МК-модели представляет собой параметризованный конус из алюминия, внутрь которого вставлен объём с материалом вакуум с меньшими радиусами. Были установлены следующие управляющие параметры: внешний радиус на входе в RICH, толщина на входе, внешний радиус на выходе из RICH, толщина на выходе и угол отклонения оси конуса относительно оси пучка. Поворот осуществляется вокруг вертикальной оси, проходящей через середину входной стенки RICH. Поворот применяется только к объёму из алюминия, в то время как вакуумный объём поворачивается вместе со своим материнским. Установленная в параметре модели толщина трубы достигается за счёт разницы радиусов конусов материнского и дочернего объёмов. Объём ионопровода позиционируется внутри объёма *rich_container* на одном уровне с объёмом газа-радиатора, входной и выходной стенок, в которых предусмотрены соответствующие вырезы, также зависящие от управляющих параметров.

Отметим, что рассмотрение возможности поворота трубы отложено до этапа обновления эксперимента при переходе на работу с синхротроном SIS300, поскольку недорогое техническое решение, позволяющее поворачивать трубу без значительного увеличения количества материала, на данный момент не просматривается.

Критерием оптимизации ионопровода является количество восстановленных электронов и позитронов, летящих под малыми углами к пучку, при условии невозрастания количества частиц, ложно идентифицированных как электроны и позитроны, найденных алгоритмами поиска колец и сопоставления треков.

Работы по оптимизации конструкции ионопровода на момент написания данной работы не завершены.

3.2.6 Анализ характеристик детектора CBM RICH

Для оценки влияния тех или иных компоновочных и конструктивных решений на характеристики детектора, был выработан стандартный набор задач моделирования и анализа.

В первой задаче детектор RICH обстреливается одним электроном в событии из точки первичного взаимодействия с импульсом и направлением из заданного диапазона в пределах акцептанса эксперимента. Анализ результатов такого моделирования позволяет оценить геометрический акцептанс детектора, выход черенковских фотонов, количество регистрируемых фотонов (хитов), параметры колец, которые в отсутствие фона можно восстановить практически абсолютно верно. К таким параметрам относятся, например, радиус кольца R при фитировании окружностью, отклонение хитов от восстановленного кольца dR , полуоси A и B при фитировании эллипсом, эллиптичность кольца B/A , количество поинтов на кольцо и количество хитов на кольцо.

Вторая задача выполняется по результатам моделирования центральных взаимодействий ионов золота с золотой мишенью. Набор продуктов взаимодействия получен с помощью генератора UrQMD [47]. Все продукты проводятся через МК-модель в CbmRoot. В этой задаче моделируются столкновения как при энергии 8 ГэВ/нуклон, характерные для SIS100, и 25 ГэВ/нуклон, характерные для SIS300. Такое моделирование позволяет оценить поведение

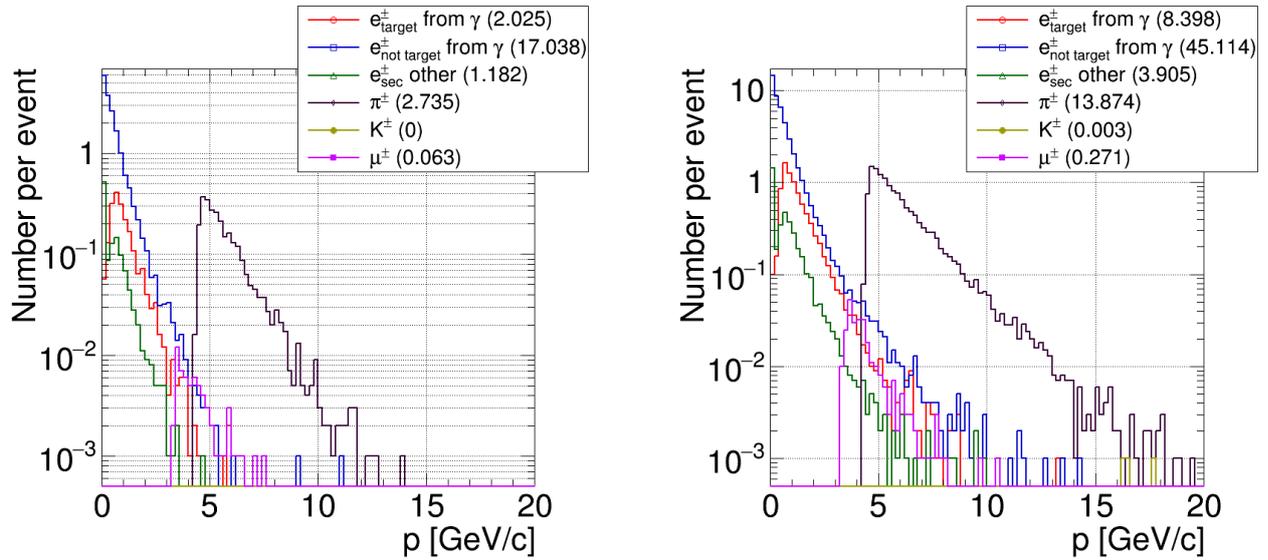


Рис. 3.18: Основные типы частиц, регистрируемые в RICH при центральном $Au + Au$ столкновении при 8 ГэВ/нуклон (слева) и 25 ГэВ/нуклон (справа). “ e_{target}^{\pm} from γ ” — e^+ или e^- от конверсии фотонов в мишени; “ $e_{not\ target}^{\pm}$ from γ ” — e^+ или e^- от конверсии фотонов не в мишени; “ e_{sec}^{\pm} other” — все остальные e^+ или e^- .

детектора при реальной загрузке, в присутствии электронов, рождённых в результате конверсии как в материале самого детектора RICH, так и в материале стоящих выше по пучку подсистем, см. табл. 3.1. Т.к. задача данного моделирования — оценить функционирование детектора в реалистичной ситуации, в геометрической установке присутствуют STS и магнит. При этом присутствует магнитное поле и выполняется полная реконструкция треков в STS. На рис. 1.18 представлено изображение на одной плоскости реконструкции от одного события $Au + Au$ при энергии 25 ГэВ/нуклон. Красные точки обозначают хиты, зелёные — пересечение с плоскостью реконструкции RICH продолжений восстановленных треков STS, отражённых от зеркала. На рис. 3.18 показаны основные типы частиц, регистрируемые в этом случае.

В третьей задаче в одном событии содержится только сигнальная пара e^+e^- .

Четвёртая, самая приближённая к реальности задача — когда к фону от генератора UrQMD в каждое событие подмешивается некоторое количество сигнальных пар e^+e^- . В CBM RICH это число обычно меньше 10, что позволяет за адекватное время моделирования набрать достаточную статистику, не искажая реалистичность.

Реконструкция колец в RICH состоит из двух этапов — поиск колец, т.е. группировка хитов, принадлежащих одному кольцу (ring finding), и фитирование, т.е. определение параметров кольца (ring fitting), причём фитирование выполняется и окружностями и эллипсами. МК-моделирование, в отличие от реального эксперимента, предоставляет полную информацию о происходящих процессах. В частности, сохраняется связь между фотонами, рождёнными от одного электрона. Это позволяет не выполнять первый этап так, как это делалось бы на реальных данных, а принять за хиты одного кольца список хитов от фотонов, рождённых от рассматриваемого электрона. При этом второй этап индифферентен к истории хитов.

Ниже представлены результаты моделирования в среде CbmRoot в связке с генератором UrQMD, выполненные группой CBM RICH с применением геометрических моделей CBM RICH, построенных с помощью “CATIA-GDML geometry builder”.

В таблицах 3.1 и 3.2 в качестве примера приведено 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 характеристики приведены для двух конфигураций пучка: SIS100 (8 ГэВ/нуклон) и SIS300 (25 ГэВ/нуклон).

На рис. 3.19 представлены распределения радиуса R подобранного кольца и полуосей A и B подобранного эллипса для двух версий геометрии. Следует отметить, что в алгоритме поиска колец значение 7 выбрано как минимально допустимое количество хитов в кольце. В случае МК-моделирования с одиночными электронами возможна ситуация, когда количество хитов в кольце меньше 7. Это означает, что такое кольцо теоретически есть, но не будет восстановлено.

Таблица 3.1: Сравнение характеристик двух версий геометрии CBM RICH — «v16» и «v17».

Характеристика, за событие	25AGeV, «v17»/«v16»	8AGeV, «v17»/«v16»
hits	1431/1336	496/469
rings (≥ 1 hit/ring)	71.6/70.1	23.0/22.9
rings (≥ 7 hits/ring)	59.6/56.7	19.9/18.9
secondary e^\pm from γ_{target}	8.4/7.7	2.0/1.9
secondary e^\pm from $\gamma_{not-target}$	45.1/45.0	17.0/17.0
pions	13.9/13.3	2.7/2.65

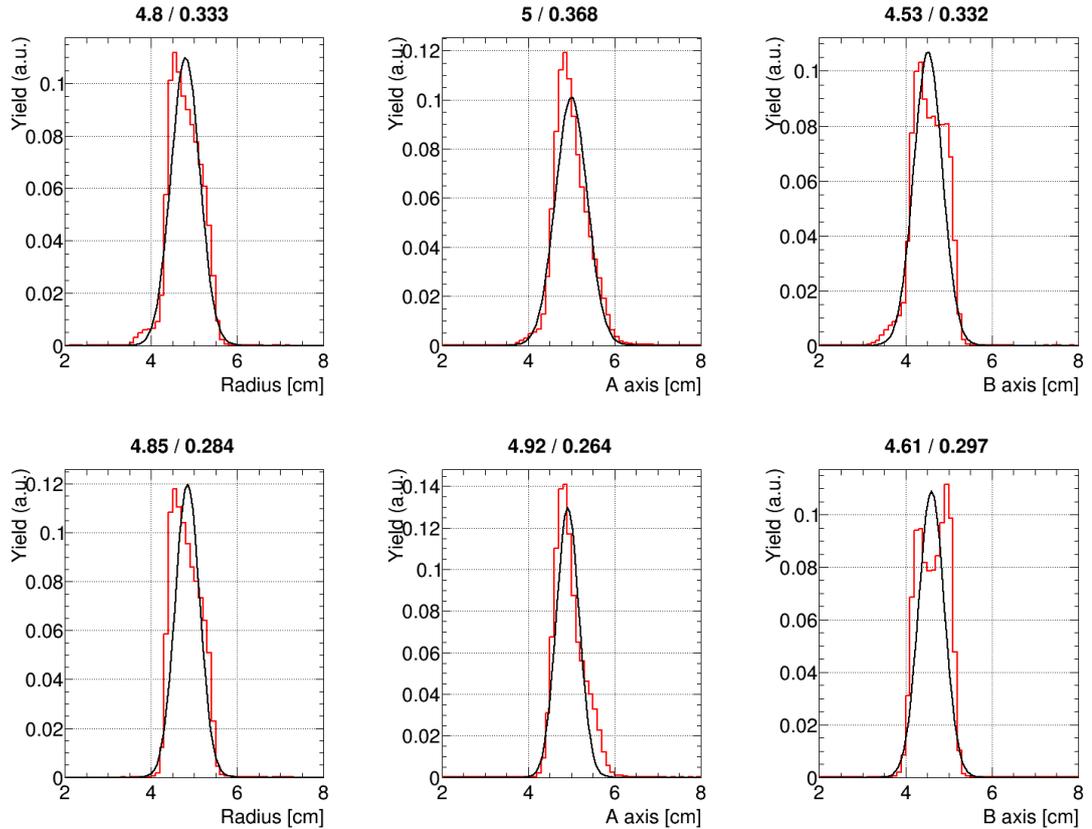


Рис. 3.19: Распределения радиусов колец при фитировании окружностью и полуосей A и B при фитировании эллипсом по результатам МК-моделирования CBM RICH версии «v16» (сверху) и «v17» (снизу). Значения в шапке — среднее значение / среднеквадратическое отклонение.

Таблица 3.2: Сравнение характеристик двух версий геометрии CBM RICH — «v16» и «v17».

Характеристика	«v16»	«v17»
Геометрический аксептанс, SIS100, %	88.9	89.9
Геометрический аксептанс, SIS300, %	81.0	82.1
Радиус кольца R , см., mean/rms	4.800/0.333	4.850/0.284
dR , см., mean/rms	0.031/0.324	0.027/0.301
Полуось эллипса A , см., mean/rms	5.000/0.368	4.920/0.264
Полуось эллипса B , см., mean/rms	4.530/0.332	4.610/0.297
Эллиптичность B/A , mean/rms	0.914/0.044	0.937/0.036
Эфф. реконстр. колец, SIS100, %	96.4	97.3
Эфф. реконстр. колец, SIS300, %	92.2	93.9
Эфф. мэтчинга трек-кольцо, SIS100, %	91.8	93.2
Эфф. мэтчинга трек-кольцо, SIS300, %	85.7	87.1
Эфф. идентиф. e^\pm , SIS100, %	83.9	85.0
Эфф. идентиф. e^\pm , SIS300, %	79.3	79.8
Фактор подавления пионов, SIS100	665.3	735.1
Фактор подавления пионов, SIS300	315.9	315.6
Расстояние трек-кольцо, первичн. e^\pm , см., mean/rms	0.365/0.511	0.319/0.456
Расстояние трек-кольцо, π^\pm , см., mean/rms	0.320/0.489	0.280/0.476

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 [72].

3.3 Применение “CATIA-GDML geometry builder” за пределами CBM RICH

Описанные в разделах 3.3.1, 3.3.2 и 3.3.3 случаи характерны тем, что было выполнено построение сложных пассивных элементов. С точки зрения моделирования прохождения частиц имеет значение только детальное описание распределения вещества вблизи обращённых к пучку граней таких элементов, поскольку оно влияет на фоновую засветку активных элементов детекторов. Тем не менее, имеются две причины для выполнения детального описания данных пассивных элементов. Во-первых, эти работы выполнялись на ранних стадиях развития “CATIA-GDML geometry builder” и послужили примерами для совершенствования инструментария и развития подходов к работе со сложной геометрией. Во-вторых, подробное описание наружных элементов оказалось востребованно научными группами, поскольку делало МК-модели установок более узнаваемыми, что позволяло обсуждать некоторые вопросы конструкции и компоновки без открытия САПР-модели. Рассмотрим далее ещё несколько примеров применения “CATIA-GDML geometry builder”.

3.3.1 Рама CBM ECAL

МК-модель рамы электромагнитного калориметра ECAL эксперимента CBM была построена на основе имеющей САПР-модели. Были проработаны две версии рамы, соответствующие двум конфигурациям калориметра — для SIS100 и SIS300. На рис. 3.20 представлена МК-модель для SIS300 в системе CbmRoot. В данной модели активно используются инструменты для множественного позиционирования объёмов *Array* и *Replica/Division*.

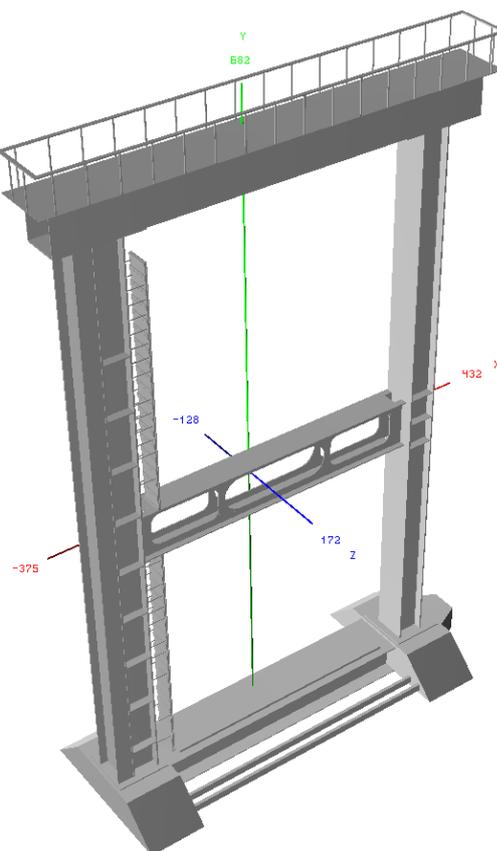


Рис. 3.20: МК-модель рамы электромагнитного калориметра ECAL эксперимента CBM.

3.3.2 Магнит CBM

В CBM рассматривались два различных проекта дипольного магнита. Каждый из проектов сначала был проработан инженерами и расчётчиками, а затем с помощью “CATIA-GDML geometry builder” были последовательно построены обе МК-модели и интегрированы в CbmRoot. В каждой модели, помимо сердечника и блоков подавления паразитного поля (field clamps), было тщательно описано распределение вещества в сверхпроводящих обмотках.

Отличительной особенностью данных МК-моделей является широкое применение разбиения одного твёрдого тела на примитивные составляющие блоки, которые позиционируются рядом на одном уровне, что позволяет избежать применения булевых операций, которые замедляют проведение частиц. Первая конструкция магнита (см. рис. 3.21 и рис. 3.22) была отброшена по причине технологической сложности. Второй проект (см. рис. 3.23) используется в CbmRoot в настоящее время, однако в связи с изменением ответственного за его изготовление института, ожидается некоторое изменение конструкции.

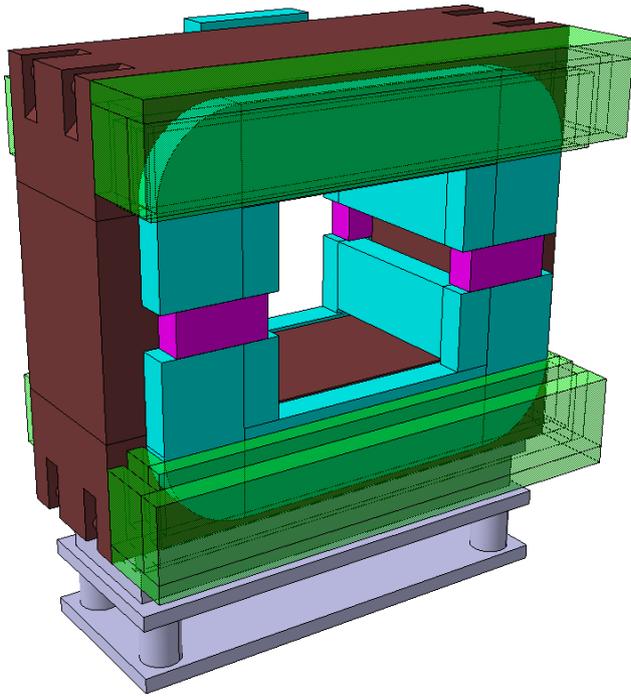


Рис. 3.21: МК-модель ранней версии дипольного магнита эксперимента CBM.

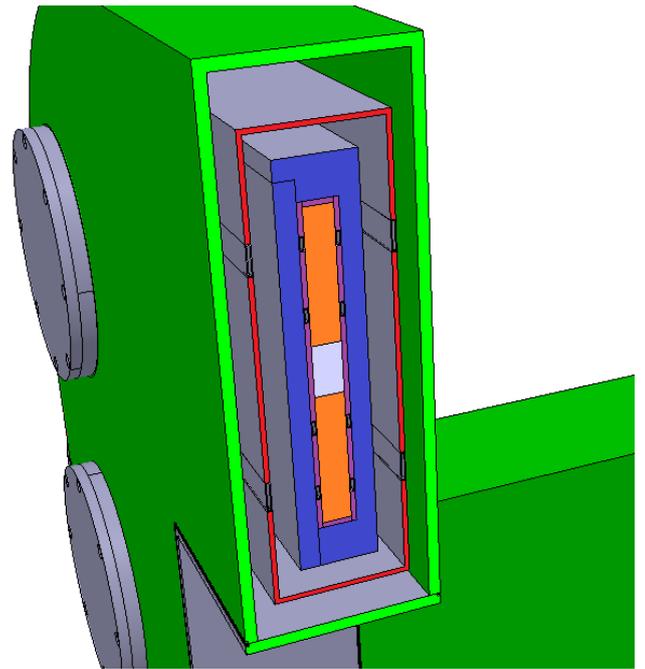


Рис. 3.22: Внутренняя структура обмоток в МК-модели ранней версии магнита CBM.

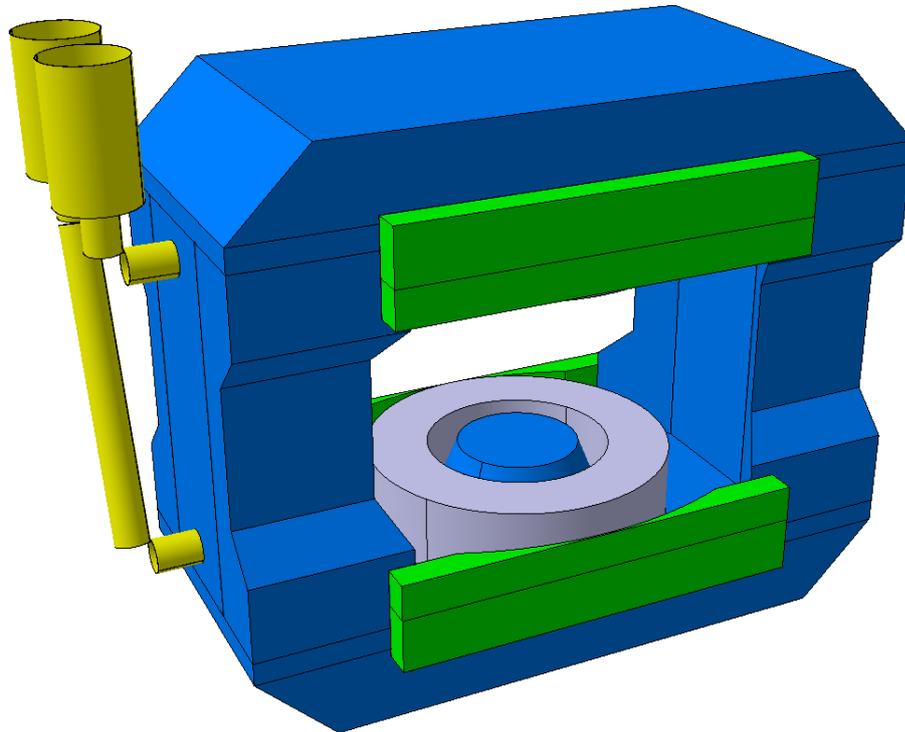


Рис. 3.23: МК-модель новой версии дипольного магнита эксперимента CBM.

3.3.3 R3B GLAD

Помимо эксперимента CBM, пакет “CATIA-GDML geometry builder” применялся в ряде других проектов, в том числе проектов FAIR. Один из примечательных случаев использования “Builder” — это для построения на основе инженерной САПР-модели корпуса широкоап-

ертурного магнита GLAD (GSI Large Acceptance Dipole) эксперимента R3B (Reactions with Relativistic Radioactive Beams), входящего в группу NUSTAR (Nuclear STructure, Astrophysics and Reactions).

На рис. 3.24 приведена исходная инженерная модель. Корпус имеет сложную внешнюю форму, которую невозможно построить точно с помощью примитивов. На этом примере мы видим противоречие между точным описанием формы и адекватностью геометрии для Монте-Карло моделирования прохождения частиц. Наиболее близкое описание формы достигается при использовании примитивов *torus* и *ellipsoid*, см. рис 3.25, 3.26, 3.27. В этом случае, однако, возникают щели, которых нет в реальности и через которые могут свободно пройти частицы, которые в реальности будут рассеяны или остановлены. В таких случаях целесообразно упростить формы, сохранив количество вещества, проходимого частицами, летящими с теми или иными направлениями импульса в тех или иных областях пространства. В данном случае для устранения щелей использовалась комбинация примитивов *torus* и *sphere* с толщиной стенки, соответствующей реальному изделию.

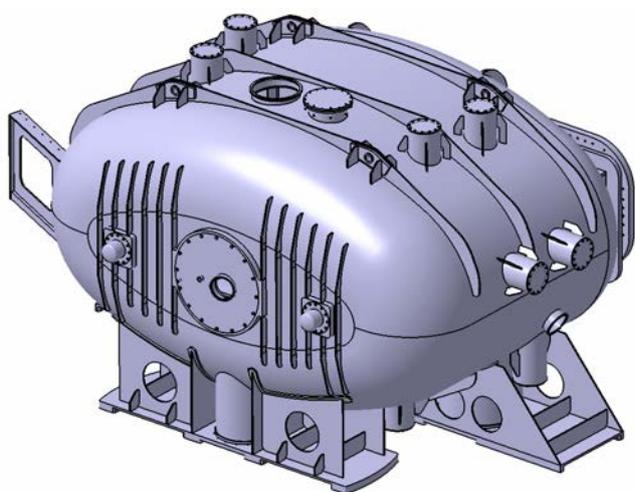


Рис. 3.24: Исходная инженерная модель.

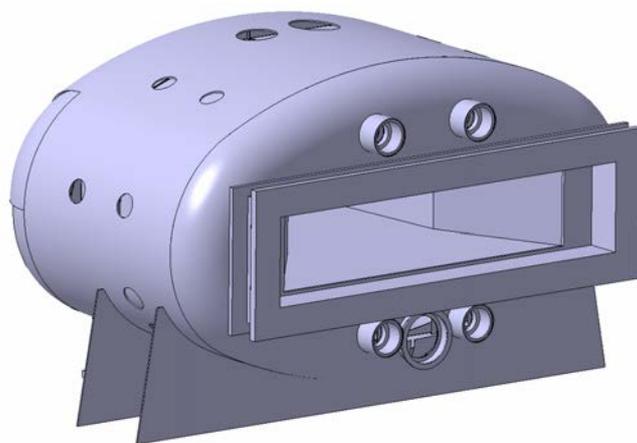


Рис. 3.25: МК-модель.

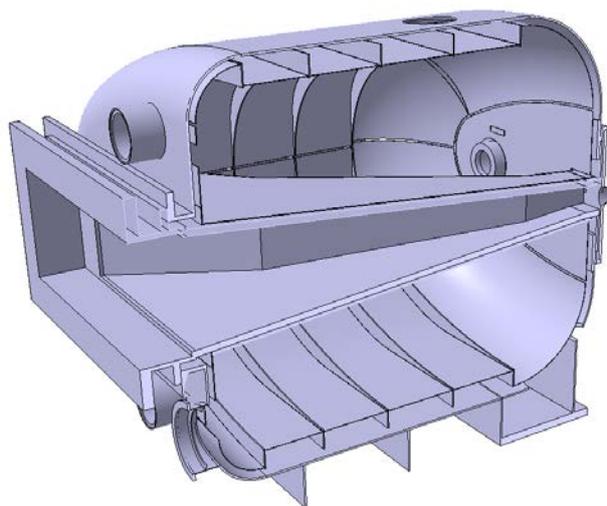


Рис. 3.26: Разрез МК-модели.

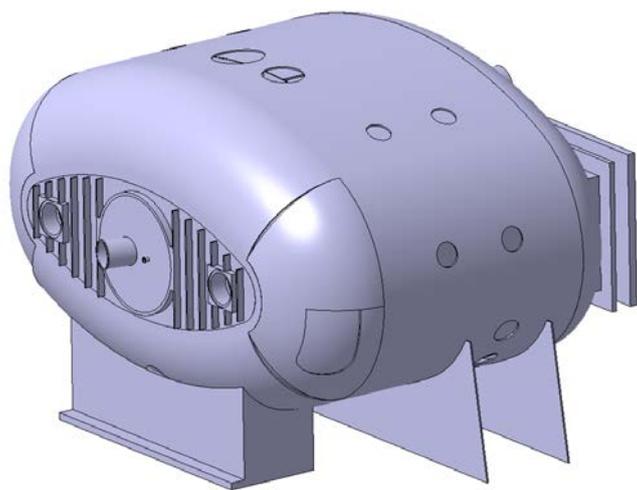


Рис. 3.27: МК-модель.

3.3.4 Мюонная система эксперимента CMS

Экспериментальная установка CMS имеет бочкообразную форму и имеет слоистую структуру. Самый внешний слой — мюонная система. Она составлена из трёх частей: цилиндрической (*barrel*) и двух торцевых (*end cap*). Мюонная система CMS построена с помощью детекторов

трёх типов: дрейфовые трубки (DT), камеры с катодными стрипами (CSC), плоскопараллельные камеры на резистивных пластинах (RPC). Перед каждым слоем детекторов расположены части сердечника, выполняющие роль абсорбера. Каждая торцевая часть состоит из 4 пар слоёв абсорбер-детектор. “CATIA-GDML geometry builder” был использован для выполнения сравнения моделей, заложенных в МК-моделировании, с инженерными моделями, отражающими реальную геометрию изготовленных деталей. Для получения МК-модели в CATIA, GDML-файл, экспортированный из ROOT, был импортирован в CATIA с помощью «GDML2CATIA». На рис. 3.28 показан разрез МК-модели, импортированной в CATIA.

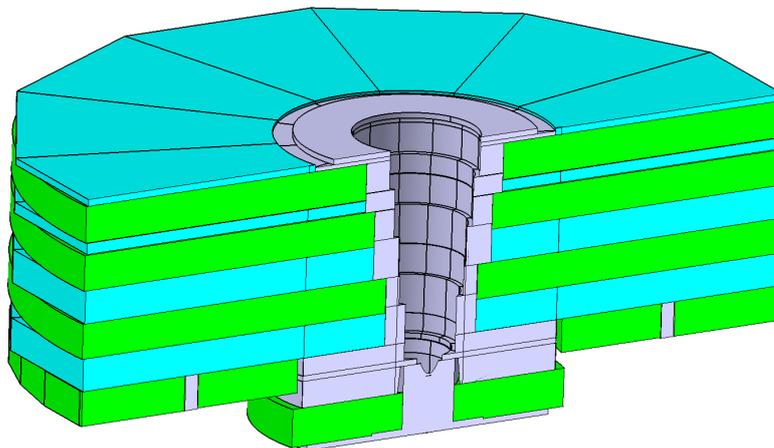


Рис. 3.28: Разрез МК-модели торцевой части мюонной системы эксперимента CMS, импортированной из GDML-файла, экспортированного из ROOT.

3.3.5 Мюонная система эксперимента PANDA

Мюонная система эксперимента PANDA состоит из двух подсистем: Target Spectrometer (TS), в свою очередь состоящий из цилиндрической (barrel) и торцевой (end cap) частей, и Muon Filter (MF), также состоящий из двух частей. Группа PANDA использовала “CATIA-GDML geometry builder” для построения цилиндрической части TS на основе имеющихся инженерных моделей в формате STEP. Особенностью конструкции мюонной системы PANDA является то, что она составлена из набора MDT (mini drift tube) разных типоразмеров. Для ускорения работы над этой моделью был разработан и успешно применён «Duplicator».

Цилиндрическая часть мюонной системы состоит из 8 секторов. Модель одного из секторов представлена на рис. 3.29. Сектора составлены из слоёв, причём слои внутри одного сектора имеют разные габариты, см. рис. 3.30. Каждый слой представляет собой набор MDT разной длины. Средствами “Builder” была построена параметризованная модель MDT, имеющая вложенную структуру и достаточно подробно моделирующая распределение материала. Затем, с помощью «Duplicator», были созданы независимые параметризованные вхождения MDT с разными значениями параметров и далее слои составлены из MDT.

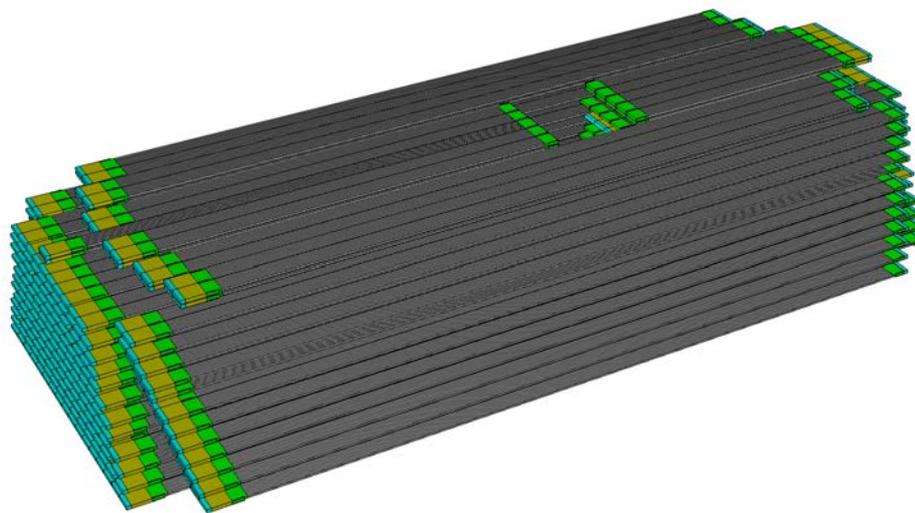


Рис. 3.29: МК-модель сектора цилиндрической части мюонной системы эксперимента PANDA, созданная в “CATIA-GDML geometry builder”.

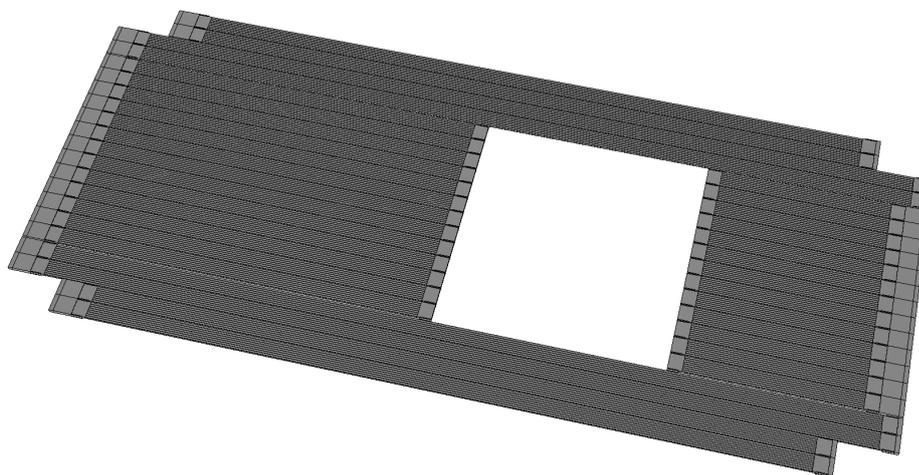


Рис. 3.30: МК-модель одного слоя цилиндрической части мюонной системы эксперимента PANDA, созданная в “CATIA-GDML geometry builder” с применением «Duplicator».

Глава 4

Прототип системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH

4.1 Особенности МА ФЭУ H12700

Многоанодный фотоэлектронный умножитель (МА ФЭУ) H12700 фирмы Hamamatsu [71], появившийся на рынке в 2013 г., подробно охарактеризован в работах [76, 77]. Он обладает следующими достоинствами: большая доля площади поперечного сечения, приходящаяся на светочувствительные пиксели, квадратная форма, что позволяет перекрывать без потерь значительные площади (плотность упаковки 87%), малое время прохождения однофотоэлектронного сигнала через 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. 4.1, по большинству параметров он превосходит своего предшественника МА ФЭУ H8500 [78].

Таблица 4.1: Свойства МА ФЭУ H12700B-03.

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

Данный МА ФЭУ имеет двухщелочной фотокатод. Спектральная чувствительность МА ФЭУ в версии H12700B-03, используемой в настоящей работе, определяется входным окном, сделанным из стекла, прозрачного в ультрафиолетовой области. Коротковолновая граница спектра чувствительности $\lambda_{min}=185$ нм, а максимум квантовой эффективности составляет 33% и достигается при длине волны $\lambda=380$ нм. Такие спектральные характеристики хорошо подходят для регистрации черенковского излучения, лежащего в ультрафиолетовой области. Каждому аноду соответствует канал МА ФЭУ, состоящий из своего фрагмента диодной системы и области фотокатода, называемой пикселем. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов усиления в каналах МА ФЭУ от среднего значения не превышает 16% [71]. Разброс квантовой эффективности между пикселями по нашим данным составляет $\pm 10\%$.

Имеются исследования [64, 66, 79, 80, 81], показывающие, что радиационная стойкость прибора достаточна для использования в эксперименте СВМ. Также продемонстрирована работоспособность прибора в магнитном поле до 2.5 мТл [76] без значительного падения характеристик. Использование магнитных экранов и выбор оптимального расположения фотодетектора в пространстве делают этот МА ФЭУ пригодным для использования в эксперименте СВМ. Отметим, что к этому прибору проявляют интерес и другие эксперименты,

например, он рассматривается для обновления детектора RICH эксперимента LHCb [76].

Наряду с перечисленными достоинствами, МА ФЭУ Н12700В-03 имеет некоторые особенности, не имеющие аналогов в традиционных МА ФЭУ и требующие особого внимания при реализации канала считывания. Размножение электронов в диодной системе происходит в одном и том же вакуумном объеме для всех каналов. Помещённая в единый вакуумный объём диодная система типа “Metal Channel”, см. рис. 4.1 [82], отличается тем, что она довольно компактна, едина для всех каналов и позволяет добиться отличных временных свойств. Электронные лавины, соответствующие разным каналам, отличаются местом прохождения через диодную систему. Имеют место такие эффекты как выбивание электронов из диодов фотонами, прошедшими сквозь фотокатод, и отклонение электронов от идеальной траектории за счет разброса энергий. Последняя особенность приводит к попаданию электронов на последующие стадии диодной системы, минуя предыдущие, и перетеканию всей или части электронной лавины в соседний канал. Перетекание части лавины в соседний канал имеет место в более чем 25% случаев при равномерном освещении всего фотокатода. Величина перетекающего заряда составляет от 3% до 7% в зависимости от взаимного расположения каналов МА ФЭУ [76]. Вероятность того, что лавина от фотоэлектрона полностью разовьётся в соседнем канале зависит от взаимного расположения каналов и составляет при равномерном освещении от 0.1% до 2% [43]. Кроме того, при наличии относительно большого сигнала в одном из каналов, наблюдается биполярная наводка в каналах, имеющих диоды в одном ряду. При интегрировании этой наводки возможно формирование низкоамплитудных импульсов в нескольких каналах. В классическом МА ФЭУ такие эффекты не наблюдаются из-за отсутствия связи с соседними каналами, наличия развитой системы фокусировки и такой конструкции диодной системы, что диоды имеют большую площадь и последующие стадии полностью экранируются предыдущими.

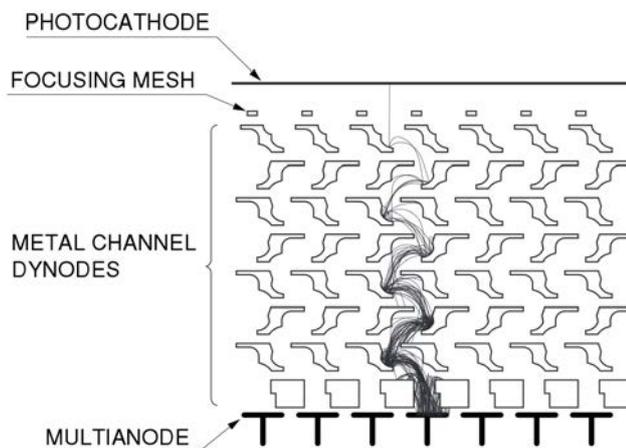


Рис. 4.1: Схема диодной системы типа “Metal Channel”.

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

4.2 Архитектура 64-канального модуля считывания

Конструктивно и функционально вся электроника считывания и оцифровки данных RICH-детектора эксперимента CBM может быть сгруппирована в 64-канальные модули, каждый из которых соответствует одному многоанодному фотоэлектронному умножителю (МА ФЭУ).

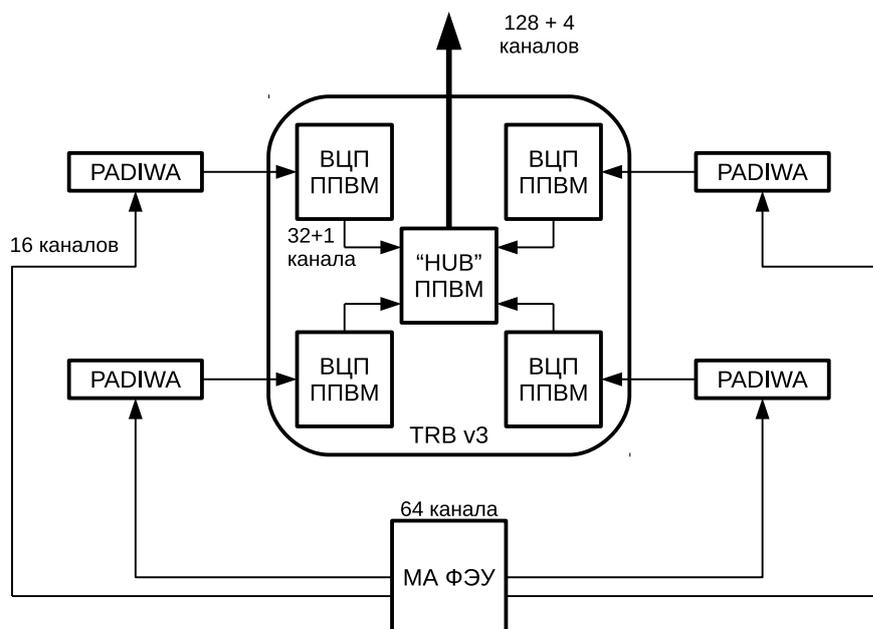


Рис. 4.2: Схема считывания одного МА ФЭУ, состоящая из 4 плат-дискриминаторов PADIWA и одной платы TRB v3.

Схема 64-канального модуля показана на рис. 4.2. Он включает в себя 4 платы PADIWA и одну плату TRB v3.

4.2.1 Плата предусилитель-дискриминатор PADIWA

PADIWA — 16-ти канальная плата передней электроники, разработанная в ГСИ [83]. Общий вид платы PADIWA показан на рис. 4.3. 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. 4.4. 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 использоваться, например, для того, чтобы обнаружить перегрев, если такая возможность заложена в программе ППВМ.

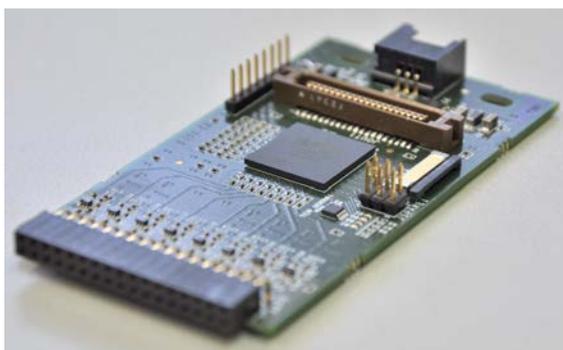


Рис. 4.3: Общий вид платы PADIWA.

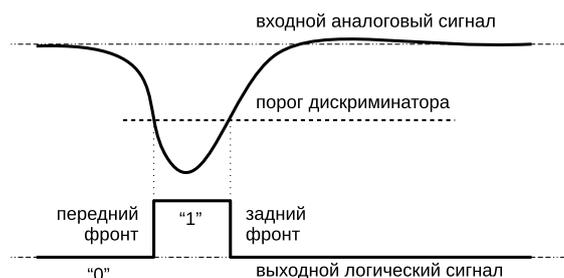


Рис. 4.4: Условная временная диаграмма функционирования дискриминатора.

4.2.2 Многофункциональная плата TRB v3

Многофункциональная плата TRB v3 содержит 5 ППВМ, каждую из которых можно запрограммировать независимо. Различают 1 центральную ППВМ и 4 периферийные. В нашем случае 4 периферийные ППВМ запрограммированы как время-цифровые преобразователи (ВЦП), а центральная ППВМ — как концентратор данных. Такую конфигурацию платы будем называть TRB v3 (конфигурация 1).

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

Общий вид платы TRB v3 показан на рис. 4.5. Рядом с каждой периферийной ППВМ имеются специальные порты, к которым можно присоединить платы расширения. В частности, существует специальная плата расширения для подключения шлейфов от плат PADIWA. На плате TRB v3 имеются порты Ethernet, как RG45, так и оптический SFP, которые используются для двусторонней связи с другими платами TRB v3 или с компьютером.

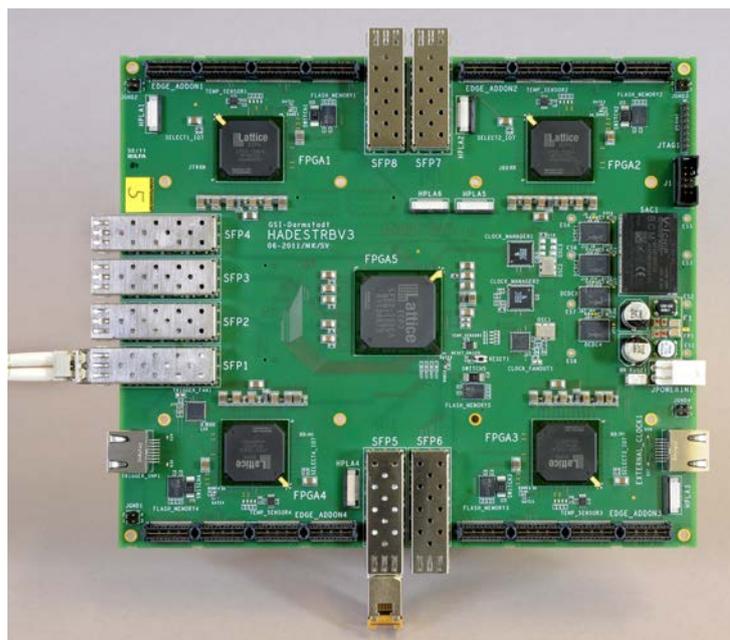


Рис. 4.5: Общий вид платы TRB v3.

Каждая периферийная ППВМ, разбивается на 32 области, в каждой из которых программируется одна и та же схема канала ВЦП. Каналы расположены в разных областях матрицы, поэтому каждый канал ВЦП имеет свою величину пути, проходимого сигналом внутри ППВМ. Нечетные каналы настроены на положительный перепад напряжения, т.е. на фронт, а четные каналы — на отрицательный перепад напряжения, т.е. на срез. Обработка импульса из одного входного канала выполняется двумя каналами ВЦП, относительная задержка между которыми должна быть прокалибрована с помощью точного генератора прямоугольных импульсов. Особенности такой калибровки обсуждаются в 5.2. Отметим, что в ППВМ для каждого канала ВЦП имеется специальный счётчик количества зарегистрированных временных отметок, значение которого может быть опрошено независимо от основного потока данных. Этот счётчик может быть использован, например, для получения зависимости скорости счёта от порога дискриминатора с целью определения оптимального порога.

Регистрация момента времени в ВЦП осуществляется в два этапа. Грубое значение регистрируется кольцевым счётчиком, который управляется от тактового генератора с периодом 5 нс. Старшие 28 разрядов счетчика называются эпохой (*epoch*), а 11 младших разрядов называются грубым временем (*coarse*) [84]. При регистрации момента времени входного фронта значение времени кодируется двумя сообщениями — эпохой и собственно так называемой временной отметкой (*timestamp*). Чтобы уменьшить поток выходных данных значение эпохи, которое увеличивается каждые 10.24 мкс, передаётся однократно для группы временных отметок, принадлежащих данной эпохе.

Для более точного измерения применяется дополнительный 10-битный регистр. В регистр пишется значение счётчика точного времени (*fine*), реализованного с помощью технологии Tapped delay line (TDL) на 512-ти элементах. Если все элементы задержки идентичны, полный период счётчика грубого времени, равный 5 нс, можно разбить на 512 отсчётов. Тогда точность измеренной временной отметки была бы равна 9.8 пс, а полное время рассчитывалось бы как $T = (epoch \cdot 2048 + coarse - (fine/512)) \cdot 5\text{нс}$.

Однако, в силу неидеальности компонентов, существует разброс параметров элементов в линии задержки, следовательно, требуется калибровка результатов измерения точного времени относительно диапазона значений регистра. Пример таблицы калибровки счётчика точного времени представлен в виде графика дискретной функции $f_{calib}(Fine)$ на рис. 4.6. По оси абсцисс откладывается значение счётчика точного времени, а по оси ординат — значение точного времени в наносекундах. При этом формула для вычисления точного времени приобретает вид: $T = Epoch \cdot 2048 \cdot 5 + Coarse \cdot 5 - f_{calib}(Fine)$ нс.

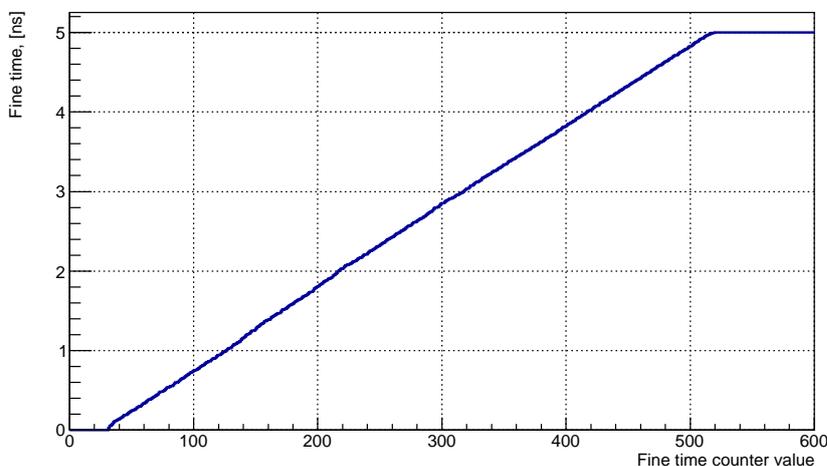


Рис. 4.6: Пример таблицы калибровки счётчика точного времени.

Процедура калибровки и анализ ее качества обсуждаются в разделах 4.4.2 и 5.2 соответственно. Некоторые подробности измерения точного времени описаны в следующем разделе.

Находящиеся на TRB v3 ППВМ формируют 4-байтовые сообщения одного из следующих типов: EVENT, SUBEVENT, SUBSUBEVENT HEADER, TDC HEADER, EPOCH COUNTER, TIMESTAMP, DEBUG. Логика формирования сообщений подробно описана в документации [85].

На рис. 4.7 для примера показана структура сообщения типа TIMESTAMP, наиболее информативного для нашего анализа. В зависимости от номера канала это сообщение может нести информацию о фронте синхронизации (SYNC), о переднем фронте хита (LEAD) или о срезе хита (TRAIL).

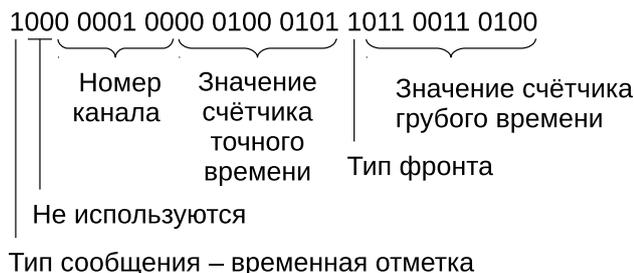


Рис. 4.7: Пример сырого сообщения типа “временная отметка”.

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 разделах 4.4 и 5.3.

4.2.3 Особенности измерения точного времени

На рис. 4.8 приведена условная схема функционирования одного канала ВЦП, дающая представление о причинах сдвига калибровочной таблицы и объясняющая минус в формуле расчёта полного времени.

Имеется тактовый генератор частотой 200 МГц. Период такого генератора — 5 нс. Он управляет счётчиком грубого времени. Каждые 5 нс значение грубого времени увеличивается, но не выдаётся на выход. Счётчик точного времени выполнен по технологии Tapped delay line (TDL) — цифровая линия задержки (DDL) с промежуточными выходами. Используются элементы задержки t_0 , имеющие одинаковые характеристики в пределах некоторой точности. Количество элементов должно быть таким, чтобы полностью заполнить период между двумя отсчётами грубого времени. Пример временных диаграмм уровней на некоторых узлах схемы при регистрации входного фронта показан на рис. 4.9. Регистрируемый фронт, поступающий на вход IN, проходит линию задержки, состоящую из нескольких элементов задержки. По мере прохождения линии фронтом триггеры переключаются из 0 в 1, каждый следующий — через промежуток времени, равный t_0 . При поступлении следующего

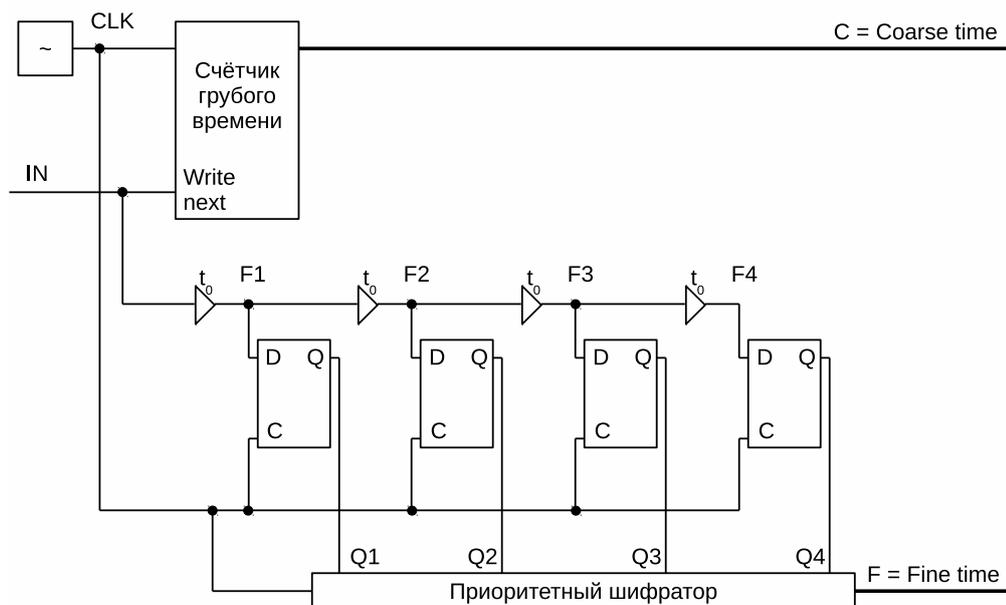


Рис. 4.8: Структурная схема одного канала ВЦП.

фронта от тактового генератора происходит считывание грубого времени и перенос значений выходов триггеров в приоритетный шифратор.

Отличительная особенность такого шифратора — индифферентность к значению на входах $j < i$ при наличии логической единицы на входе i . Иными словами, имеет значение только старший бит, а младшие игнорируются. (У обычного шифратора только один вход должен иметь единицу на входе). Шифратор преобразует номер последнего переключившегося триггера в число, обозначающее значение точного времени. Таким образом, точное время должно вычитаться из грубого времени потому что линия задержки измерила время между моментом прихода входного сигнала (start) и моментом прихода следующего отсчёта грубого времени (stop).

Приведена наиболее понятная схема, фактическая же реализация отличается. Например, в качестве элемента задержки может выступать сам триггер. Тогда выход i -го триггера напрямую соединяется со входом $(i+1)$ -го триггера. Используемые нами ВЦП в ППВМ имеют в качестве элемента задержки ячейку матрицы, запрограммированную как полный сумматор.

ВЦП разрабатывался так, чтобы интервал 5 нс между двумя отсчётами грубого счётчика разбивался на 512 элементов. Тогда было бы достаточно 9-битного шифратора для формирования значения точного времени. Из-за того что существует также и задержка сигналов в проводниках ненулевой длины, реально таблица может быть сдвинута. Например, значение точного времени 0 должно означать, что входной фронт пришёл одновременно с фронтом от тактового генератора (точнее, раньше на некоторую очень малую величину задержки). Если учитывать задержку в проводниках на приведённой условной схеме, то получится, что команда считывания шифратору идёт дольше, чем до первого триггера. В таком случае никогда не будет принято нулевого значения и 9 бит для хранения точного времени будет недостаточно. По данной причине сообщение, несущее точное время, имеет длину 10 бит, а все калибровочные таблицы имеют правую границу на значении 1024.

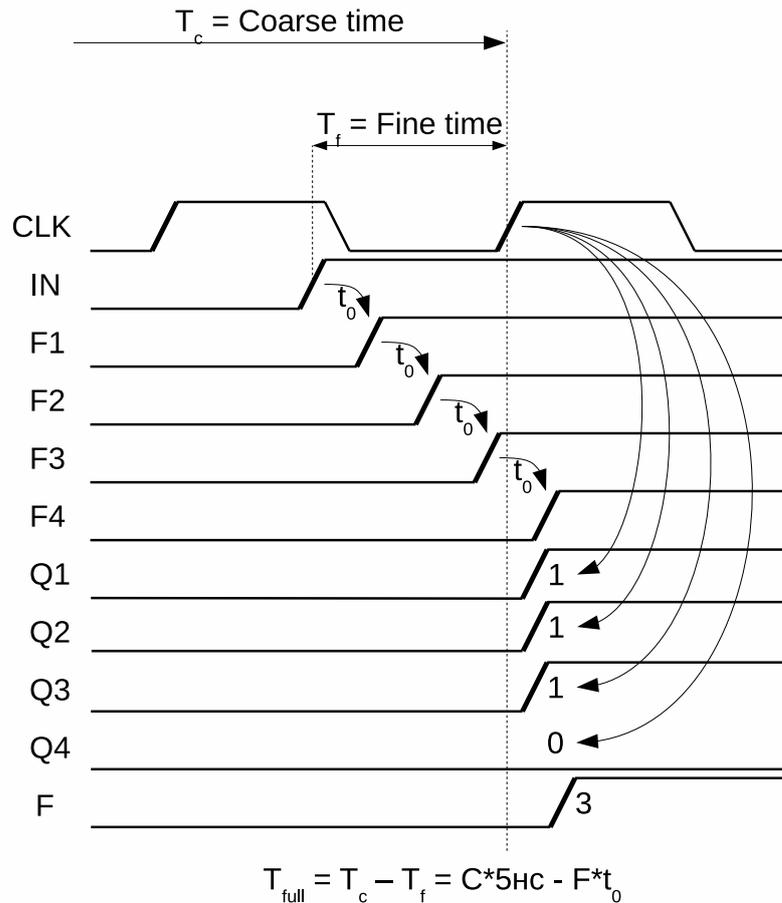


Рис. 4.9: Пример временных диаграмм при регистрации входного фронта.

4.3 Экспериментальные установки

4.3.1 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 [86]. Подробности реализации прототипов детектора переходного излучения и время-пролетного детектора содержатся в работах [87] и [88] соответственно. Схема установки представлена на рис. 4.10.

Вывод пучка T9 ускорителя PS [89] в CERN представляет собой смешанный вторичный пучок электронов, π -мезонов и мюонов с импульсом, настраиваемым в диапазоне 0.5 ГэВ/с — 10 ГэВ/с. В течение тестов пучок был настроен на импульс от 1 до 3 ГэВ/с. Длительность вывода составляла около 2 секунд, причем за это время регистрировалось в среднем 500 электронов.

Схема прототипа детектора RICH эксперимента CBM представлена на рис. 4.11.

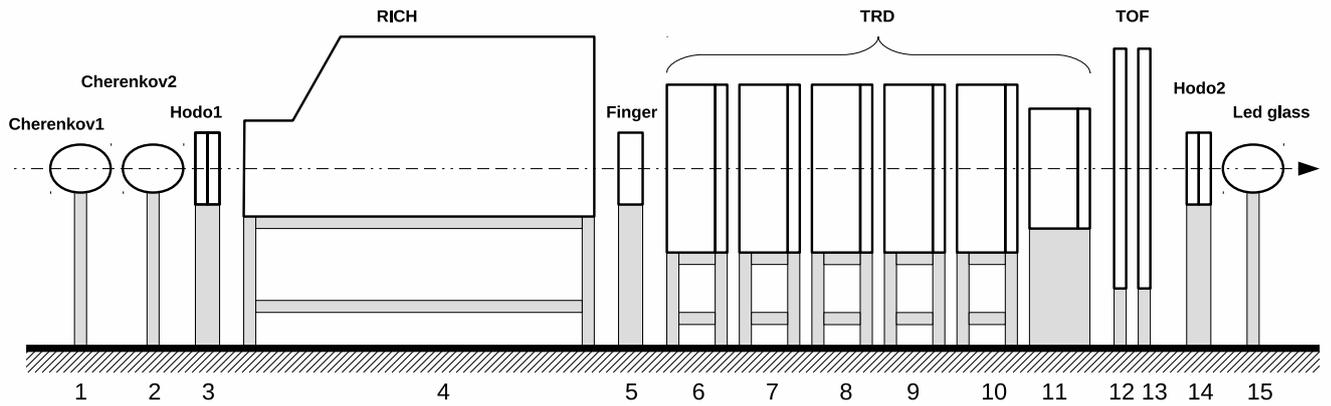


Рис. 4.10: Схема экспериментальной установки на пучковых тестах. 1,2 — пороговые газовые Черенковские счётчики; 3,14 — станции двухкоординатного годоскопа на основе сцинтилляционного оптического волокна; 4 — прототип детектора Черенковских колец; 5 — пластина из органического сцинтиллятора; 6-11 — станции прототипа детектора переходного излучения; 12-13 — станции прототипа время-пролётного детектора; 15 — электромагнитный калориметр из свинцового стекла.

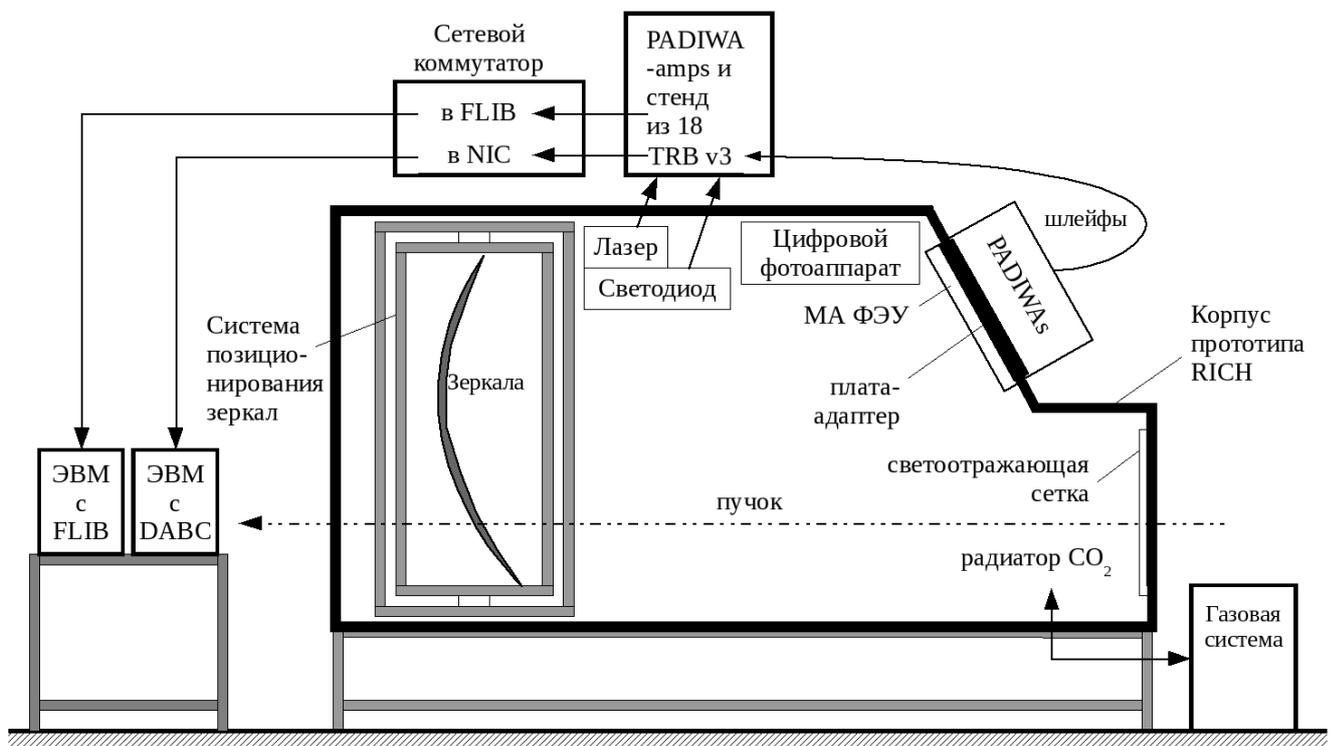


Рис. 4.11: Схема прототипа детектора RICH.

Габариты герметичного алюминиевого корпуса — 1.4 м в ширину, 1.2 м в высоту и 2.4 м вдоль пучка, при этом длина пути частицы в радиаторе до зеркал — 1.7 м. Радиатор детектора — углекислый газ под избыточным давлением 2 мбар при комнатной температуре. Показатель преломления газа для ближнего ультрафиолета составляет при этом $n=1.00045$. Очистка газа и стабилизация его давления с точностью 0.1 мбар обеспечивались газовой системой, описанной в [90]. Абсолютное давление газовой смеси и температура контролируются системой медленного управления. Актуальное значение показателя преломления автоматически вычисляется и сохраняется в данных.

Система позиционирования зеркал представляет собой раму верхнего уровня, вставляю-

щуюся в корпус прототипа; вложенную раму, соединённую с основной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг вертикальной оси; внутреннюю раму, соединённую со вложенной рамой через два привода, обеспечивающие вращение вокруг горизонтальной оси. Сферическое зеркало радиусом кривизны 3 м состоит из 4 долей 40 см на 40 см. Каждая из долей крепится к внутренней раме через три моторизированных актуатора. Перечисленные двигатели позволяют удалённо, после установки детектора на пучке, позиционировать зеркала. Более подробно система позиционирования зеркал описана в [65].

Система диагностики положения зеркал [36] состоит из светоотражающей сетки, занимающей всю переднюю стенку корпуса прототипа, светодиода Roithner UVTOP240 [91] с длиной волны 245 нм и фотоаппарата, считываемого удаленно. Сетка сделана из полос ретрорефлектора шириной 10 мм и имеет прямоугольную ячейку шагом 100 мм по горизонтали и 110 мм по вертикали. Эта система позволяет контролировать точность поворота зеркал и, при наличии удалённого управления зеркалами, корректировать его. Также существуют алгоритмы расчёта поправок координат хитов для коррекции ошибок, вызванных неидеальным позиционированием зеркал. Идея метода заключается в следующем. Свет от светодиода, отражаясь от сетки и затем от зеркал, попадает в объектив фотоаппарата. На полученном кадре с помощью алгоритмов распознавания образов находятся линии сетки. При наличии отклонений зеркал от идеального положения, восстановленный образ сетки будет состоять из набора отдельных отрезков. Анализируя параметры отрезков, можно определить значения отклонений отдельных долей зеркала, значения поправок к поворотам отдельных долей зеркала, значения коррекций координат хитов.

Черенковское излучение фокусируется зеркалами на фоточувствительную камеру, содержащую матрицу 4 на 4 МА ФЭУ, шесть из которых — это МА ФЭУ Hamamatsu H12700 и десять — МА ФЭУ Hamamatsu H8500. Данные модели МА ФЭУ имеют сечение 52 мм на 52 мм. Часть фотоумножителей была предварительно покрыта слоем сместителя спектра толщиной 150-200 нм. В качестве сместителя спектра использовался паратерфенил ($\approx 40\%$ по массе) в полимерной матрице Paraloid B72. Сместитель спектра наносился методом погружения в раствор компонентов покрытия в дихлорметане, см. [40]. В определённый момент во время пучковых тестов сместитель спектра был счищен. Это позволило в дальнейшем оценить влияние сместителя спектра на эффективность регистрации одиночных фотонов и на временной разброс хитов, принадлежащих одному кольцу. Для мониторинга системы считывания и калибровки относительных задержек между каналами, наряду со светодиодом, использовался лазер Alphas Picopower LD405 [92] 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 4.2. Механически все 16 МА ФЭУ монтировались на плату-адаптер, обеспечивающую герметичность корпуса и разводку высокого напряжения. Снаружи к плате-адаптеру монтировались платы предусилителей-дискриминаторов PADIWA, логический сигнал с плат PADIWA передавался по шлейфам, состоящим из витых пар и имеющих длину 2 м, к платам TRB v3 (конфигурации 1), установленным на корпусе прототипа. Для всей камеры потребовалось всего 64 платы PADIWA и 16 плат TRB v3 (конфигурации 1). Данные с 16 плат TRB v3 поступали на ещё одну, 17-ю плату TRB v3 особой конфигурации, которая помимо концентратора данных также являлась генератором и распределителем триггера считывания 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 [83]) и оцифровывались ВЦП на ещё одной, 18-й плате TRB v3 также нестандартной конфигурации, совмещающей ВЦП и концентратор данных. Параллельно функционировало

две системы сбора данных — одна принимала данные через стандартный сетевой интерфейс (сетевой концентратор) с каждой платы TRB v3 по медному носителю, а другая через FLIB с одной (18-й) платы TRB v3. Схема считывания всей камеры и детекторов пучка представлена на рис. 4.12. Отметим, что ЭВМ с установленной в неё платой FLIB, использовалась для приёма данных не только от прототипа RICH, но и от других детекторов.

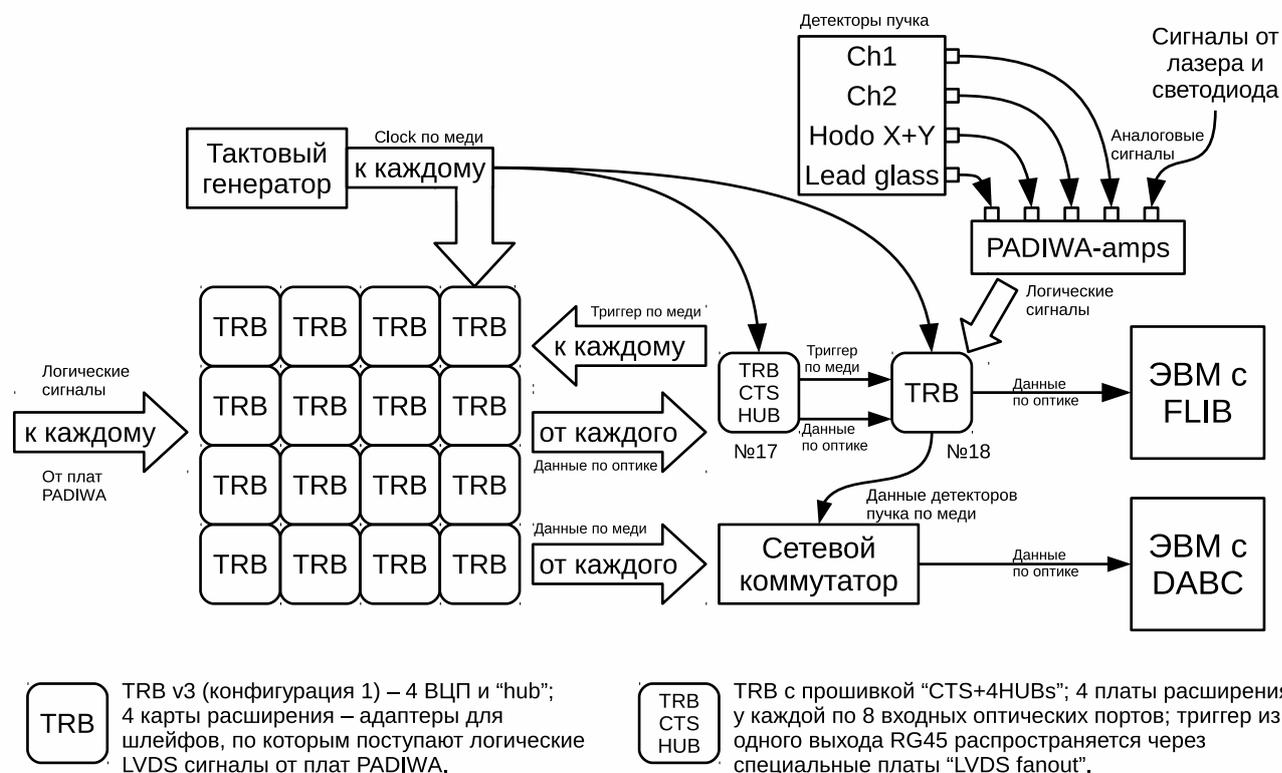


Рис. 4.12: Схема считывания всей камеры и детекторов пучка.

В качестве платформы для реализации FLIB в СВМ используется коммерческая PCI-E плата NTG К-7. Архитектура FLIB показана на рис. 4.13. Основные компоненты FLIB — драйверы входных оптических портов, программируемая пользователем вентиляльная матрица (ППВМ, FPGA), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и драйвер шины PCI-Express.

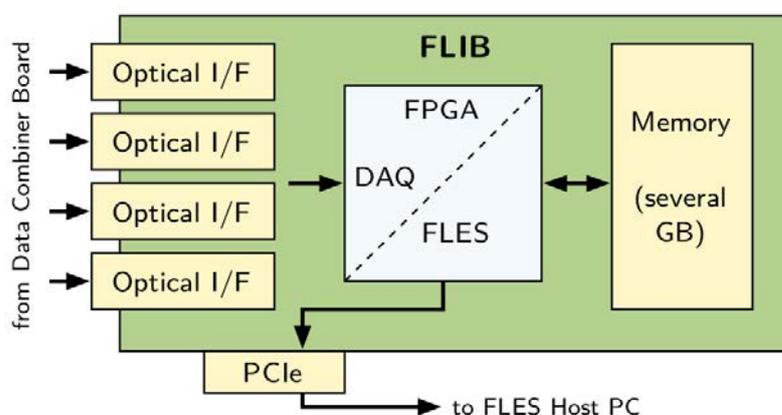


Рис. 4.13: Архитектура FLIB.

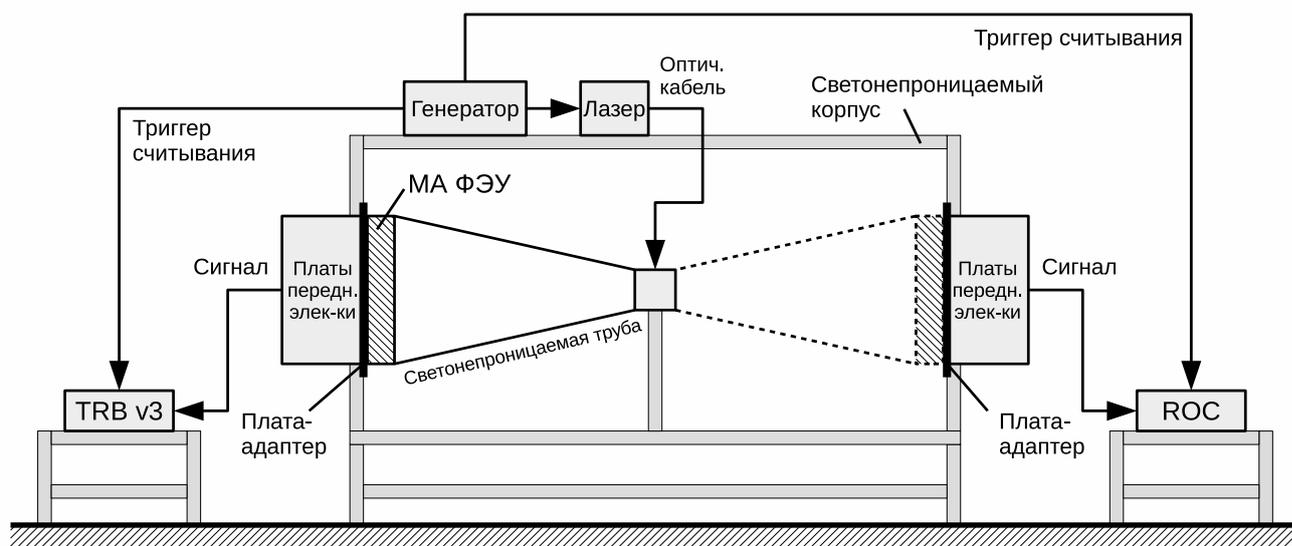


Рис. 4.14: Схема лабораторной установки.

4.3.2 Лабораторный стенд

Система считывания на основе платы PADIWA впервые использовалась на пучковых тестах СВМ в ноябре 2014 г. Простейший анализ набранных данных показал, что некоторые распределения временных отметок не поддаются очевидному объяснению. В связи с этим потребовалось собрать лабораторный стенд, позволяющий более подробно исследовать особенности работы одного многоканального модуля системы считывания, описанного в разделе 4.2. В некоторых измерениях выходной LVDS сигнал с PADIWA не оцифровывался ВЦП, а считывался осциллографом с помощью активного зонда. Для лучшего понимания особенностей работы исследуемой системы считывания и сбора данных в том же лабораторном стенде был реализован более информативный, но медленный вариант системы считывания и сбора данных на основе 128-канальной микросхемы n-XYTER, каждый канал которой измеряет момент времени прихода переднего фронта и амплитуду входного сигнала. Эта система состоит из платы передней электроники, подключаемой через печатную плату-адаптер к МА ФЭУ и через контроллер считывания SysCore ROC [93] к ЭВМ. Для считывания одного МА ФЭУ достаточно 64 каналов, то есть половины каналов одной платы передней электроники.

n-XYTER [94] представляет собой ASIC. Каждый канал внутри n-XYTER разделяется на два. В одном выполняется относительно медленное формирование для максимально точной регистрации амплитуды входного сигнала. В другом выполняется относительно быстрое формирование для максимально точной регистрации временной отметки переднего фронта. Амплитуда оцифровывается АЦП, расположенным на плате передней электроники.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 4.14.

Стенд собран в светонепроницаемом корпусе размером 80 см на 80 см и длиной 2 м. В качестве источника света использовался такой же лазер Alphalas Picorower LD405 [92] с поставляемым с ним генератором Alphalas PLDD-250 [92], 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 в стенку коробки и выполняет роль каркаса и светоизолятора. Также по ней разведено питание МА ФЭУ. Вся считывающая электроника питалась низким напряжением, а МА ФЭУ высоким напряжением от высоковольтного источника.

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

4.4 Программное обеспечение

Программное обеспечение системы считывания и сбора данных прототипа CBM RICH представляет собой набор модулей приёма, первичной обработки и сохранения данных, реализованных в рамках программного каркаса CbmRoot [95]. CbmRoot вместе с FLESnet [96] образуют инфраструктуру, позволяющую выполнять приём данных, моделирование, реконструкцию и анализ данных эксперимента CBM.

Соответствующим образом сконфигурированное приложение, написанное в рамках фреймворка CbmRoot, может быть запущено на ЭВМ, как частный случай на распределённой вычислительной системе. Все этапы от считывания до анализа могут быть выполнены “на лету”, без записи промежуточных результатов на диск. В ходе описываемых в данной работе тестов использовалась последовательность обработки данных, изображённая на рис. 4.15. Программная реализация, функционал и взаимодействие отдельных блоков описаны ниже [97].

4.4.1 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 [98]). При использовании FLIB распаковке предшествует запуск небольшого интерфейсного модуля, который выделяет из поступающего от FLESnet потока данных в формате временных

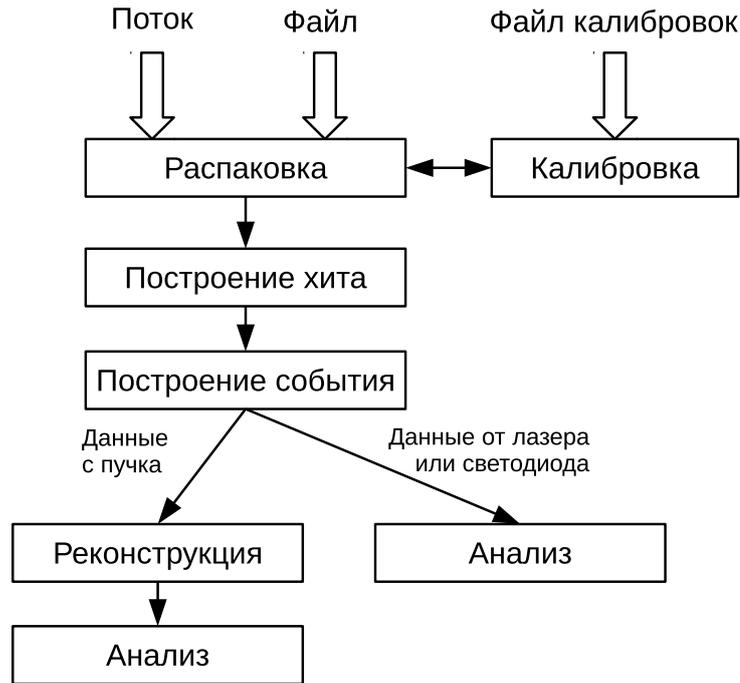


Рис. 4.15: Диаграмма взаимодействия программных модулей.

интервалов (TSA — Time Slice Archive), сообщения, относящиеся к детектору RICH. Распаковка реализована как task-класс *CbmRichTrbUnpack*. В результате выполнения каждой итерации на выходе формируется *TClonesArray* с объектами класса *CbmTrbRawMessage*.

4.4.2 Калибровка счётчика точного времени

В процедуре калибровки счётчика точного времени воплощена известная техника калибровки цифровой линии задержки с отводами (Tapped delay line, TDL [99]), 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.

Процедура калибровки счётчика 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.

4.4.3 Коррекция задержек между каналами

Для коррекции задержек между каналами в классе *CbmTrbCalibrator* реализована возможность импорта таблицы коррекций, построенной предварительно с помощью CbmRoot-макросов “ExtractDelays” и “BuildDeltaTable” на основе результатов первого прогона анализа. Первый макрос извлекает параметры гистограмм в текстовом виде из многочисленных файлов результатов анализа, полученных с помощью CbmRoot, возможно, с применением параллельных расчётов. Второй макрос строит таблицу коррекций по данным параметрам.

Алгоритм коррекции задержек состоит в следующем. Введём сплошную нумерацию пикселей по всей фоточувствительной камере, состоящей из множества МА ФЭУ. Полное число

пикселей $M = 64 \cdot N$, где N — число МА ФЭУ. Для анализа отбираются все передние фронты, имеющие временную отметку, попадающую в заданное временное окно относительно триггера срабатывания лазера. Ширина и положение окна зависят от экспериментальной установки (например, разницы длин кабелей, точности регистрации триггера) и характеристик лазера и подбираются в соответствии с распределением, построенным по конкретному набору данных. Обычно ширина составляет около 100 нс, а левая граница сдвинута от триггера на 20 нс. По всему массиву отобранных данных строятся гистограммы разности временных отметок i -го и j -го каналов, где i и j пробегает 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 .

4.4.4 Построение хита

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

Для каждого входного канала был реализован буфер сообщений, который наполнялся фронтами по мере их поступления. Далее, как только приходил срез, из буфера выбирался наиболее близкий по временной отметке фронт внутри заданного допустимого временного окна. На рис. 4.16 приведён пример буфера фронтов для заданной пары каналов ВЦП в момент прихода одного среза. Время над порогом (ToT) — параметр хита, говорящий об амплитуде сигнала. Он вычисляется как разница временных отметок фронта и среза в подобранной паре. Допускаются как положительные, так и отрицательные значения ToT, однако в обе стороны накладывается ограничение.

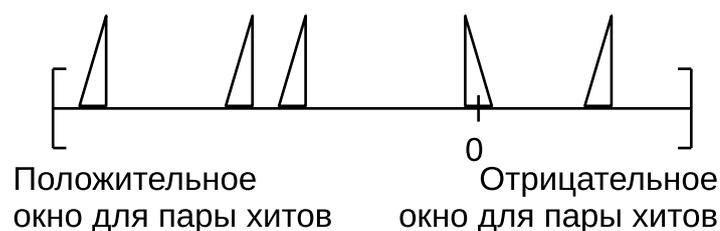


Рис. 4.16: Пример буфера передних фронтов для заданной пары каналов ВЦП в момент прихода одного среза.

Т.к. не всегда присутствует соответствующий парный фронт/срез, буфер постепенно наполняется и его необходимо очищать, чтобы избежать переполнения. Если для поступившего среза нет кандидата-фронта в буфере это означает, что фронт не был зарегистрирован. В таком случае этот срез отбрасывается. Количество ненайденных фронтов/срезов сильно зависит от нагрузки входного канала, которая в свою очередь зависит от порога дискриминатора. 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 ненайденные пары в основном обусловлены ошибками ВЦП и доля таких сообщений пренебрежимо мала — менее $2 \cdot 10^{-4}$.

4.4.5 Построение события

Тот факт, что физическая программа эксперимента СВМ подразумевает исследование очень редких явлений, для которых практически невозможно вырабатывать аппаратный триггер, привёл к решению разработать и использовать бестриггерную систему считывания. В бестриггерной системе считывания каждый канал передней электроники вырабатывает сообщение при преодолении входным аналоговым сигналом установленного порога. Получается, что электроника выдаёт для программного обеспечения непрерывный поток никак не сгруппированных сообщений, содержащих временную отметку. Для того, чтобы выполнять физический анализ, необходимо в этом непрерывном потоке выделять осмысленные группы, которые мы называем событиями. Строго говоря, задача построения событий — это одномерная задача кластеризации на оси времени с последующим отбором кластеров по некоторым критериям.

Задача также усложнена тем фактом, что электроника не может обеспечить непрерывный поток сообщений, упорядоченных по времени регистрации. Происходит группировка сообщений в так называемые DAQ-события, которые необходимы для обеспечения передачи информации, а сообщения внутри DAQ-событий могут быть упорядочены произвольно. Соответственно первый этап построения события — упорядочивание сообщений.

В данных с пучковых тестов 2014 г., для того чтобы определить, является ли распознанная группа событием, можно использовать сигналы с детекторов пучка — пороговых черенковских счётчиков, годоскопов и др. В лабораторных данных, где выполнялись измерения с лазером, в качестве триггера можно использовать сигнал от генератора, управляющего лазером. В ситуации, когда нет дополнительной информации, как в случае полного детектора RICH в итоговом эксперименте, необходимо принимать решение о том, является распознанная группа событием, или нет, на основе исключительно информации, полученной из этой группы. Распознанный кластер может являться событием, но чаще всего будет состоять из одного сообщения — шумового хита. Следовательно, можно использовать кол-во хитов в событии для подавления шумов, что особенно актуально для детектора СВМ RICH, где выполняется реконструкция черенковских колец, требующая некоторого минимального числа хитов в плоскости реконструкции.

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.

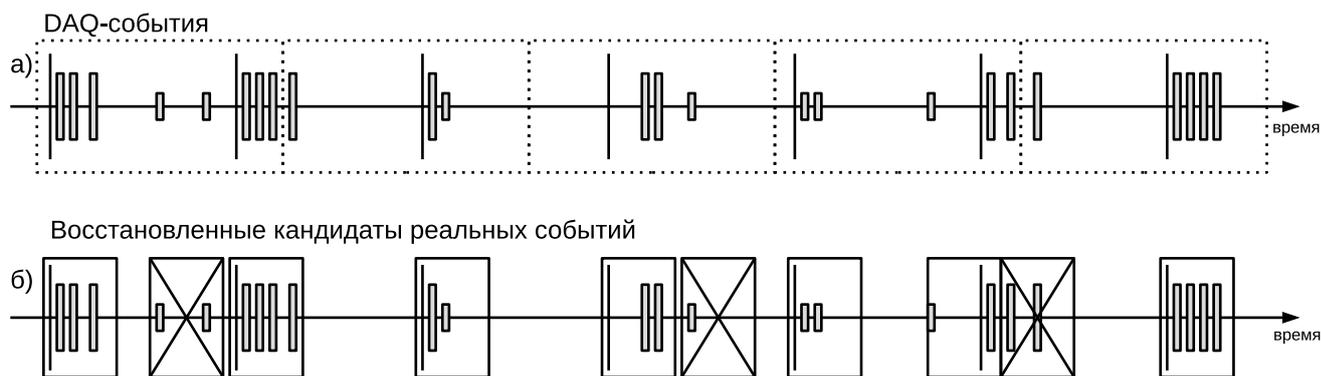


Рис. 4.17: Идея алгоритма построения события: (а) поступающие данные, сгруппированные в DAQ-события; (б) восстановленные кандидаты реальных событий; перечёркнутые отбрасываемые кандидаты, не содержащие триггер. Тонкие длинные линии — триггерные сигналы, прямоугольники средней длины — сигналы, связанные со светом, короткие прямоугольники — шумовые сигналы.

Рассмотрим некоторый интервал времени, приведённый на рис. 4.17, 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 учитывать 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. 4.18 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.

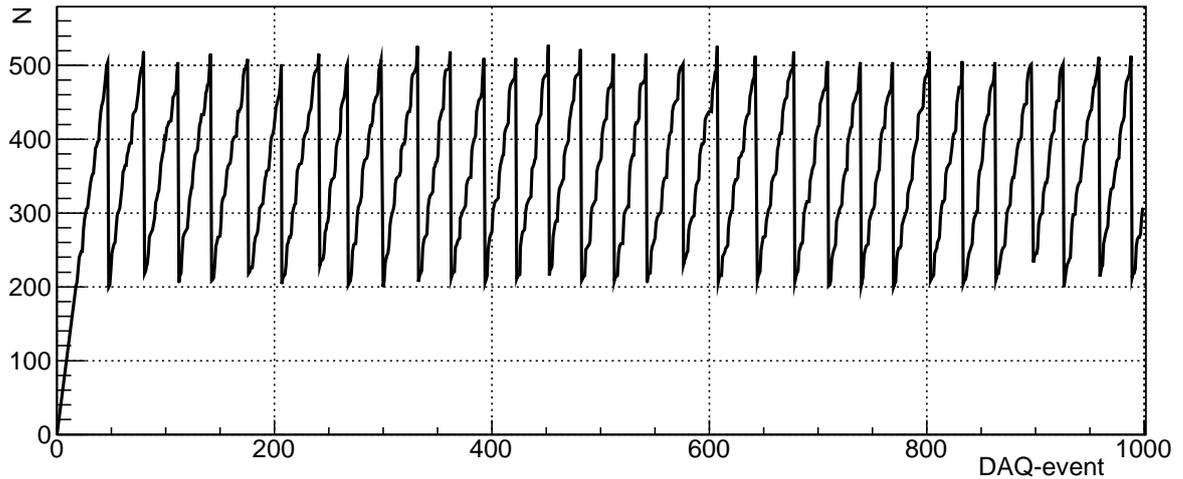


Рис. 4.18: Диаграмма наполненности буфера найденных событий в зависимости от номера обработанного входного DAQ-события.

4.4.6 Реконструкция

Реконструкция в СВМ 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 и описанный в работах [45, 46]. 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 осуществляется реконструкция треков частиц с применением информации с других детекторов.

Глава 5

Исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH

Материалы данной главы основываются на публикациях [100, 101, 102].

5.1 Испытание системы сбора данных с использованием платы FLiB

Значительная часть данных была набрана параллельно двумя системами сбора данных. Было проведено побайтное сравнение результатов распаковки обоих потоков. На массиве, состоящем 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 [103, 104, 98].

5.2 Калибровка счётчика точного времени

Пример таблицы калибровки счётчика точного времени, полученной на данных лабораторных тестов, представлен в виде графика на рис. 4.6. 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 была аппроксимирована кусочно-линейной функцией. На рис. 5.1 показан пример разности значений функции калибровки счётчика точного времени и линейной функции. Видно, что отклонения не превышают 60 пс.

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 линей-

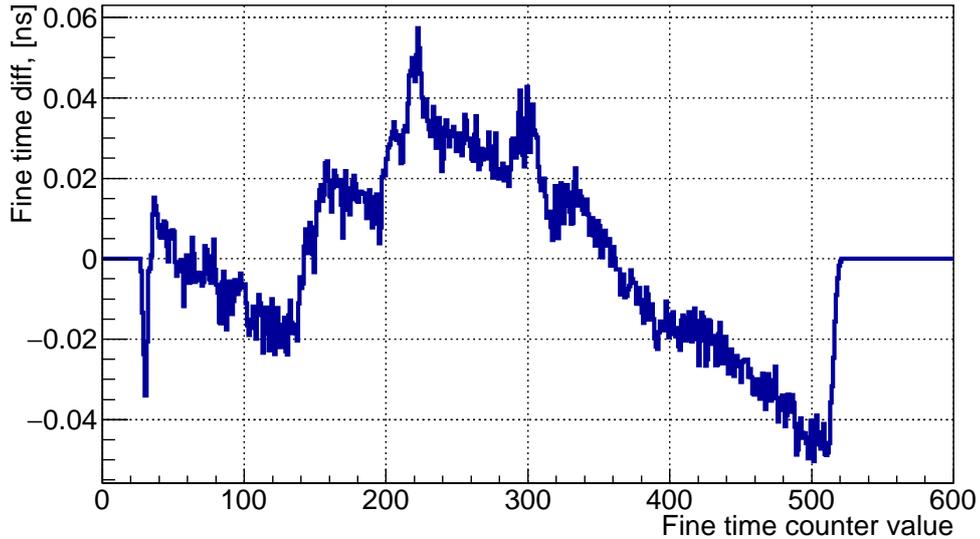


Рис. 5.1: Отклонение калибровочной кривой от линейной функции.

ных функций для всех каналов отображены на двумерной диаграмме на рис. 5.2. Видно, что хотя параметры и локализованы в двух областях, распределение достаточно компактное.

Для оценки влияния калибровки на точность регистрации временных отметок можно исследовать как одновременные фронты на разных каналах ВЦП, так и длительности прямоугольных импульсов во входных каналах, полученных с помощью высокоточного генератора прямоугольных импульсов. В работе [101] показано, что предельное временное разрешение в обоих случаях одинаково. Ниже мы используем второй подход.

В процедуре калибровки для каждого канала была выполнена замена точной калибровочной таблицы сначала индивидуальной линейной функцией данного канала, а потом общей функцией, усредненной по всем каналам (параметры этой функции показаны на рис. 5.2 сплошным квадратом). Полученные распределения измеренной ширины импульса в исследуемом входном канале показаны на рис. 5.3. Там же показаны результаты без калибровки.

Видно, что использование точной калибровочной таблицы необходимо для достижения предельного разрешения ВЦП. Ширина распределения разностей временных отметок в двух независимо флуктуирующих каналах ВЦП составляет 30 пс (FWHM), что соответствует временному разрешению 21 пс. Использование индивидуальной линейной функции приводит к увеличению ширины на полувысоте до 70 пс, а усреднённой — до 90 пс в наиболее неблагоприятных каналах (временное разрешение 50 пс и 64 пс соответственно). Отметим, что использование усредненной линейной функции для калибровки устраняет двухпиковую форму, характерную для распределения без калибровки, но в некоторых случаях приводит при этом к увеличению ширины.

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

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

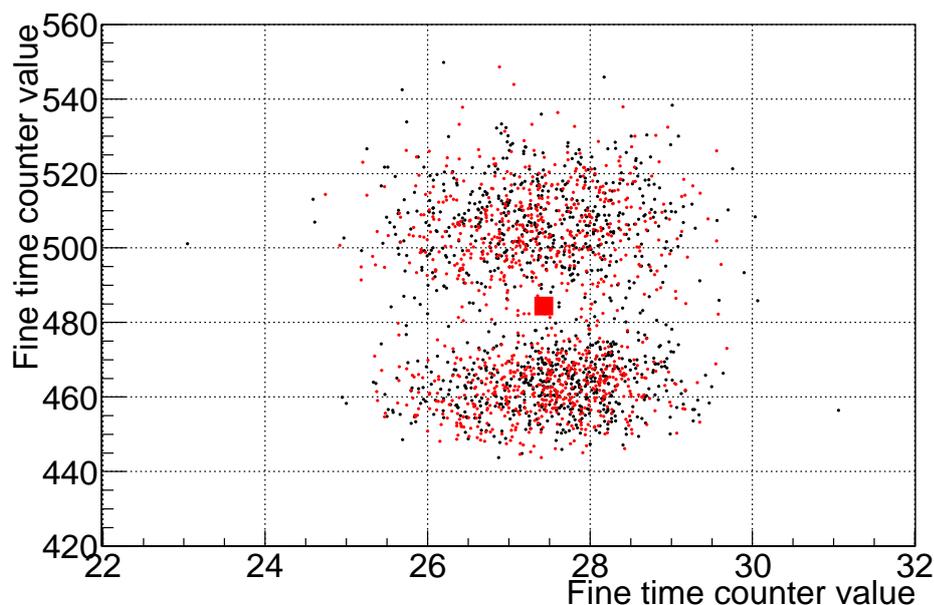


Рис. 5.2: Распределение координат точек излома аппроксимирующих кусочно-линейных функций. Квадратом отмечено среднее значение, используемое для усредненной линейной функции.

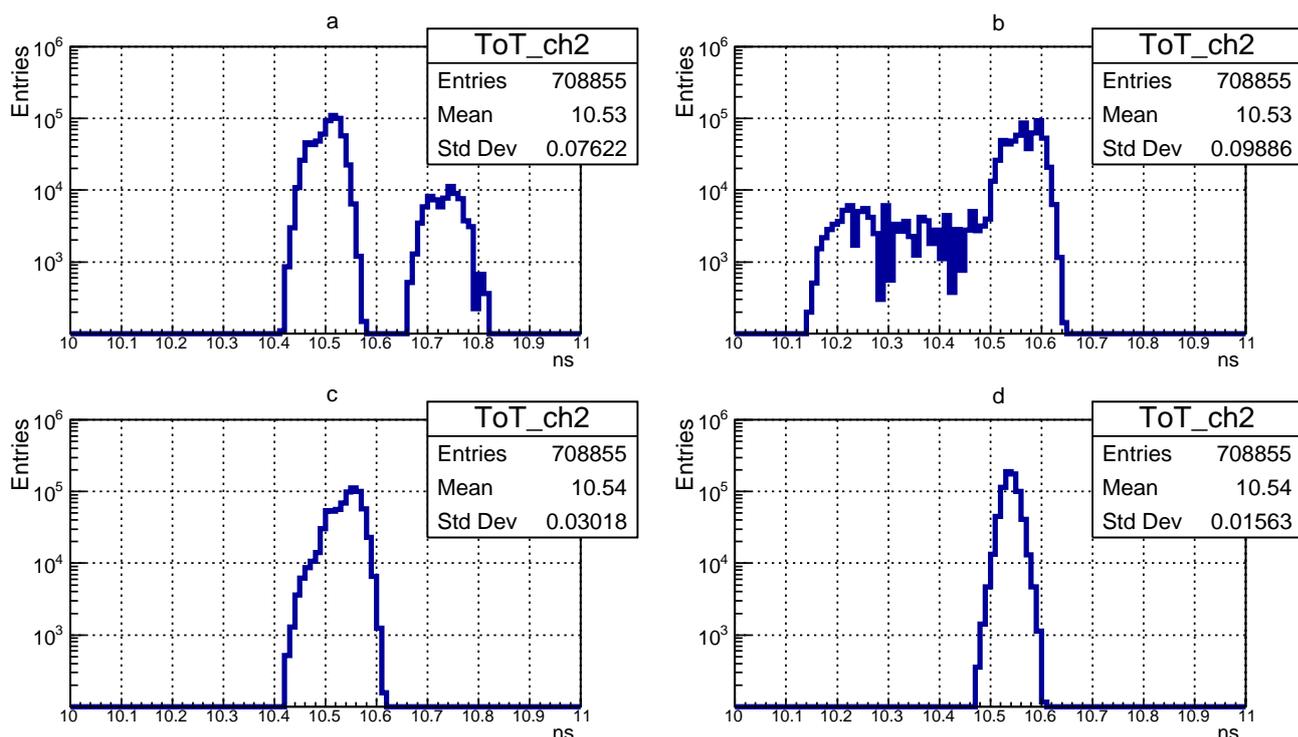


Рис. 5.3: Результаты измерения ширины импульса от генератора в случае: (а) без калибровки счётчика точного времени; (б) с применением усреднённой калибровочной функции; (с) с применением индивидуальной линейной калибровочной функции; (д) с применением полноценной калибровочной функции.

Приведённые выше таблицы калибровки были построены по массиву данных, содержащихся в семи файлах. Каждый файл соответствует двум минутам измерений при частоте генератора 5 кГц, т.е. около 600 тысяч вспышек лазера. Таким образом, всего было 4.2 миллиона вспышек за 14 минут, а один файл составляет приблизительно 15% от полного набора

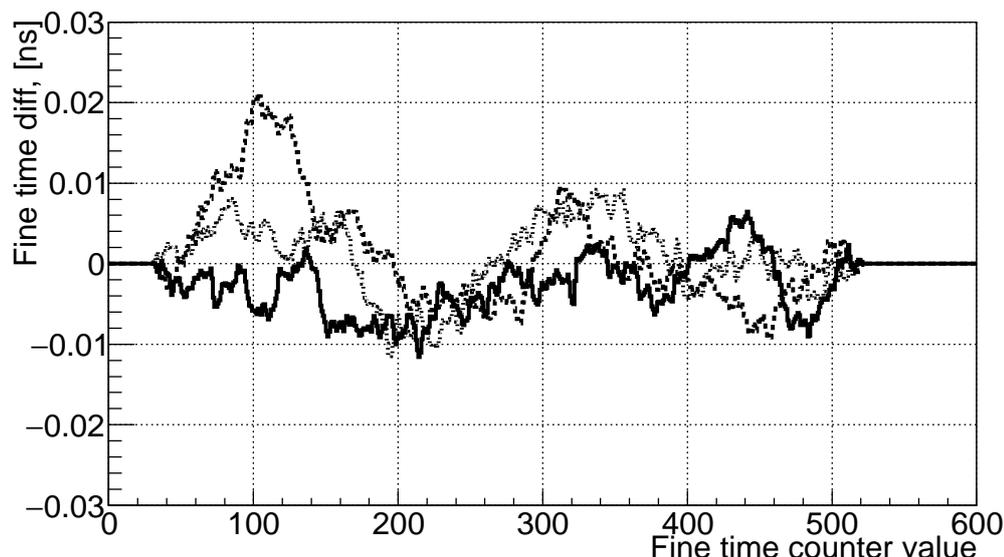


Рис. 5.4: Отклонения значений функций калибровки счётчика точного времени, полученных по различным группам по ≈ 50 тыс. фронтов, зарегистрированных в данном канале, от калибровочной функции, полученной по всему набору данных с ≈ 350 тыс. фронтов, зарегистрированных в данном канале.

данных. В каждом канале было зарегистрировано от 300 до 400 тысяч временных отметок, которые были использованы для выполнения калибровки. Для иллюстрации стабильности калибровки на рис. 5.4 показана разность функций калибровки, построенных по всему массиву данных и функций, построенных на файлах, составляющих $\approx 15\%$ данных каждый, взятых в начале, середине и конце набора данных. Видно, что отклонения в основном не превышают 10 пс, однако имеются редкие выбросы до 20 пс.

5.3 Определение коррекций задержек между каналами

Типичная гистограмма разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, показана на рис. 5.5. Такие гистограммы позволяют определить положение пика и, соответственно, ввести коррекцию задержки. Отметим, что наблюдается дрейф порядка 0.5 нс значений задержек, полученных таким образом, что даёт заметный вклад во временное разрешение системы считывания (см. раздел 5.4).

Наблюдается также аддитивность задержек, т.е. задержка в i -м канале относительно опорного может быть получена с точностью не хуже 400 пс как сумма задержки в j -м канале относительно опорного и задержки в i -м канала относительно j -го. Для некоторых пар каналов вид гистограммы отличается от показанной на рис. 5.5. См., например, рис. 5.6. Подобное распределение можно получить, если один из двух каналов является дефектным в том смысле, что к фронту логического сигнала подмешивается возбужденный или наведённый колебательный сигнал. Такая гипотеза подтверждается тем фактом, что форма гистограммы зависит от порога дискриминатора на плате PADIWA. При построении аналогичной гистограммы для пары дефектных каналов наблюдается до 5 пиков. Дальнейшее исследование проводилось с исключением дефектных каналов. Доля дефектных каналов составляет около 10% от полного числа каналов. При разработке следующей версии передней электроники для СВМ RICH особое внимание будет уделено электромагнитной чистоте каналов, а гистограммы, подобные обсуждаемым в данном разделе, будут использоваться в качестве диагностического инструмента.

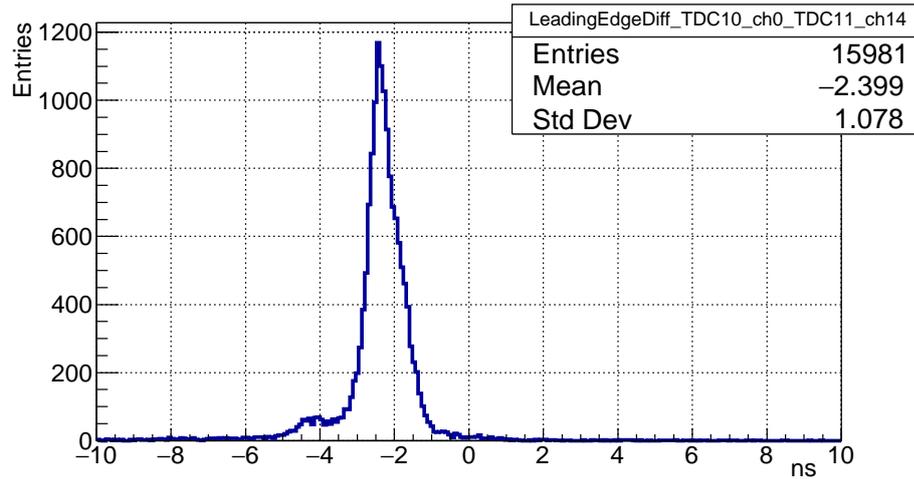


Рис. 5.5: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов.

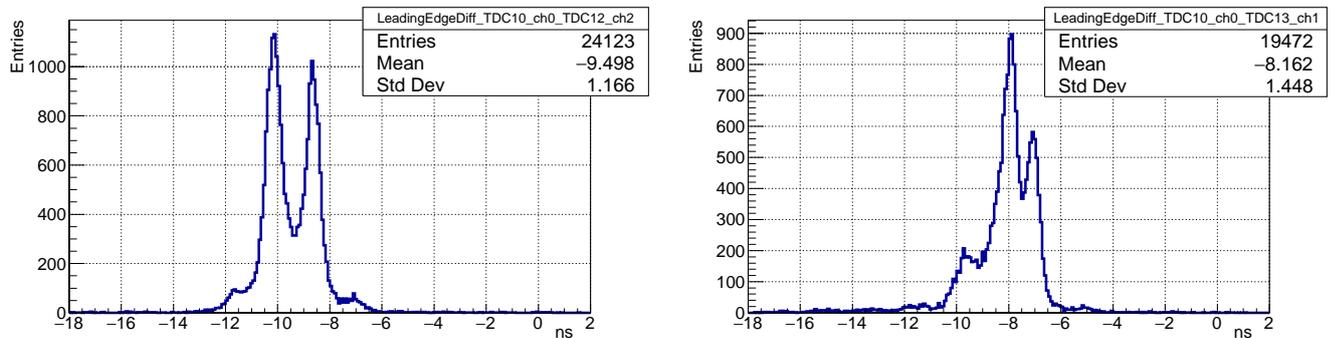


Рис. 5.6: Распределение разности временных отметок передних фронтов, соответствующих фотонам из одной вспышки лазера, зарегистрированных в заданной паре каналов, при условии, что один из каналов — дефектный.

5.4 Временное разрешение

В проведённых пучковых тестах имеют место два типа событий, в которых регистрируются несколько практически одновременно испущенных фотонов. Первый тип — это вспышка лазера, длительность которой ≈ 40 пс, т.е. на порядок меньше разброса времени прохождения сигнала через МА ФЭУ. Второй тип — черенковские кольца. Разброс времени прихода фотонов на МА ФЭУ может достигать 100 пс для колец и 70 пс для вспышек лазера, что определяется, в первую очередь, наклоном плоскости, в которой расположены фотокатоды. Анализ таких событий позволяет охарактеризовать временное разрешение всей системы считывания [105], начиная от окна МА ФЭУ и кончая формированием отметок времени. Временное разрешение одного канала определяется разбросом зарегистрированных временных отметок относительно времени прилёта фотона при многократных измерениях. Поскольку точное время прилёта фотона измерить нельзя, приходится исследовать разброс разностей временных отметок в паре каналов при регистрации одновременно пришедших фотонов. Временные отметки в каждом из каналов подвержены независимым флуктуациям по одинаковому закону, следовательно, измеренная ширина распределения будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем временное разрешение каждого канала. После применения коррекций задержек и калибров-

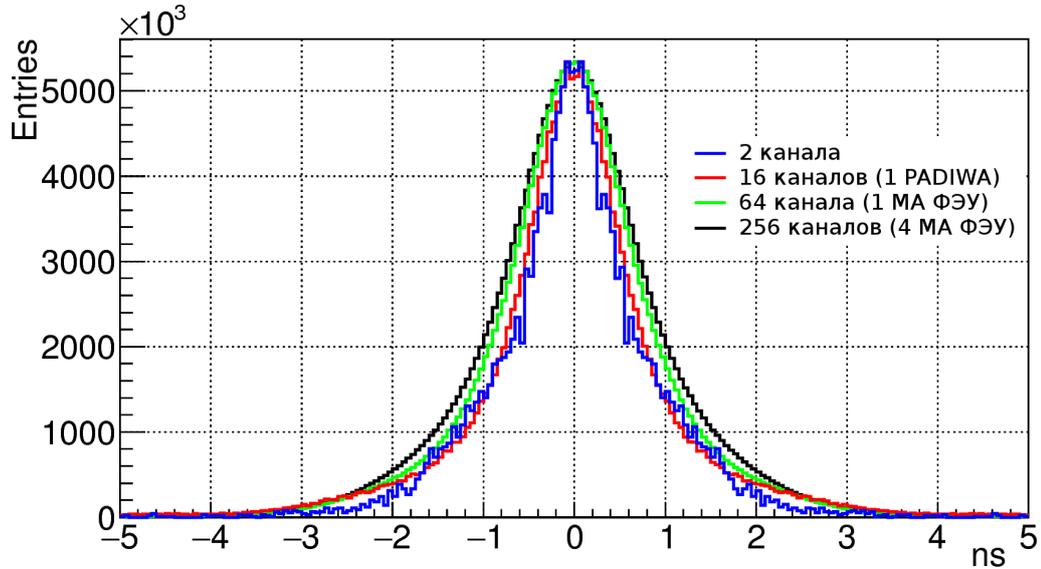


Рис. 5.7: Симметричные распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от лазера.

ки счётчика точного времени в двух каналах, ни один из которых не является дефектным, получается распределение аналогичное показанному на рис. 5.5, отличающееся лишь тем, что центр пика находится в нуле.

Полная ширина на полувысоте (FWHM) этого распределения составляет 750 пс, что соответствует временному разрешению 530 пс. Данное значение превосходит разброс времён прохождения сигнала в МА ФЭУ примерно в 2 раза. Причина расхождения объясняется двумя сравнимыми вкладами: дрейфом задержек в каналах и отсутствием коррекции момента пересечения порога в зависимости от амплитуды сигнала. Для реализации такой коррекции необходимо надёжное измерение времени над порогом, что в нашем случае невозможно, см. раздел 5.6.

Для того чтобы охарактеризовать временное разрешение системы в целом, помимо анализа пар каналов исследовались физически одновременные сигналы на следующих совокупностях каналов: (1) до 16 каналов, считываемых одной платой PADIWA, (2) до 64 каналов, принадлежащих одному МА ФЭУ, (3) до 256 каналов, принадлежащих четырём соседним МА ФЭУ. В каждом случае после коррекции задержек и калибровки счётчика точного времени проводился следующий анализ.

Событие содержит временные отметки t_i , $i \in [1 : M]$, где M — полное число пикселей. Каждая временная отметка характеризуется каналом ch , в котором она была зарегистрирована. Рассматриваются все пары временных отметок t_i, t_j , $i \neq j$. Рассчитывается разница $\Delta_{ij} = t_i - t_j$. Была рассмотрена возможность построения распределения, характеризующего точность взаимной временной привязки, двумя алгоритмами.

При первом подходе распределение делается симметричным за счёт учёта одной и той пары временных отметок с разными знаками. В гистограмму заносятся все рассчитанные Δ_{ij} . За счёт того, что i и j пробегает весь диапазон $[1 : M]$, в гистограмму попадают равные по значению, но разные по знаку $\Delta_{ij} = t_i - t_j$ и $\Delta_{ji} = t_j - t_i$. Распределения по данным от лазера, полученные таким образом, показаны на рис. 5.7. При втором подходе: если $ch_i > ch_j$, то $\Delta_{ij} = t_i - t_j$; если $ch_j > ch_i$, то $\Delta_{ij} = t_j - t_i$. В гистограмму заносятся все рассчитанные Δ_{ij} . Распределения по данным от колец, полученные вторым алгоритмом, показаны на рис. 5.8. Такой способ анализа позволяет увидеть небольшую неаддитивность задержек, связанную в неидеальностью электроники.

Так как черенковское кольцо, сфокусированное на область из четырёх соседних МА ФЭУ, проецируется лишь на часть пикселей, фактическое число исследованных каналов в случае черенковских колец отличается. В таблице 5.1 показано, как эволюционирует среднеквадратичное отклонение и FWHM в зависимости от числа каналов. Отметим, что среднеквадратичное отклонение меняется слабо, а FWHM возрастает с увеличением числа каналов, одновременно с тем, что распределение последовательно принимает форму, более близкую к распределению Гаусса. Аналогичные распределения были построены и для случая, когда на МА ФЭУ был нанесен сместитель спектра. Результаты также отображены на рис. 5.8 и в таблице 5.1. В некоторых случаях наблюдаются смещения максимумов от нуля в пределах 100 пс, что связано с разностью хода света до различных пикселей.

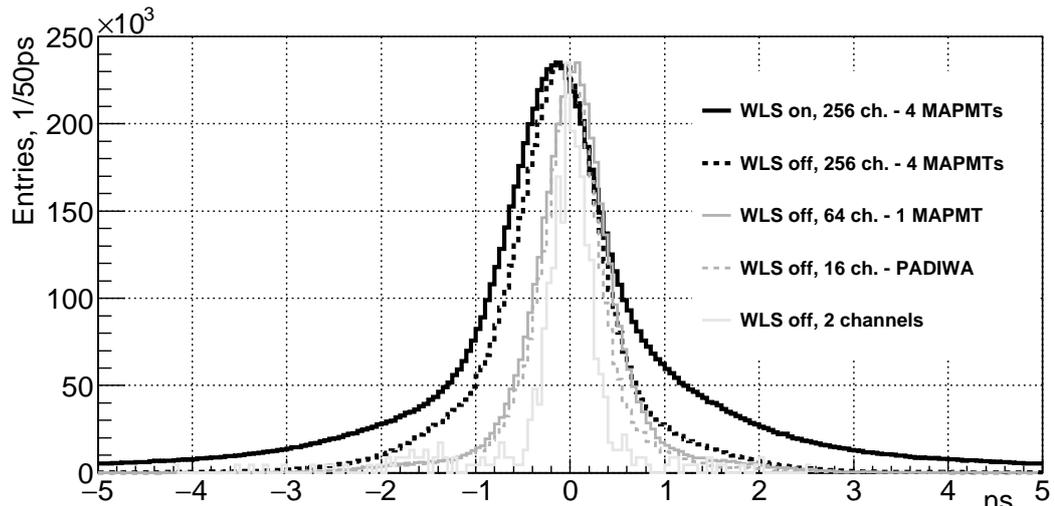


Рис. 5.8: Несимметричные распределения для четырёх различных наборов каналов для событий от черенковских колец.

Таблица 5.1: FWHM и RMS несимметричных распределений, полученные с помощью второго алгоритма, при различных наборах исследуемых каналов.

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

5.5 Исследование профиля высвечивания сместителя спектра

Анализ распределения во времени хитов, принадлежащих одному черенковскому кольцу, позволяет исследовать временные свойства сместителя спектра [106]. 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 на 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, вычсть 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. 5.9, а разность этих распределений — на рис. 5.10. 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.

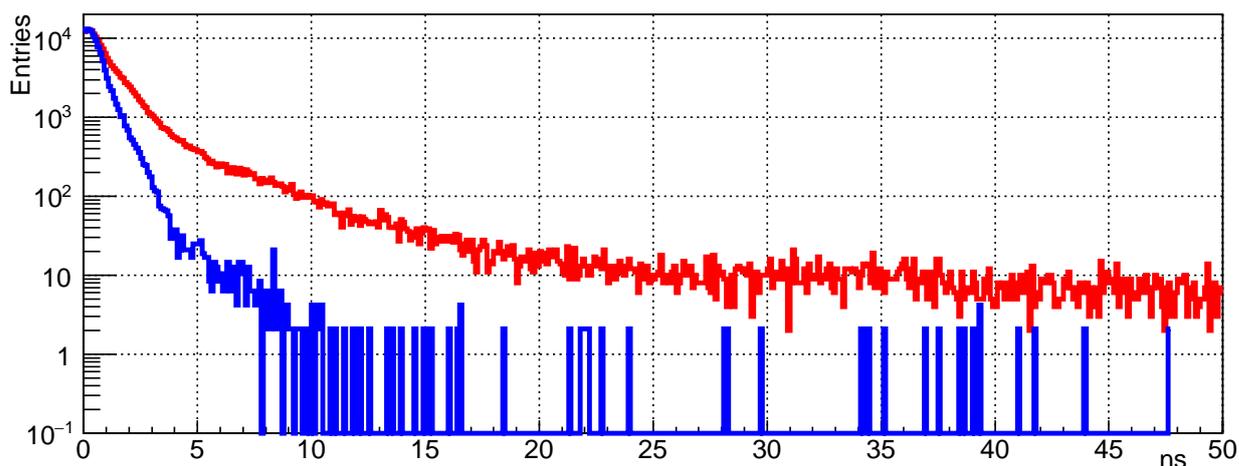


Рис. 5.9: Измеренные распределения, соответствующие кривым высвечивания со сместителем спектра (красный, выше) и без него (синий, ниже).

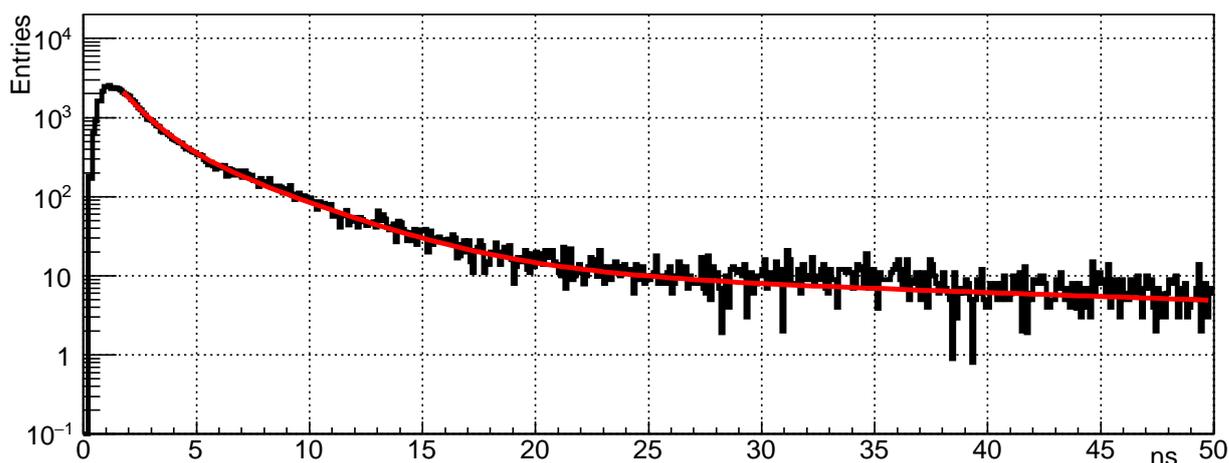


Рис. 5.10: Разница распределений со сместителем спектра и без него и кривая — результат фитирования распределения суммой трёх экспонент.

Указанная выпуклость не позволяет надёжно извлечь характерные времена высвечивания. Интересно, тем не менее, сравнить полученную кривую с результатами флуориметрических исследований.

Стеклянная пластина 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 [107]. Были получены значения времён высвечивания 1.4 нс, 3.8 нс, и 45 нс и соответствующие относительные интенсивности компонент 1.8996, 1.0000, и 0.8364 (см. рис. 5.11).

Подгонка кривой с рис. 5.10 суммой трех экспонент с указанными выше 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 флуориметрическими 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.

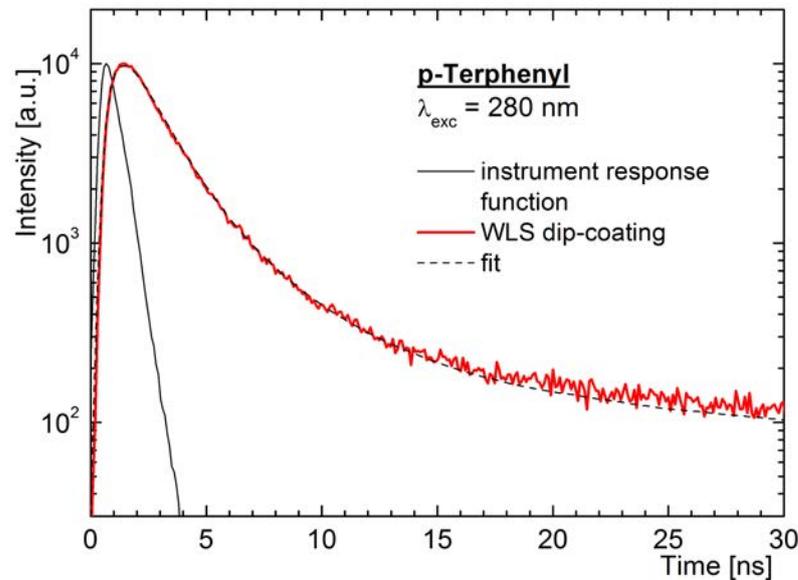


Рис. 5.11: Результаты флуориметрических исследований сместителя спектра. Рисунок предоставлен М. Dürr.

В пределе большого числа хитов в кольце использованный нами метод переходит в стандартный метод исследования флюоресценции путем счета единичных фотонов [108]. 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 характерных времён 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 метода определения времён высвечивания.

Практическая ценность проведенного исследования состоит в том, что может быть оптимизирована длительность окна, в пределах которого хиты принимаются одновременными и могут быть приписаны одному событию. Для этого необходимо найти баланс между числом дополнительных хитов, полученных благодаря сместителю спектра и вероятностью наложе-

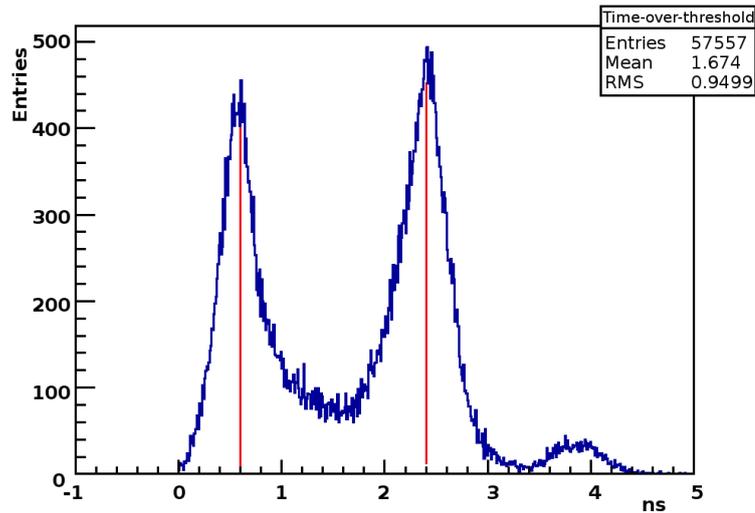


Рис. 5.12: Типичное распределение ToT.

ния сигналов друг на друга или подхвата в кольцо темнового хита. Например, прирост хитов в 19% может быть достигнут при длительности окна 15 нс.

5.6 Время над порогом

Время над порогом (ToT — time over threshold) — это параметр найденного хита, содержащий в себе, при нормальной работе, информацию об амплитуде зарегистрированного сигнала. В системе считывания и сбора данных CBM RICH ToT может быть использовано для улучшения временного разрешения путём коррекции времени пересечения порога с учетом амплитуды (walk correction), а также для повышения качества отделения однофотоэлектронного сигнала от шума. На рис. 5.12 показано типичное распределение ToT, измеренное с помощью лазера в лабораторных условиях. Вопреки ожиданиям, это распределение имеет несколько пиков. Такая структура, согласно [109], может быть объяснена наличием периодической наводки как на входе дискриминатора, так и между выходом дискриминатора и входом ВЦП. На рис. 5.13 показан экран цифрового осциллографа в режиме накопления сигналов, полученных путем подключения активного зонда к выходу PADIWA. Видно, что сгущение сигналов соответствует наблюдаемым пикам в распределении ToT; имеет место проблема недостаточности амплитуды одноэлектронного сигнала для устойчивой генерации логической единицы; имеется периодическая наводка на выходе дискриминатора, но ее недостаточно для объяснения наблюдаемой картины; преобладание определенных длительностей логических сигналов позволяет предположить наличие периодической структуры во входном сигнале. Все это говорит о необходимости подстройки аналоговой части для формирования на входе PADIWA более чистого сигнала большей амплитуды и о защите соединения между дискриминатором и ВЦП от наводок. Подобные изменения будут, с учетом результатов данной работы, реализованы в следующем прототипе платы передней электроники, называемой DIRICH [42].

Отметим, что указанные проблемы не являются критичными в случае CBM 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.

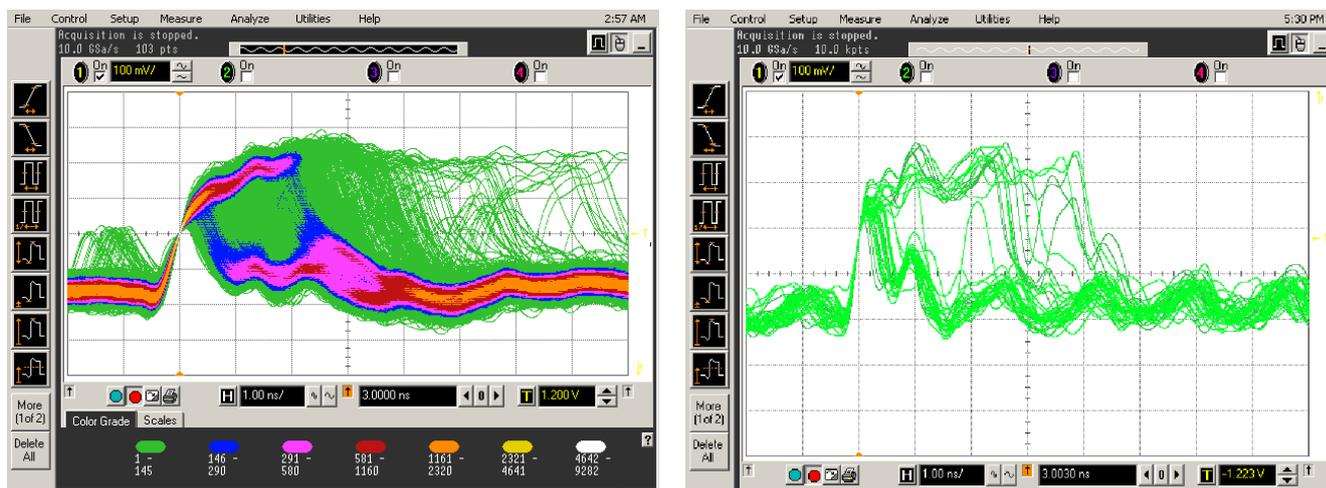


Рис. 5.13: Экран осциллографа, показывающий выходные сигналы PADIWA, регистрируемые по переднему фронту. Правая и левая панели рисунка отличаются временем накопления сигналов.

5.7 Сравнение одноэлектронных спектров при временном и амплитудном считывании

Как отмечено в разделе 4.1, 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 [104], см. описание лабораторного стенда в разделе 4.3.2. Далее, результаты амплитудных измерений были сопоставлены с данными, полученными с помощью платы PADIWA.

Амплитудные измерения с низким порогом продемонстрировали наличие заметного пика в малых амплитудах в спектре событий, скоррелированных с источником света. Также были выполнены специальные измерения с маской, открывающей только два разнесенных друг от друга на 2.5 см. пикселя. Эти измерения позволили установить, что событие с малой амплитудой в одном из каналов имеет место тогда, когда в другом канале, находящемся в том же ряду диодной системы, был зарегистрирован фотоэлектрон с достаточно большой амплитудой. Таким образом, для каналов с низкими шумами амплитудный спектр одноэлектронных сигналов выглядит как на рис. 5.14.

Пик вблизи нуля соответствует наводке, возникающей в каналах, расположенных в одном ряду с тем, где зарегистрирован одноэлектронный сигнал. Двугорбое распределение справа соответствует настоящим одноэлектронным сигналам. Причем левый пик связан с описанными в разделе 4.1 событиями, когда электронная лавина или её часть отклоняется от оптимального пути от диода к диоду. Отметим, что в большинстве каналов уровень шумов оказывается слишком высоким для отделения низкоамплитудного пика, связанного с наводкой, от одноэлектронного сигнала. Таким образом, попытка получить максимальную эффективность регистрации за счет снижения порога приводит к возрастанию паразитных хитов, локализованных не в тех пикселях, где родился фотоэлектрон. Для снижения числа паразитных хитов мы ставили порог регистрации в ложбине между низко- и высоко-амплитудными частями одноэлектронного спектра. Поскольку формы одноэлектронных спектров во всех каналах подобны, анализ формы спектра на рис. 5.14 позволяет заключить, что выбранный нами порог приводит к потере 12 % одноэлектронных импульсов.

Одно из отличий канала считывания в плате PADIWA — это значительно более быстрая, чем в n-XYTER аналоговая часть. Если в n-XYTER осуществляется формирование со време-

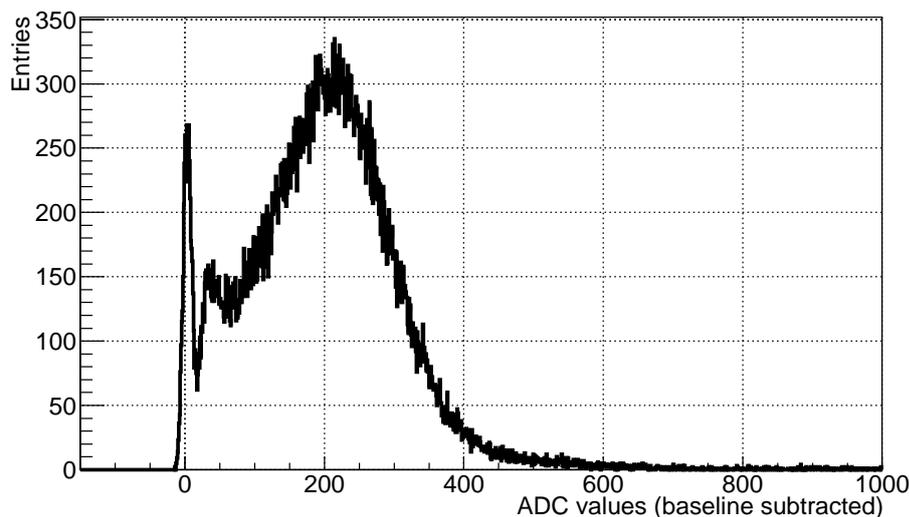


Рис. 5.14: Пример измеренного одноэлектронного спектра, имеющий особую форму, характерную для МА ФЭУ Н12700.

нем интегрирования 190 нс, то в PADIWA происходит лишь подавление частот выше 100 МГц, что соответствует характерному времени нарастания сигнала несколько наносекунд. Такое отличие приводит к возрастанию роли быстрых шумов и наводок при регистрации сигналов с помощью PADIWA.

Информация о форме одноэлектронного спектра при считывании с помощью канала на основе плат PADIWA и TRB v3 может быть получена в виде зависимости от порога регистрации скорости счёта в событиях, построенных вблизи триггера светового импульса. Такие данные могут быть получены из анализа потока данных, набранных при различных значениях порога. Использование счетчика зарегистрированных фронтов, реализованного непосредственно в ВЦП и упомянутого в разделе 4.2, даёт возможность получить аналогичную зависимость без отбора вокруг триггера, но позволяет достичь максимальных частот, достаточных для локализации базовой линии. На рис. 5.15 показана зависимость частоты триггеров от порога регистрации. Плечо слева соответствует одноэлектронному спектру, более подробно исследованному ниже, а быстро возрастающие границы вокруг вертикальной штриховой линии ограничивают локализацию базовой линии. Точность локализации базовой линии мы оцениваем как ± 200 отсчетов по шкале, использованной на рис. 5.15 и рис. 5.16(b,d).

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

Интересно сравнить зависимость скорости счёта от порога при использовании двух систем считывания и одинаковых условиях засветки. Результаты такого сравнения для одного из типичных каналов показаны на рис. 5.16. В случае n-XYTER в таком сравнении может быть использован интеграл одноэлектронного спектра, показанный на рис. 5.16(c). Соответственно, производная указанной зависимости может быть сопоставлена с одноэлектронным спектром, показанным на рис. 5.16(a). Сплошная линия на рис. 5.16(b) получена дифференцированием кривой, показанной красным цветом на рис. 5.16(d) и полученной подгонкой измеренной зависимости полиномом 7-й степени. Отметим, что мы оцениваем равенство световых потоков как $\pm 5\%$. Видно, что скорости счёта в области ложбины и максимума одноэлектронного спектра приблизительно совпадают. Амплитуды, соответствующие максимуму и ложбине соответственно, относятся как 2.6 в обоих случаях. При этом, в случае PADIWA наблюдается, с одной стороны более явно выраженная ложбина, а с другой — избыток счёта в малых амплитудах, что предполагает больший относительный вклад наводок и, следовательно-

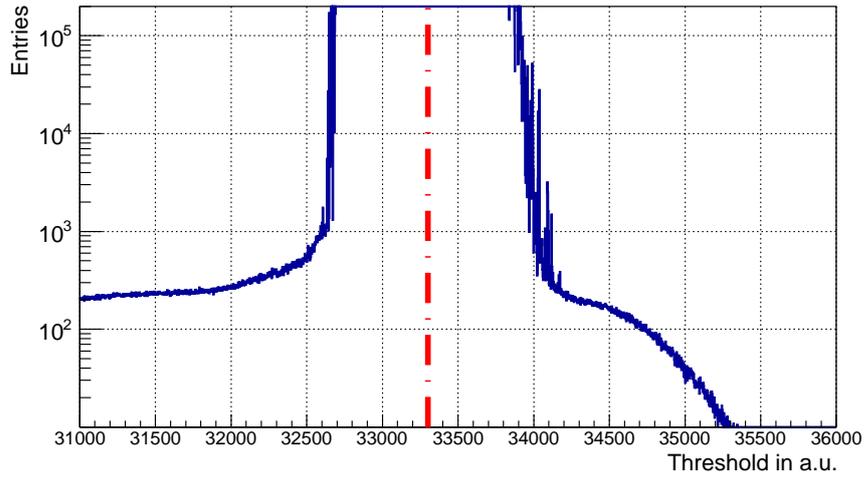


Рис. 5.15: Скан по порогам дискриминатора в диапазоне, включающем базовую линию, изображённую штрихпунктирной линией.

но, невозможность отделения от них низкоамплитудной части одноэлектронного спектра и нецелесообразность повышения эффективности за счёт установления порога ниже ложбины. Таким образом, становятся понятны особенности одноэлектронного спектра при регистрации временным трактом.

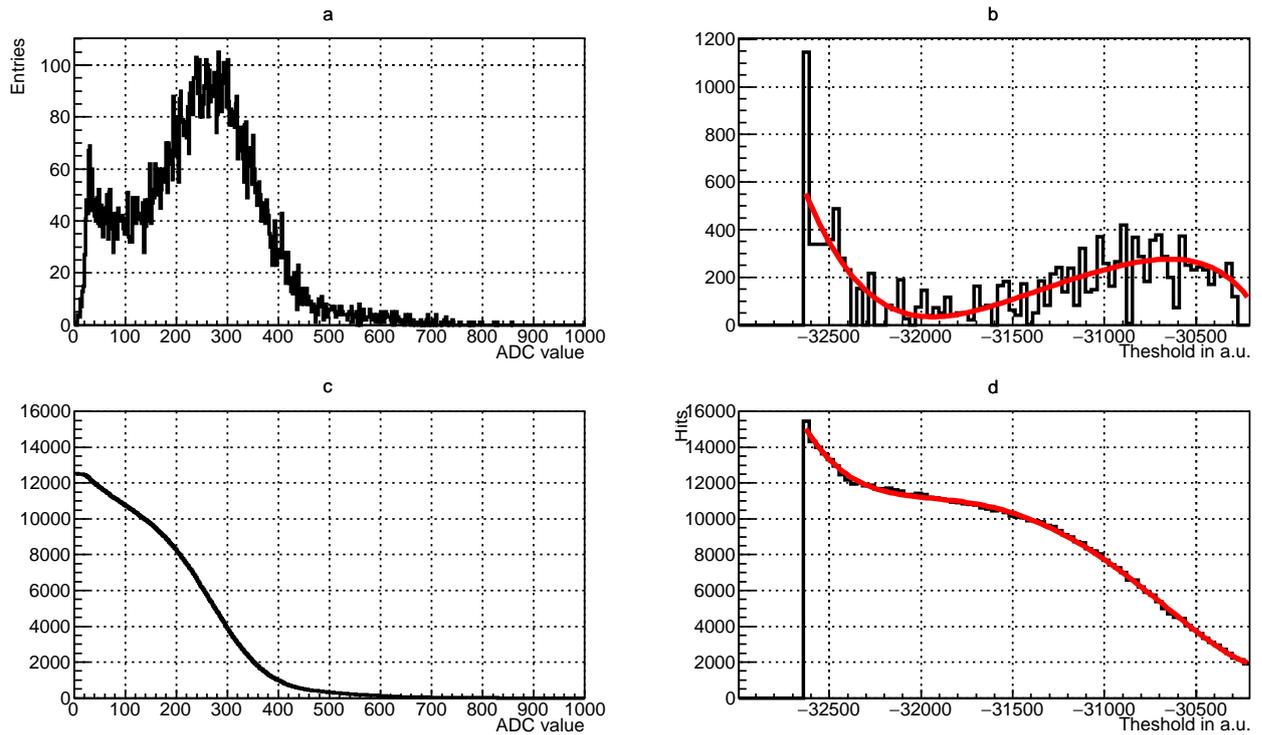


Рис. 5.16: Сравнение (а) одноэлектронного спектра, измеренного напрямую с помощью системы считывания на базе n-XYTER, и (b) производной скана по порогам, полученного с помощью системы считывания на базе PADIWA и TRB v3; сравнение (c) интеграла одноэлектронного спектра и (d) зависимости скорости счёта от порога дискриминатора.

Заключение

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 CBM 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 CBM, R3B, PANDA на FAIR.
3. Разработано программное обеспечение для: приёма и обработки бестриггерного 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 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 диодов “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.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю С.Г. Белогурову, руководителю группы CBM RICH С. Höhne за разностороннюю поддержку проведённых исследований, Р. Malzaher, F. Carminati, В.В. Иванову за создание благоприятной атмосферы для выполнения работы, а также Ю.В. Берчуну, В.Н. Щетинину, Е.В. Ошкиной за вклад в “CATIA-GDML geometry builder”. Автор признателен коллегам Ю.Г. Рябову, А.В. Ханзадеву, и В.М. Самсонову за поддержку, С. Pauly, A. Gheata, D. Bertini, F. Uhlig, М.В. Зызаку за консультации, обсуждения и полезные советы а также С.А. Лебедеву и J. Bendarouach за высокую ответственность при выполнении совместных работ.

Список литературы

- [1] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp, P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments, Lect. Notes Phys. **814** (2011)
- [2] *CBM Collaboration* // Challenges in QCD matter physics — The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR, Eur. Phys. J. **A53**, no.3, 60 (2017)
- [3] Courtesy of Paul Sorensen and Chun Shen, <http://u.osu.edu/vishnu/>
- [4] *S. Wheaton, J. Cleymans, M. Hauer* // THERMUS — A Thermal Model Package for ROOT, Computer Physics Communications **180**, pp. 84–106 (2009)
- [5] *P. Senger, V. Friese* // The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100, GSI, Darmstadt (2012)
- [6] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report, GSI, Darmstadt (2005)
- [7] *I. Selyuzhenkov, A. Toia* // CBM Progress Report 2016, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)
- [8] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN 3-9811298-0-6, GSI, Darmstadt (2006)
- [9] Официальный сайт коллаборации NUSTAR:
<http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/nustar.html>
- [10] Официальный сайт эксперимента PANDA: <https://panda.gsi.de/>
- [11] Официальный сайт коллаборации APPA:
<http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/appa.html>
- [12] *A. Malakhov, A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013)
- [13] *M. Koziel* // MVD Status: Integration, 25th CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20–24 April 2015: <https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=17&sessionId=9&resId=0&materialId=slides&confId=2960>
- [14] *J. Heuser et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS), GSI, Darmstadt (2013)
- [15] *C. Höhne* // Technical Design Report for the CBM Ring Imaging Cherenkov Detector, GSI, Darmstadt (2013)
- [16] *S. Chattopadhyay et al.* // Technical Design Report for the CBM: Muon Chambers (MuCh), GSI, Darmstadt (2015)

- [17] *S. Biswas et al.* // Development of a GEM based detector for the CBM Muon Chamber (MUCH), JINST **8**, C12002 (2013)
- [18] *M. Petris et al.* // TRD detector development for the CBM experiment, NIM **A732**, pp. 375–379 (2013)
- [19] *N. Herrmann* // Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF), GSI, Darmstadt (2014)
- [20] *I. Korolko, M. Prokudin, Yu. Zaitsev* // The CBM ECAL, J. Phys.: Conf. Ser. **798**, 012164 (2017)
- [21] *F. Guber, I. Selyuzhenkov* // Technical Design Report for the CBM Projectile spectator detector (PSD), GSI, Darmstadt (2015)
- [22] *M. Wiebusch, P. Klaus* // Design and Electronics of the CBM Micro-Vertex-Detector, TWEPP 2015 Poster [137]
- [23] Официальный сайт проекта SPADIC: <http://spadic.uni-hd.de/>
- [24] *M. Ciobanu, N. Herrmann, K. D. Hildenbrand, M. Kis, A. Schuttauf* // PADI, a fast Preamplifier - Discriminator for Time-of-Flight measurements, Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE (2008)
- [25] *W. M. Zabolotny, G. Kasprowicz* // Data processing boards design for CBM experiment, Proc. SPIE **9290**, 929023 (2014)
- [26] *J. de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM Experiment at FAIR, J. Phys.: Conf. Ser. **331**, 022006 (2011)
- [27] *V. Akishina, I. Kisel* // Time-based Cellular Automaton track finder for the CBM experiment, J. Phys.: Conf. Ser. **599**, 012024 (2015)
- [28] *S. Gorbunov, U. Kebschull, I. Kisel, V. Lindenstruth, W.F.J. Müller* // Fast SIMDized Kalman filter based track fit, Computer Physics Communications **178**, pp. 374–383 (2008)
- [29] *J. Engelfried* // Cherenkov light imaging — fundamentals and recent developments, NIM **A639**, pp. 1–6 (2011)
- [30] *G. K. Mallot* // The COMPASS spectrometer at CERN, NIM **A518**, pp. 121–124 (2004)
- [31] *F. Tessarotto et al.* // Long term experience and performance of COMPASS RICH-1, JINST **9**, C09011 (2014)
- [32] *Ö. Çobanoğlu et al.* // A full custom front-end ASIC Prototype “CMAD” for COMPASS-RICH-1 particle detector system, Proc. Ph.D research in microelectronics and electronics conf. (2008)
- [33] *M. Adinolfi et al.* // Performance of the LHCb RICH detector at the LHC, Eur. Phys. J. **C73**, 2431 (2013)
- [34] *I. Arino et al.* // The HERA-B ring imaging Cherenkov counter, NIM **A516**, pp. 445–461 (2004)
- [35] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Conception and design of a control and monitoring system for the mirror alignment of the CBM RICH detector, NIM **A876**, pp. 119–122 (2017)

- [36] *J. Bendarouach, C. Höhne, T. Mahmoud* // Mirror misalignment control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p. 56, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [37] *J. Bendarouach for the CBM collaboration* // Conception and design of a control and monitoring system for the mirror alignment of the CBM RICH detector, J. Phys.: Conf. Ser. **742**, 012007 (2016)
- [38] *J. Adamczewski-Musch et al.* // RICH summary CBM Progress Report 2015, p. 44, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [39] *S. Costa, S. Dalla Torre, D. Faso, J-Ch. Gayde, A. Latina, F. Tessarotto* // CLAM, a continuous line alignment and monitoring method for RICH mirrors, NIM **A553**, pp. 135–139 (2005)
- [40] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Influence of wavelength-shifting films on multianode PMTs with UV-extended windows, NIM **A783**, pp. 43–50 (2015)
- [41] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Wavelength shifting films on multianode PMTs with UV-extended window for the CBM RICH detector, NIM **A766**, pp. 180–182 (2014)
- [42] *J. Michel et al.* // Electronics for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, JINST **12**, C01072 (2017)
- [43] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal
- [44] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Event reconstruction in the RICH detector of the CBM experiment at FAIR, NIM **A766**, pp. 250–254 (2014)
- [45] *С.А. Лебедев, Г.А. Ососков* // Быстрые алгоритмы распознавания колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента CBM, Письма в ЭЧАЯ, т. **6**, № 2(151), стр. 260–284 (2009)
- [46] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment at FAIR, Proc. ACAT2010 (2010)
- [47] *M. Bleicher et al.* // Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **25**, p. 1859 (1999)
- [48] *Голованов Н.Н.* // Геометрическое моделирование, 2002 Физматлит ISBN 5-94052-048-0
- [49] *Морозов Е.М., Левин В.А., Вершинин А.В.* // Прочностной анализ: Фидесис в руках инженера, 2015 ЛЕНАНД ISBN 978-5-9710-2525-2
- [50] Официальный сайт проекта «Netgen/NGSolve»: <https://ngsolve.org/>
- [51] Документация GEANT4: <http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml>
- [52] Документация ROOT: <https://root.cern.ch/guides/users-guide>
- [53] Официальный сайт проекта «AIDA»: <http://aidasoft.web.cern.ch/>
- [54] Официальный сайт проекта «USOLIDS»: <http://aidasoft.web.cern.ch/USolids>
- [55] <https://fairroot.gsi.de/?q=node/32>
- [56] Официальный сайт GDML: <https://gdml.web.cern.ch/GDML/>

- [57] Официальный сайт FASTRAD: <http://www.fastrad.net/>
- [58] *C. Luzzi, F. Carminati* // TGeoCad: an Interface between ROOT and CAD Systems, J. Phys.: Conf. Ser. **523**, 012017 (2014)
- [59] Официальный сайт проекта «Open CASCADE Technology»: <https://www.opencascade.com/content/core-technology>
- [60] *T. Stockmanns* // STEP-to-ROOT — from CAD to Monte Carlo Simulation, J. Phys.: Conf. Ser. **396**, 022050 (2012)
- [61] *S. Belogurov, Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko, A. Semennikov* // CATIA-GDML geometry builder, J. Phys.: Conf. Ser. **331**, 032035 (2011)
- [62] *S. Belogurov, Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko, V. Schetinin* // Development and application of CATIA-GDML geometry builder, J. Phys.: Conf. Ser. **513**, 022003 (2014)
- [63] Официальный сайт проекта «CATIA-GDML geometry builder»: https://gitlab-hybrilit.jinr.ru/cad2gdml/CATIA-GDML_geometry_builder/wikis/home
- [64] *J. Adamczewski-Musch et al.* // The RICH detector of the CBM experiment, NIM **A876**, pp. 65–68 (2017)
- [65] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector, NIM **A766**, pp. 221–224 (2014)
- [66] *J. Adamczewski-Musch et al.* // The CBM RICH detector, JINST **11**, no. 05 C05016 (2016)
- [67] *E. Ovcharenko, S. Belogurov, C. Höhne, S. Lebedev, T. Mahmoud, V. Schetinin* // Parameterized geometric model of the updated CBM RICH detector, CBM Progress Report 2013, p. 97, ISBN 978-3-9815227-1-6, GSI, Darmstadt (2014)
- [68] *S. Lebedev, C. Höhne, E. Ovcharenko* // Implementation of the new RICH geometry in CBMROOT, CBM Progress Report 2015, p. 119, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [69] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne, Yu. Ryabov* // Different layouts of a mirror support structure for the RICH detector, CBM Progress Report 2014, p. 65, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [70] *E. Ovcharenko, S. Lebedev, T. Mahmoud, C. Pauly, Yu. Ryabov, C. Höhne, V. Schetinin* // Update of the MC-geometry of the RICH detector, CBM Progress Report 2015, p. 47, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [71] Документация МА ФЭУ Hamamatsu H12700: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf
- [72] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne* // First simulation results with the new cylindrical RICH geometry, CBM Progress Report 2016, pp. 66–67, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)
- [73] *I. Kres, T. Mahmoud, C. Pauly, C. Höhne* // RICH geometry optimization, CBM Progress Report 2016, pp. 64–65, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)

- [74] *C. Welzbacher, T. Mahmoud, C. Pauly, C. Höhne* // RICH design with tilted mirrors, CBM Progress Report 2012, p. 42, ISBN 978-3-9815227-0-9, GSI, Darmstadt (2013)
- [75] *E. Ovcharenko, P. Akishin, C. Pauly, T. Mahmoud, Yu. Ryabov, C. Höhne, V. Schetinin* // Development of the magnetic shielding box for the CBM RICH camera, CBM Progress Report 2015, p. 53, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [76] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes, JINST **10**, P09021 (2015)
- [77] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 multi-anode photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade, LHCb-INT-2015-006
- [78] Документация МА ФЭУ Hamamatsu H8500:
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E.pdf
- [79] *J. Adamczewski-Musch et al.* // The CBM RICH project, NIM **A845**, pp. 434–438 (2017)
- [80] *J. Adamczewski-Musch et al.* // The CBM RICH project, NIM **A766**, pp. 101–106 (2014)
- [81] *J. Adamczewski et al.* // The CBM RICH detector, JINST **9**, C06002 (2014)
- [82] Photomultiplier tubes, Basics and Applications, Hamamatsu Photonics K.K.
- [83] Официальный сайт проекта «TRB»: <http://trb.gsi.de/>
- [84] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, M. Traxler* // A novel approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS) TDC in an FPGA, JINST **11**, C01046 (2016)
- [85] Документация TRB v3: <http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf>
- [86] *C. Bergmann et al.* // Common CBM beam test of the RICH, TRD and TOF subsystems at the CERN PS T9 beam line in 2014, CBM Progress Report 2014, p. 9, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [87] *C. Bergmann et al.* // Test of Münster CBM-TRD real-size detector and radiator prototypes at the CERN PS/T9 beam line, CBM Progress Report 2014, p. 78, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [88] *M. Petris, D. Batros, G. Caragheorghropol et al.* // Prototype with the basic architecture for the CBM-TOF inner wall tested in close to real conditions, J. Phys.: Conf. Ser. **724**, 012037 (2016)
- [89] Информация о выводе пучка T9 ускорителя PS в CERN: http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf
- [90] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS SYSTEM,
<https://pdfs.semanticscholar.org/>
- [91] Roithner UVTOP240 datasheet: http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop240.pdf
- [92] Alphas Lasers Picopower-LD series datasheet: http://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf

- [93] *S. Manz, N. Abel, J. Gebelein, U. Keschull* // An universal read-out controller, JINST **5**, C11017 (2010)
- [94] *A.S. Brogna et al.* // The n-XYTER Reference Manual:
<https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Public/PublicNxyter/nXYTER.pdf>
- [95] *M. Al-Turany, D. Bertini* // CbmRoot: Simulation and Analysis framework for CBM Experiment, FAIR-QCD-CBM-10
- [96] Репозиторий разработки FLESnet: <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
- [97] *S. Lebedev, E. Ovcharenko, C. Höhne* // Data analysis for the RICH prototype beamtest data 2014, CBM Progress Report 2014, p. 64, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [98] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, C. Ugur* // HADES trbnet data formats for DABC and Go4, GSI Scientific Report 2012, PHN-SIS18-ACC-41, GSI, Darmstadt (2013)
- [99] *R. Szplet, J. Kalisz, R. Pelka* // Nonlinearity correction of the integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **46**, pp. 449–453 (1997)
- [100] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Разработка системы считывания и приёма данных детектора RICH эксперимента CBM, Приборы и техника эксперимента №3 (2018)
- [101] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Tests of the CBM RICH readout and DAQ prototype, Phys. Part. Nuclei Lett. **14**, no. 6, pp. 904–912 (2017)
- [102] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Development of the CBM RICH readout electronics and DAQ, NIM **A876**, pp. 246–248 (2017)
- [103] *J. Adamczewski-Musch, N. Kurz, S. Linev, P. Zumbruch* // Data acquisition and online monitoring software for CBM test beams, J. Phys.: Conf. Ser. **396**, 012001 (2012)
- [104] *I. Sorokin, M. Krieger, J. Lehnert, W. Müller, E. Ovcharenko, F. Uhlig* // Development of software tools for the prototype readout chains of the CBM Silicon Tracking System, CBM Progress Report 2014, p. 41, ISBN 978-3-9815227-2-3, GSI, Darmstadt (2015)
- [105] *E. Ovcharenko, S. Belogurov, C. Pauly* // Time precision of the CBM RICH readout system CBM Progress Report 2016, p. 76, ISBN 978-3-9815227-4-7, GSI, Darmstadt (2017)
- [106] *E. Ovcharenko, S. Belogurov, C. Pauly* // Study of p-terphenyl WLS effect on timing in the CBM RICH prototype, CBM Progress Report 2015, pp. 60–61, ISBN 978-3-9815227-3-0, GSI, Darmstadt (2016)
- [107] M. Dürr, частное сообщение
- [108] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon Counting, Academic Press, London 1984, ISBN 978-0-12-524140-3
- [109] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the presence of noise, NIM **A791**, pp. 16–21 (2015)