

**Объединённый институт ядерных исследований
Лаборатория физики высоких энергий**

Овчаренко
Егор Владимирович

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

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 - 2017

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 0.1 STAR@RHIC | 6 |
| 0.2 ALICE@LHC | 7 |
| 0.3 MPD@NICA | 7 |
| 0.3.1 CBM | 7 |
| 1 Эксперимент CBM@FAIR и особенности детектора черенковских колец CBM RICH | 14 |
| 1.1 Экспериментальная установка CBM | 16 |
| 1.1.1 Мишень, вакуумная камера и пучковая труба | 18 |
| 1.1.2 Вершинный микрорадиатор MVD | 18 |
| 1.1.3 Кремниевая трекинговая система STS | 19 |
| 1.1.4 Детектор черенковских колец RICH | 20 |
| 1.1.5 Мюонная система MUCH | 20 |
| 1.1.6 Детектор переходного излучения TRD | 21 |
| 1.1.7 Время-пролётный детектор TOF | 22 |
| 1.1.8 Электромагнитный калориметр ECAL | 25 |
| 1.1.9 Детектор PSD | 26 |
| 1.2 CBM RICH поподробней | 27 |
| 1.3 Обзор существующих детекторов черенковских колец | 27 |
| 1.3.1 COMPASS RICH-1 | 27 |
| Эксперимент COMPASS | 27 |
| Общие слова о COMPASS RICH и его физической задаче | 27 |
| Корпус и радиатор | 28 |
| Зеркала и опоры | 28 |
| Фотодетекторы | 28 |
| Электроника | 28 |
| 1.3.2 LHCb | 29 |
| Эксперимент LHCb | 29 |
| Общие слова о LHCb RICH и его физической задаче | 30 |
| Корпус и радиатор | 30 |
| Зеркала и опоры | 31 |
| Фотодетекторы | 32 |
| Электроника | 33 |
| 1.3.3 HERA-b RICH | 33 |
| Эксперимент HERA-b | 33 |
| Общие слова о HERA-b RICH и его физической задаче | 33 |

| | |
|--|-----------|
| Корпус и радиатор | 33 |
| Зеркала и опоры | 34 |
| Фотодетекторы | 34 |
| Электроника | 34 |
| 1.4 Обработка сигнала с детектора | 35 |
| 1.4.1 Система считывания и сбора данных эксперимента СВМ | 38 |
| 1.4.2 FLES | 39 |
| FLES Interface Board | 41 |
| Список литературы | 43 |

Введение

Одна из важнейших задач современной физики — это исследование уравнения состояния ядерного вещества. Для решения этой задачи необходимо определить границы существования различных фаз и описать их свойства. Совокупность теоретических представлений по данному вопросу отображается на фазовой диаграмме, см. рис. 1. Здесь по одной оси отложен барионный химический потенциал μ_B , связанный с плотностью барионов, а по другой — температура. Актуальные экспериментальные исследования направлены на установление границы между барионной материией и кварк-глюонной плазмой (КГП) [], локализацию критической точки и исследование свойств материи в указанных областях фазовой диаграммы.

Наиболее важны в этой области действующие эксперименты STAR@BNL и ALICE@LHC. Из строящихся экспериментов наиболее важны MPD@NICA и CBM@FAIR.



Рис. 1: Фазовая диаграмма барионной материи.

Таблица 1: Показатели экспериментов в области сверхплотной материи

| Эксперимент | Диапазон энергий (Au/Pb) | Частота взаимодействий, Гц |
|---------------|---|----------------------------|
| STAR@RHIC BNL | $\sqrt{s_{NN}}=7\text{--}200$ ГэВ | 1–800 |
| NA61@SPS CERN | $E_{kin}=20\text{--}160$ АГэВ $\sqrt{s_{NN}}=6.4\text{--}17.4$ ГэВ | 80 |
| MPD@NICA JINR | $\sqrt{s_{NN}}=4\text{--}11$ ГэВ | 7000 |
| CBM@FAIR GSI | $E_{kin}=2\text{--}35$ АГэВ $\sqrt{s_{NN}}=2.7\text{--}8.3$ ГэВ | $10^5\text{--}10^7$ |

Таблица 2: Наблюдаемые в области высокой плотности барионов

| Наблюдаемые | STAR@RHIC BNL | NA61@SPS CERN | MPD@NICA JINR | CBM@FAIR GSI |
|---|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Адроны | + | + | + | + |
| Корреляции, флуктуации при высокой статистике | | | + | + |
| Дилептоны | | | | + |
| Очарованные частицы | | | | + |

0.1 STAR@RHIC

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 был построен с ориентиром на максимально высокие энергии столкновения и предоставлял $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, однако с 2010 г. выполняется скан вниз по энергиям пучка, называемый Beam Energy Scan (BES) и разделённый на несколько фаз.

В 2010 и 2011 была выполнена первая фаза программы скана с пучками $Au + Au$ энергий 7.7, 11.5, 19, 27 и 39 ГэВ. Учитывая набранные ранее данные (62, 130 и 200 ГэВ), диапазон энергий $\sqrt{s_{NN}}$, измеренных на RHIC составляет 7.7–200 ГэВ. Этот диапазон энергий столкновения соответствует интервалу μ_B от 20 до 450 МэВ, в котором ожидается наличие перехода фазового первого рода и критической точки.

Вторая фаза BES запланирована на 2018–2019 гг. и будет сфокусирована на пучках $Au + Au$ при энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ от 20 до 7 ГэВ в режиме встречных пучков (коллайдера?) и $\sqrt{s_{NN}}$ от 7 до 3.5 ГэВ в режиме с мишенью.

Ключевые характеристики (T, μ_B) исследуемой области фазовой диаграммы могут быть извлечены из результатов измерений выходов адронов в столкновениях тяжёлых ионов. В первой фазе BES поперечный импульс определяется для $\pi, K, p, \Lambda, \Xi, K_S^0$ и ϕ . Отношения выходов частиц используются для нахождения условий “химического вымораживания” (состояния, когда устанавливаются выходы частиц) с помощью статистической термальной модели (THERMUS).

Таблица 3

| Энергия (ГэВ/нуклон) | Кол-во событий (млн.) | Время (недели) |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| 200 | 350 | 11 |
| 62.4 | 67 | 1.5 |
| 39 | 130 | 2 |
| 27 | 70 | 1 |
| 19.6 | 36 | 1.5 |
| 14.5 | 20 | 3 |
| 11.5 | 12 | 2 |
| 7.7 | 4 | 4 |

0.2 ALICE@LHC

The rate of Pb–Pb collisions in 2010 and 2011 was well below the ALICE limits and ALICE was able to take data at the highest achievable luminosity, on the order of $10^{25} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in 2010 and $10^{26} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ in 2011, with the corresponding hadronic μ being on the order of $10^{-5} - 10^{-4}$ and $10^{-4} - 10^{-3}$, respectively.

During the 2011 Pb–Pb running period, the interaction rate provided by the LHC reached 3–4 kHz. ALICE ran with the minimum bias, centrality, and rare triggers activated at the same time. With the multi-event buffering and with the minimum bias and centrality triggers down-scaled, the effective trigger dead time was low (dead-time factor of 33%). The situation will be similar in the LHC Run 2 (2015–2017), for which the expected collision rate is $O(10)$ kHz, still low enough to avoid pileup.

The LHC at CERN will provide colliding Pb ions with an energy of $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$.

It is expected that the LHC can deliver luminosities of $10^{27} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ for Pb–Pb collisions, which results in a minimum-bias interaction rate of 8 kHz. Lighter ions can be delivered with higher luminosities of up to $10^{29} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, corresponding to an interaction rate of several 100 kHz. The machine can deliver p–p luminosities up to $10^{31} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ but because of detector limitations this luminosity is restricted to $10^{30} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ for ALICE.

0.3 MPD@NICA

Коллайдерный комплекс на базе нуклотрона NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) предоставит пучки ионов золота в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}}$ от 4 до 11 ГэВ и luminosity порядка $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Наблюдаемые MPD. 1 этап: Выходы частиц и спектры Флуктуации от события к событию Фемтоскопия, включая π , K , p , Λ Коллективные потоки и идентификация адронов Электромагнитные измерения (e , γ)

2 этап: Полная множественность частиц Изучение асимметрии (лучшее определение плоскости реакции) Точное изучение дилептонов (расширение ECAL) Экзотические частицы (мягкие фотоны, гипер-ядра)

$$pi^+, K^+, p, \rho, \omega, \phi, \Omega, D^0, J/\psi$$

0.3.1 CBM

Физическая программа CBM состоит в следующем.

В экспериментах в ЦЕРНе и Брукхейвенской национальной лаборатории поиск критической точки осуществляется только посредством регистрации спектральных характеристик потоков вторичных частиц нескольких типов, рождающихся в большом количестве. Эксперименты FAIR, благодаря высокой интенсивности первичных пучков, открывают дополнительную возможность регистрировать редкие события со сканированием обширной области фазовой диаграммы по энергиям частиц. В частности планируется впервые непосредственно исследовать признаки возникновения “огненного шара” (fireball) — области ядерной материи, в которой произошёл переход от барионной фазы к кварк-глюонной фазе, — с помощью регистрации короткоживущих векторных мезонов, распадающихся на дилептонные пары.

Диапазон энергий FAIR 2–35 ГэВ/нуклон для ионов золота хорошо подходит для проведения экспериментов в области фазовой диаграммы с высокими плотностями ядерной материи, превосходящими нормальную плотность в 8–10 раз (уже было).

? В разных источниках числа расходятся. Где-то 35, где-то 45...

Физическая программа СВМ нацелена на исследование свойств сверхплотной барионной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях при энергии пучка от 2 до 45 ГэВ/нуклон . СВМ проектируется с учётом необходимости справляться с измерением высокой статистики адронных, лептонных и фотонных проб в большом акцептансе. Физическая программа включает в себя множество наблюдаемых, среди которых:

- выход и коллективный поток странных и очарованных адронов; ожидается что они отразят процесс становления деконфайнмента;
- коллективный поток адронов, который особенно чувствителен к уравнению состояния ядерного вещества на ранних стадиях реакций;
- производство частиц при пороговых энергиях (странные на SIS100 и очарованность на SIS300), которое может нести важную информацию об уравнении состояний ядерной материи;
- нестатистические отклонения от события к событию различных параметров (выходы частиц, отношения выходов), связанные с сохранением квантовых чисел (барионных, заряда, странности), которые могут служить сигналом о критической точке КХД;
- изменение адронных масс в среде, в частности изменение ?, которые предоставят ценную информацию о внутренних процессах при ожидаемом восстановлении киральной симметрии в плотной барионной материи.

? плоскость реакции - ?

Высокая интенсивность пучка и продолжительная его доступность позволяют СВМ впервые измерять редкие пробы, такие как очарованные адроны и лёгкие векторные мезоны (с помощью дилептонных распадов), в области энергий, предоставляемых FAIR.

Экспериментальная задача СВМ — измерять перечисленные наблюдаемые в A+A, p+A, p+p столкновениях как функцию энергии столкновения и размера системы с высокой точностью и статистикой, а также искать нарушения непрерывностей, которые могут служить сигналом о фазовом переходе первого уровня. Данная физическая программа будет выполняться измерением ядерных столкновений при экстремально высоких частотах взаимодействия.

Данная работа посвящена методически разработкам для детектора RICH, участвующего в измерении таких наблюдаемых как low mass vector mesons and J/psi по диэлектронному каналу.

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 надежные данные для подгонки сложных многопараметрических физических моделей. Особенно жесткие требования предъявляют эксперименты с фиксированной мишенью, поскольку, за счет релятивистского буста, частицы сконцентрированы в переднем конусе, а большая плотность мишени позволяет достигать высокие частоты взаимодействий.

В эксперименте СВМ, которому посвящена данная работа, 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 одной реакции, а максимальная угловая плотность частиц в центральной области детектора 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 возможности быстро модифицировать это описание с целью выполнения итерационных расчетов.

Также необходима разработка новых систем сбора данных, адекватных современному аппаратному обеспечению и ожидаемым потокам информации.

Кроме того, необходимы интенсивные исследования прототипов создаваемых детекторов.

В настоящей диссертации обсуждаются все три перечисленных аспекта в применении, в первую очередь, к детектору Черенковских колец эксперимента СВМ (далее СВМ RICH).

Цели:

- разработать инструментарий для облегчения создания детальных геометрических моделей, предназначенных для сред Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество Geant4 и ROOT, а также для обмена геометрической информацией между этими средами и САПР CATIA;
- создать гибкое и точное описание детектора СВМ RICH в среде CbmRoot и осуществить на основе этого описания оптимизацию конструкции и компоновки данного детектора;
- создать ПО для испытания прототипа системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH в составе полнофункционального прототипа указанного детектора на пучковых тестах;
- провести исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH на основе результатов пучковых тестов и измерений на лабораторном стенде.

Научная новизна результатов, полученных автором / Новизна и практическая ценность:?

1. Разработана схема отображения иерархии геометрии, используемой в моделировании транспорта частиц методом Монте Карло (МК), на дерево построений САПР CATIA v5.
2. В среде CATIA создан набор шаблонов для примитивов и сущностей конструктивной твердотельной геометрии, принятой в системах МК моделирования детекторов.
3. Создан набор инструментов для полуавтоматического построения детальной МК геометрии на основе САПР модели и быстрого обмена геометрией между САПР CATIA v5 и пакетами МК моделирования GEANT и ROOT.
4. Выполнены беспрецедентно точные параметризованные описания ряда приборов и детекторов в средах МК моделирования.

5. На основе детального параметризованного описания геометрии СВМ RICH выполнена оптимизация компоновки детектора.
6. Собран прототип системы считывания и сбора данных детектора СВМ RICH.
7. Разработано программное обеспечение для приема, упаковки и передачи бестриггерного потока данных с прототипа системы считывания и сбора данных с частотой до 20 МГц.
8. Разработано программное обеспечение для калибровки точного времени и относительных задержек каналов в потоке данных с детектора СВМ RICH.
9. Разработано программное обеспечение для построения событий из бестриггерного потока данных с детектора СВМ RICH в среде CbmRoot.
10. Проведены пучковые тесты прототипа системы считывания и сбора данных в составе полнофункционального прототипа детектора СВМ RICH и дополнительные тесты на лабораторном стенде.
11. Проведено комплексное исследование свойств канала считывания и сбора данных для СВМ RICH, реализованного на основе многоанодного ФЭУ H12700 с системой динодов “metal channel”, специально разработанных передней электроники типа предусилитель-дискриминатор и высокоточного ВЦП с последующим прямым вводом данных в единую среду моделирования, сбора и анализа данных CbmRoot.
12. Исследованы временные свойства нанесенного на окно МА ФЭУ смеcтиеля спектра при возбуждении черенковскими фотонами.
13. Изучены возможности работы канала считывания при пониженных порогах.
14. Проведен сравнительный анализ особенностей считывания многоанодного ФЭУ временным и аналоговым трактами.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Разработка методологии 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 СВМ RICH в среде CbmRoot.
3. Реализация прототипа системы считывания и сбора данных СВМ 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, упаковки и передачи бестриггерного потока данных, для калибровки точного времени и относительных задержек каналов и для построения событий из потока данных с детектора СВМ RICH в среде CbmRoot.

5. Результаты комплексного исследования временных свойств канала считывания и сбора данных для СВМ RICH, реализованного на основе многоанодного ФЭУ Н12700 с системой динодов “metal channel”, 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 МА ФЭУ сместителя спектра при возбуждении черенковскими фотонами.
7. Сравнительный анализ особенностей считывания многоанодного ФЭУ временными и аналоговым трактами.

Апробация / Представление основных положений и результатов:?

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 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.”
2. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, 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”
3. 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”
4. 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”
5. 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”
6. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, Москва, Россия, 15-17.12.2015
Устный доклад “Development of ‘CATIA-GDML geometry builder’ and CBM RICH software”
7. Международное совещание “26th CBM Collaboration Meeting”, Прага, Чехия, 14-18.09.2015
Устный доклад “PADIWA test measurements, beamtime analysis (TOT, WLS time resolution)”
8. Международное совещание “25th CBM Collaboration Meeting”, ГСИ, Дармштадт, Германия, 20-24.04.2015
Устный доклад “Beamtime analysis: FLIB readout, TOT, timing”

9. Семинар “Contribution of the young Russian scientists into the project FAIR”, ИТЭФ, Москва, Россия, 12-13.11.2013
Устный доклад “Modernization of simulation and data acquisition packages of CBM experiment”
10. 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:

Личный вклад:?

?

Структура и содержание

Диссертация состоит из настоящего введения, пяти глав и заключения.

В первой главе описываются условия эксплуатации, компоновка и основные свойства детекторов эксперимента СВМ; обсуждается важность точного описания и оптимизации конструкции детекторов в свете жёстких условий эксплуатации; формулируется задача разработки инструментария для обмена геометрической информацией между САПР и средами Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество (Geant4/ROOT) и облегчения создания детальных геометрических моделей для Geant4/ROOT; детально описывается конструкция детектора СВМ RICH и проводится сравнение с аналогичными приборами из ряда других экспериментов; формулируются конкретные задачи, связанные с описанием геометрии детектора СВМ RICH в среде Монте-Карло; обсуждается концепция системы считывания и сбора данных эксперимента СВМ и воплощение этой концепции в системе считывания и сбора данных детектора СВМ RICH; формулируется задача на исследование прототипа системы считывания и сбора данных указанного детектора.

Во второй главе обсуждаются некоторые наиболее распространённые способы представления геометрических моделей в ЭВМ, используемые в различном ПО для решения различных вычислительных задач; рассматриваются предпосылки и принципы создания инструментария, так называемого “CATIA-GDML geometry builder”, для обмена геометрической информацией между САПР и средами Монте Карло моделирования прохождения частиц через вещество (Geant4/ROOT) и облегчения создания детальных геометрических моделей для Geant4/ROOT; обсуждаются реализация отображения примитивов и иерархии объемов Geant4/ROOT на дерево построений в среде CATIA и набор созданных макропрограмм, входящих в “CATIA-GDML geometry builder”; описывается методика применения “CATIA-GDML geometry builder” и приводятся некоторые примеры.

В третьей главе приводится описание геометрической модели СВМ RICH в Geant4/ROOT-совместимом формате, созданной с помощью “CATIA-GDML geometry builder”. Подробно рассмотрены особенности модели, связанные с конкретными задачами по разработке и оптимизации детектора — применение параметризации для моделирования отклонения индивидуальных зеркал фокусирующей системы, использование стандартных средств CATIA для максимально точного моделирования количества пассивного материала в аксептансе, ... Третья глава посвящена применению “CATIA-GDML geometry builder” для детектора СВМ RICH. В ней подробно рассмотрены задачи описания геометрии

механических конструкций детектора, оптимизации? системы крепления и позиционирования зеркал, учета эффектов, связанных с отклонением позиционирования зеркал от номинального, размещения и экранирования от магнитного поля фотодетекторов. Также описаны созданные геометрические модели и проведенные с их помощью исследования (по материалам коллег) свойств детектора CBM RICH.

В четвёртой главе описаны архитектура бестриггерной системы считывания и сбора данных CBM 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 CBM 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@FAIR и особенности детектора черенковских колец CBM RICH

Европейский ускорительный центр по исследованию тяжёлых ионов и антiproтонов (Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR, [1]) создаётся в пригороде Дармштадта в Германии. Это будет исследовательский ускорительный комплекс нового поколения, не имеющий аналогов в мире и открывающий уникальные возможности для проведения научных исследований по наиболее актуальным направлениям современной науки и технологий. Он предоставит высокоенергетичные, прецизионно настроенные пучки антiproтонов и различных ионов от водорода до урана с беспрецедентным качеством и интенсивностью. Научная программа на ускорительном комплексе FAIR охватывает следующие направления:

- изучение структуры ядра и исследования в области ядерной астрофизики с использованием пучков стабильных ионов, а также пучков короткоживущих (радиоактивных) ядер, далёких от границы стабильности;
- изучение структуры адронов, исследования, направленные на развитие и подтверждение теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики (КХД), с использованием в основном пучков антiproтонов;
- построение фазовой диаграммы ядерной материи, изучение деконфайнмента кварков и кварк-глюонной плазмы;
- исследование физики сверхплотной электромагнитной плазмы с использованием интенсивных импульсов пучков тяжёлых ионов в уникальном сочетании с излучением петаваттного лазера;
- исследования в области атомной физики, квантовой электродинамики в сверхсильных электромагнитных полях с использованием пучков тяжёлых ионов с высокими зарядами и пучков антiproтонов;
- прикладные исследования с пучками ионов для радиационного материаловедения, медицины и биологии.

Коллaborации, планирующие исследования на FAIR, разделены на 4 группы:

- структура ядра и ядерная астрофизика — NuSTAR (Nuclear STructure, Astrophysics and Reactions);
- плотная барионная материя — CBM (Compressed Baryonic Matter);
- антiproтонная программа — PANDA (antiProton ANnihilation in DArmstadt);
- физика сверхплотной плазмы, атомная физика, а также прикладные исследования по материаловедению и биологии — APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications).

На рис. 1.1 приведена планируемая схема ускорительного комплекса FAIR рядом с существующей инфраструктурой института исследования тяжёлых ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI). Центральный элемент комплекса — двойной синхротрон тяжёлых ионов SIS100/300 (SchwerIonenSynchrotron) длиной 1100 м. В качестве инжектора пучка в SIS100/300 будут выступать существующие в GSI универсальный линейный ускоритель UNILAC (UNIversal Linear ACcelarator) и далее синхротрон SIS18. Также FAIR включает в себя: сверхпроводящий магнитный сепаратор фрагментов Super-FRS (Super Fragment Separator), накопительное кольцо высоких энергий HESR (High Energy Storage Ring), коллекторное кольцо CR (Collector Ring), рециркуляционное экспериментальное накопительное кольцо RESR (Recirculation Experimental Storage Ring), новое экспериментальное накопительное кольцо NESR (New Experimental Storage Ring), комплекс для исследования низкоэнергетических антiproтонов и тяжёлых ионов FLAIR (Facility for Low-energy Antiproton and heavy Ion Research).

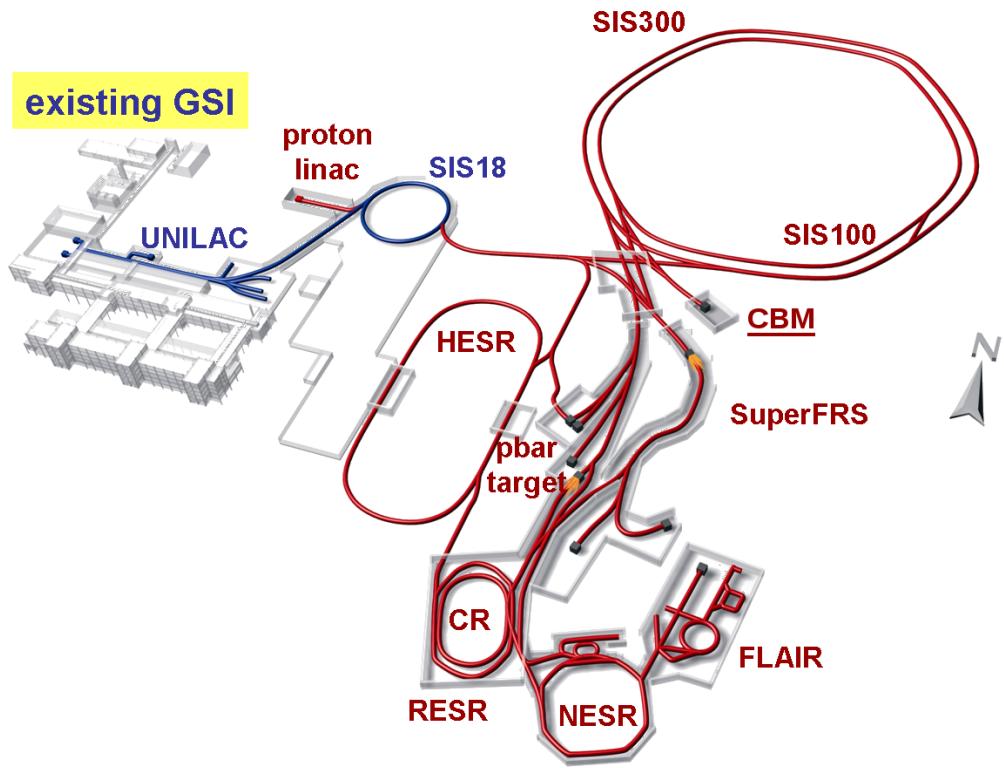


Рис. 1.1: Схема FAIR.

Синхротроны SIS100/300 имеют магнитную жёсткость 100 Тл·м и 300 Тл·м. Они способны производить пучки ионов максимальной зарядности от протона до урана с интенсивностью до 10^9 ионов в секунду и энергией от 2 до 35 ГэВ/нуклон для тяжёлых ионов.

Ещё одной отличительной особенностью FAIR является то, что он будет предоставлять пучок для нескольких (до 4) исследовательских установок одновременно, позволяя СВМ работать с пучком тяжёлых ионов до 4 месяцев в год. На рис. 1.2 показана схема предоставления пучка параллельно нескольким экспериментам.

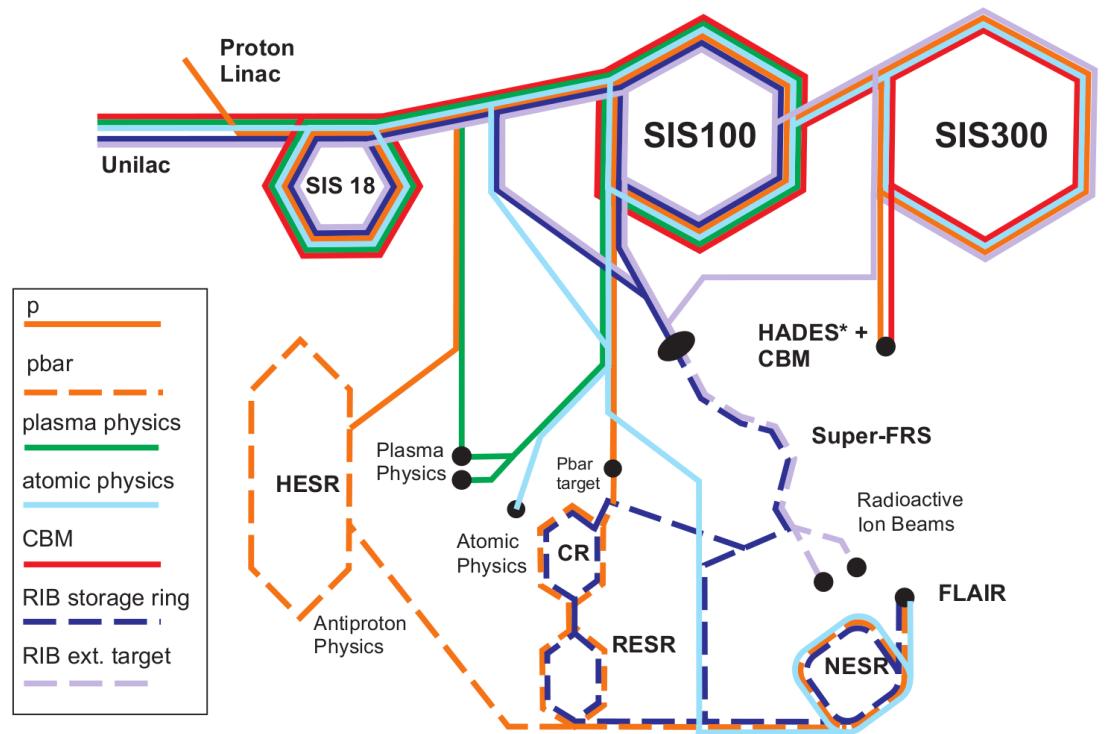


Рис. 1.2: Схема FAIR.

Широкий диапазон энергий, предоставляемый FAIR, позволит производить ядерную материю при максимальных плотностях, доступных при столкновениях тяжёлых ионов. В соответствии с разными моделями ядерного взаимодействия на раннем этапе центрального Au+Au столкновения при энергии пучка 20 ГэВ/нуклон ($s_{NN} \approx 6.4$ ГэВ) плотность с центре сгустка будет достигать уровня примерно в 12 раз выше обычной ядерной плотности.

1.1 Экспериментальная установка СВМ

Для выполнения различных измерений СВМ будет функционировать в двух конфигурациях — с мюонным детектором (MUCH) и с детектором черенковских колец (RICH). Схема экспериментальной установки с RICH представлена на рис. 1.3.

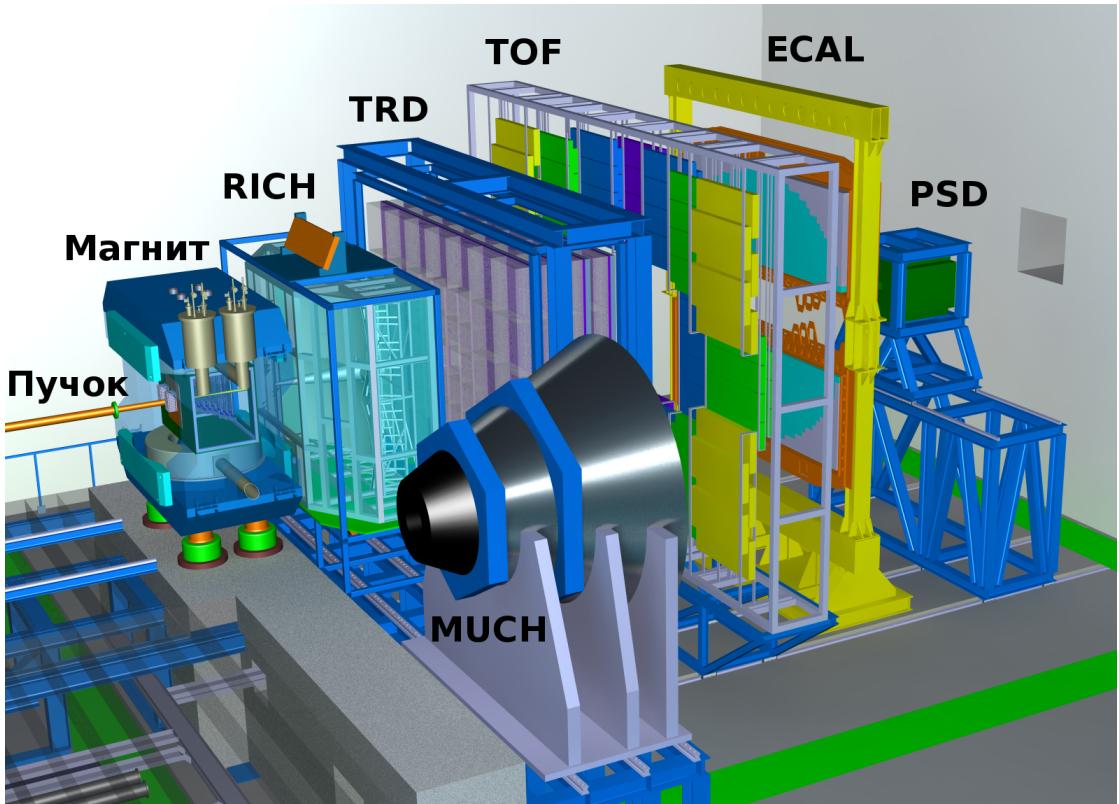


Рис. 1.3: Общий вид экспериментальной установки СВМ в конфигурации с RICH.

Между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита [6] расположена вакуумная камера, содержащая мишень и вершинный микродетектор (MVD) [7], выполненный на основе монолитного пиксельного детектора типа MAPS. Ниже по пучку также между полюсами, но уже вне вакуумной камеры, располагаются станции кремниевой трековой системы (STS) [8], собранные из двухсторонних микростриповых сенсоров. Координатные трековые детекторы MVD и STS предназначены для реконструкции траекторий заряженных частиц, восстановления их импульсов с точностью не хуже 1% и нахождения вторичных вершин в условиях высокой множественности и плотности частиц.

Следом за STS в рассматриваемой конфигурации расположен детектор черенковских колец (RICH) [9], предназначенный для идентификации электронов и позитронов в диапазоне импульсов от 0.5 ГэВ/с до 8 ГэВ/с с целью восстановления распадов легких векторных мезонов и J/ψ частиц. Во второй конфигурации на месте RICH стоит мюонная система (MUCH, показана на рис. 1.3 в положении хранения) [10], предназначенная в первую очередь для исследования частиц, распадающихся по димюонному каналу и состоящая из чередующихся слоев железа и газовых трековых камер [11].

Детектор переходного излучения (TRD) используется для реконструкции треков частиц и идентификации электронов/позитронов в условиях доминирующего фона от пионов [12]. Для идентификации адронов используется время-пролётный детектор (TOF) [13]. Электромагнитный калориметр (ECAL) типа “шашлык” необходим для регистрации прямых фотонов и фотонов от распада нейтральных мезонов (π^0, η) [14]. Детектор непровзаимодействовавших осколков ядер (PSD) [15] представляет собой сегментированный адронный

калориметр и служит для определения центральности столкновения и плоскости реакции путем регистрации ядерных осколков, летящих под малыми углами к пучку.

Далее каждый элемент установки описан чуть подробнее.

1.1.1 Мишень, вакуумная камера и пучковая труба

СВМ является экспериментом с фиксированной мишенью. Пучок подводится к установке с помощью ионопровода, который стыкуется с вакуумной камерой, расположенной между полюсами дипольного магнита. Внутри вакуумной камеры находится мишень, представляющая собой тонкую золотую фольгу (?), и вершинный микродетектор MVD. Непривзаимодействовавшие ионы налетающего пучка и крупные осколки продолжают движение по ионопроводу за вакуумной камерой.

Планируется, что пучковая труба будет выполнена из алюминия толщиной ? Ионопровод имеет форму конуса с углом ?.

1.1.2 Вершинный микродетектор MVD

Вершинный микродетектор (Micro Vertex Detector, MVD) является первым трекинговым устройством установки СВМ. Первая станция MVD расположена на расстоянии 5 см от мишени вниз по пучку. MVD улучшает разрешение трековой системы СВМ, позволяя таким образом идентифицировать редкие по пространственному отклонению вершины распада. Помимо этого, широкий геометрический акцептанс MVD вносит значительный вклад в трекинг частиц с низким импульсом, что повышает способность системы к подавлению фона при измерении распадов по диэлектронному каналу. MVD будет построен на основе пикельных КМОП (CMOS) сенсоров толщиной $50\mu\text{m}$. Данная технология, вместе с правильно подобранными материалами для опорных структур и кабелей, позволяет получить вклад материала порядка 0.3% X_0 для первой станции.

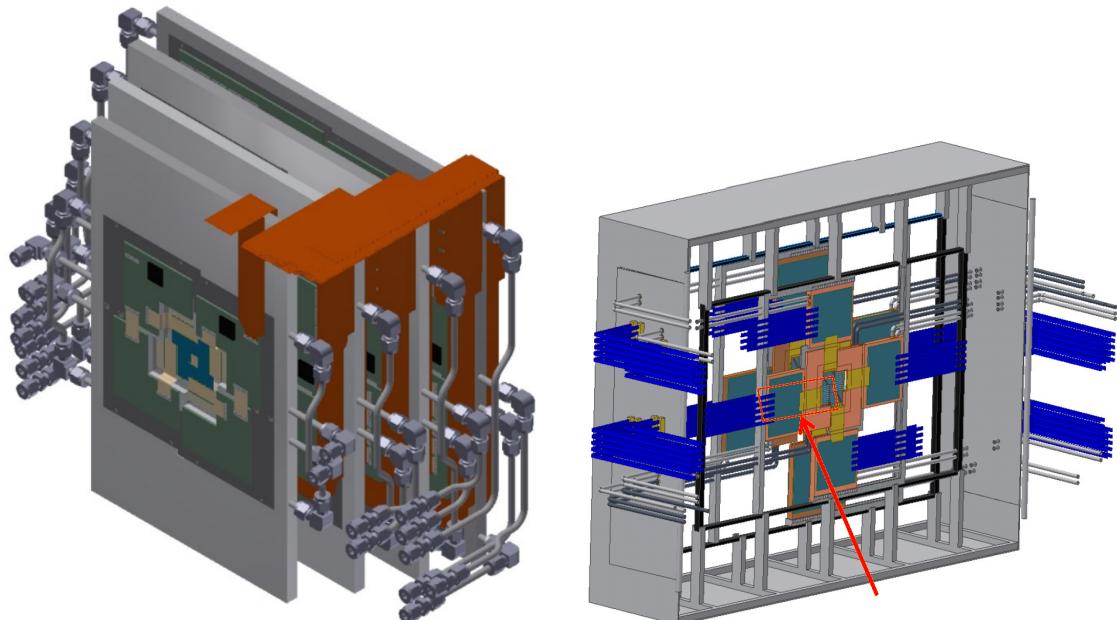


Рис. 1.4

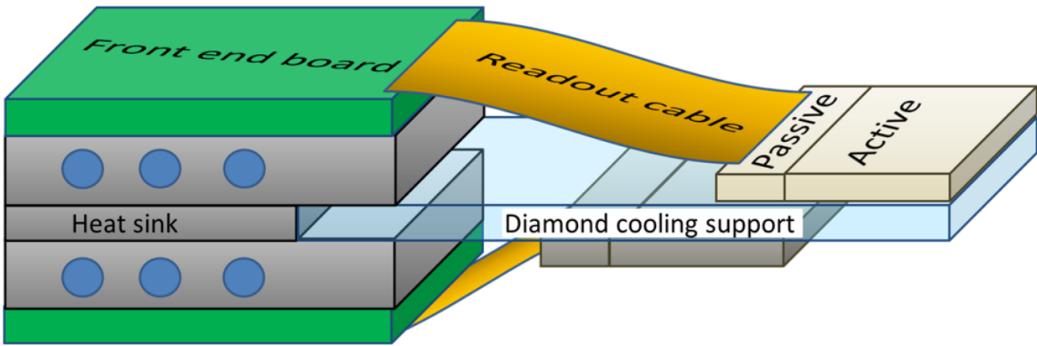


Рис. 1.5

1.1.3 Кремниевая трекинговая система STS

Задача кремниевой трековой системы — 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 $\Delta p/p = 1\%$. Для удовлетворения перечисленных требований STS должна состоять из 8 слоёв кремниевых микростриповых сенсоров, расположенных внутри поля от дипольного магнита на расстоянии от 30 см до 100 см от точки взаимодействия вниз по пучку с шагом 10 см.

Сенсоры будут монтироваться на легкую механическую опору в виде карбоновых ферм. Считывание будет осуществляться по многоканальным микро-кабелям самотриггирующейся электроникой, расположенной по краям станций вместе с линиями охлаждения и другими инфраструктурными подсистемами. Многослойные полиамид-алюминиевые кабели будут иметь толщину порядка 100 мкм. Стерео-угол между стрипами равен 7.5° . Микростриповые сенсоры будут двухсторонними, шаг между стрипами $58\mu\text{m}$, длина стрипов от 20 до 60 мм, а толщина кремния $300\mu\text{m}$. По текущим оценкам максимальная неионизирующая доза в СВМ для сенсоров, расположенных ближе всего к пучку, не будет превышать $10^{14} n_{eq} \text{ см}^{-2}$. STS будет работать в терmostатическом корпусе, обеспечивающем постоянную температуру около -5°C . тепло, рассеиваемое считающей электроникой, отводится с помощью CO_2 системы охлаждения. Механические опоры детектора и соединения спроектированы так, чтобы была возможность заменить отдельный модуль системы не отсоединяя остальные.

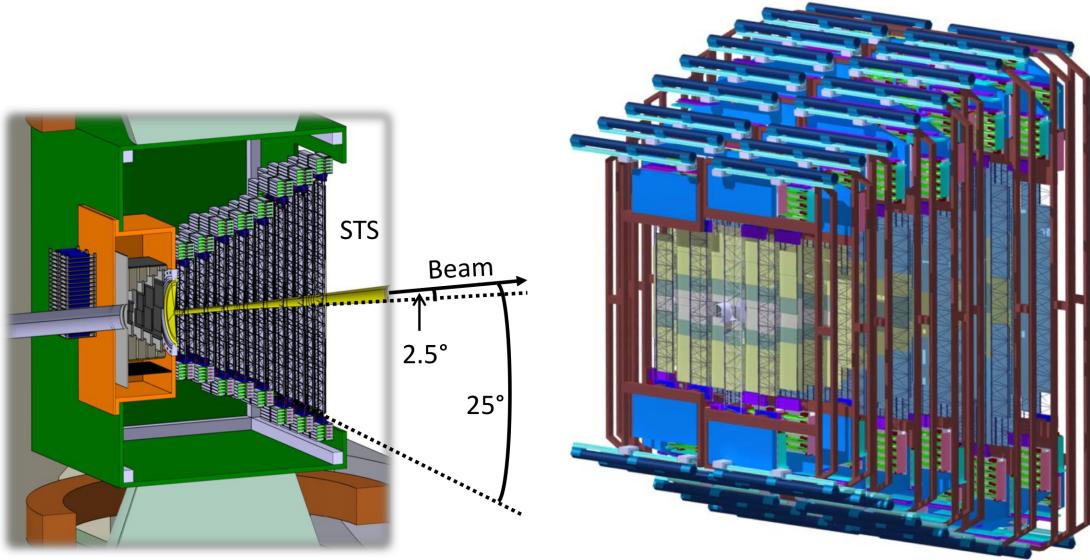


Рис. 1.6

1.1.4 Детектор черенковских колец RICH

1.1.5 Мюонная система MUCH

См. английский оригинал в комментах теха.

Мюонная система необходима для идентификации мюонных пар, рожденных в высокоЭнергетических столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий пучка от 4 до 40 ГэВ/нуклон . Измерение лептонных пар является одним из центральных пунктов физической программы СВМ, так как они несут информацию о состоянии материи внутри фаербола. В области низких инвариантных масс дилептоны предоставляют информацию о модификации векторных мезонов “в среде”, что является многообещающей наблюдаемой о восстановлении киральной симметрии. В области средних инвариантных масс в спектре дилептонов преобладает термальная радиация от фаербола, которая говорит о его температуре. В области инвариантных масс около 3 ГэВ/с² дилептоны представляют собой подходящий инструмент для изучения аномального подавления чармония в фазе деконфайнмента. В эксперименте СВМ для получения полной картины о дилептонной физике будут измеряться как электроны, так и мюоны.

Основной сложностью при измерении мюонов в столкновениях тяжелых 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 выполняться идентификацию мюонов в зависимости от импульса. По этой причине мюонная система будет выполнена в виде последовательности адронных абсорберов и трекинговых станций. Адронные абсорбера различаются по толщине и материалу, а трекинговые станции состоят из троек детекторов, выполненных по различным технологиям. MUCH будет расположен за дипольным магнитом, в том же месте, где стоит RICH в электронной конфигурации СВМ. Чтобы уменьшить количество мюонов от слабых распадов пионов и каонов, система из абсорберов и детекторов должна быть максимально компактна.

Мюонная система будет строиться поэтапно соответственно энергиям пучка, предоставляемым ускорителем. В рамках FAIR MSV (ссылка) синхротрон SIS100 будет выдавать пучок тяжёлых ионов с энергией до 14 ГэВ/нуклон и протонный пучок с энергией до 29 ГэВ/нуклон. Две первые версии MUCH (SIS100-A и SIS100-B) будут состоять из 3 и 4 станций соответственно, что подходит для измерения векторных мезонов с низкой массой (low-mass vector mesons) в столкновениях при 4–6 ГэВ/нуклон и 8–14 ГэВ/нуклон соответственно. Третья версия MUCH (SIS100-C) будет оборудована дополнительным железным абордером 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 абордера и детектора для измерения векторных мезонов с низкой массой (low-mass vector mesons) и чармония при энергиях пучка более 14 ГэВ/нуклон (версии SIS300-A и SIS300-B).

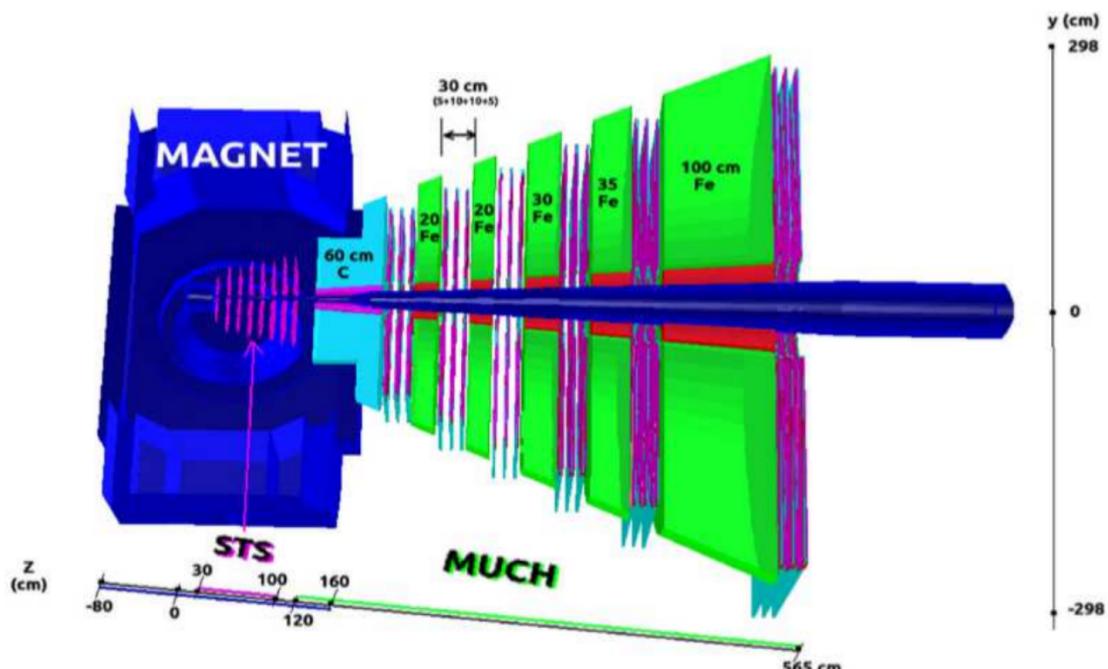


Рис. 1.7

1.1.6 Детектор переходного излучения TRD

См. английский оригинал в комментариях техника.

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 пионов порядка 10–20 для получения возможности измерения диэлектронов в диапазоне масс от ρ и ω и выше J/ψ . Благодаря способности идентифицировать заряженные частицы за счёт их известного энерговыделения детектор TRD также предоставит ценную информацию при регистрации ядерных осколков. Это особенно важно для отделения, например, дейtronов от He^4 , 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 с связке с подходящим радиатором. Базовая версия CBM TRD оснащена MWPC с симметричной зоной усиления толщиной 3.5 мм + 3.5 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.

Базовая версия CBM TRD предполагает одну станцию, состоящую из четырёх слоёв. Она будет расположена между детекторами RICH и TOF, таким образом *** TRD будет использоваться как дополнительная трекинговая станция, расположенная за последним абордером MUCH, в мюонной конфигурации CBM.

1.1.7 Время-пролётный детектор TOF

См. английский оригинал в комментах тэха. В TDR есть неплохие картинки (см. стр 74).

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

Так как CBM представляет собой эксперимент с фиксированной мишенью, поток заряженных частиц сильно зависит от направления. 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 времененным разрешением лучше 60 пс и эффективностью лучше 95%.

The TOF wall will be built on the basis of state-of-the-art Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC). The basic element of this robust detector concept is a stack of resistive plates made out of glass or ceramics that are separated by thin gas gaps. At sufficiently high electric field strength avalanches are created in a very uniform manner and can be read out via capacitive coupling. As is demonstrated in chapters 7 this 10 - years old detector technology is well advanced by now, largely due to the effort of the CBM - TOF group, and offers the flexibility to cope with the high demands posed by the CBM physics goals. Most notably, the proposed concept that requires a detector technology with a sustained rate capability in the order of 25 kHz/cm² became possible only by the development of a low - resistivity glass (see section 7.1.1) that is available for CBM - TOF by now through the CBM - TOF group at Tsinghua University, Beijing, China at reasonable costs.

Предлагается построить CBM TOF на основе современных MRPC. Базовый элемент этого robust детектора — пачка резистивных пластин из стекла или керамики, которые разделены тонким зазором с газом. При достаточно высоком электрическом поле создаются очень равномерные ливни, которые можно считывать с помощью capacitive coupling.

The proposed structure of the CBM - TOF wall is based on detector layouts that have already been realized and tested in in-beam experiments and demonstrated MRPC counter timing resolutions below 60 ps with efficiencies above 95% at rates relevant for CBM (see chapter 7 for details). The basic element of the proposed wall are MRPC strip counters where a single avalanche is generating two signals at the two ends of a readout-electrode. The length of the readout - strip can be easily adjusted to the required granularity. The leading design goal of the

proposed strip structures is operation stability and signal integrity. This is achieved by differential signal processing and the matching of the readout strip impedance to the input impedance of the newly developed preamplifier discriminator chip (PADI). Thus the number of spurious hits due to reflections is minimized and an optimal response of the detectors is guaranteed with minimal dead time. This aspect is considered to be especially important for the high rate running conditions of CBM where even independent events will be overlapping in time space and any additional spurious hit will deteriorate the system performance.

In order to minimize the number of components, the CBM - TOF wall is designed to be composed of only 4 different types of MRPC counters, arranged into 6 different types of modules. The proposed CBM -TOF system is described in detail in chapter 3. The modules and counters are realized in 2 different technologies: 1. The modules placed at small polar angles close to the beampipe (M1 - M3) are housing counters (MRPC1,MRPC2) that employ a double stack HV - design. The counters are equipped with low resistivity glass and have electrodes of $32 \times 10 \text{ cm}^2$ and $32 \times 20 \text{ cm}^2$ dimensions, 10 gas gaps and a strip pitch of 4.7 mm. The front-end electronics is mounted outside of the gas volume. A total of 36.608 electronics channels is needed to readout this part of the TOF wall. The proposed design emphasize the full coverage of the solid angle and is rather conservative in terms of data integrity since each hit is registered by 2 readout channels and allows to determine the hit position with an accuracy of a few mm in each direction. More detailed measurements of the response under fully loaded conditions and time based simulations of the system response will show whether this strip solution could be replaced by a cheaper pad - type MRPC solution that is described in detail in the appendix E and requires only 27.792 electronic readout channels.

A decision will be taken at latest in Dec. 2015 after careful analysis of test beam data that will be taken at GSI in October 2014 and at CERN SPS in April 2015. With currently available HI - beam, conditions close to the operating conditions of CBM will be realized. 2. For the remaining part of the wall (modules M4 - M6) two different sizes of a MRPC strip counter with active area of $32 \times 27 \text{ cm}^2$ and $32 \times 53 \text{ cm}^2$, and a strip pitch of 1 cm are proposed. These counters are equipped with low - resistivity glass or thin float glass electrodes according to the rate requirements and use a single HV stack with 8 gas gaps. In order to optimize the signal integrity the preamplifier is connected as directly as possible to the readout electrode and put into the gas volume of the modules. As largest benefit this arrangement offers the possibility to operate the detectors at lower discriminator thresholds and the lower pulse height results in turn also in a higher rate capability. The design of independent module units including the analog electronics also offers the necessary robustness to operate a system of 218 modules and 70.000 readout channels. The disadvantage of the proposed single stack architecture is the need of two high voltages ($\pm 11 \text{ kV}$) causing substantial costs. An alternate design with a double stack configuration of the high voltage is available and can be operated at about 5.6 kV. However, this counter configuration needs more glass electrodes (12 instead of 9) and the cost benefit from the HV has to be compared to the additional cost caused by additional electrodes especially when these are made from low resistivity glass. Counters of this type that are described in appendix F.2.4 will be evaluated in comparison to the proposed ones also in the upcoming HI - test beam campaigns addressing the system features of the designs. A decision will be taken at latest in Dec. 2015 after careful analysis of the test beam data.

The high performance electronics for the whole CBM - TOF wall is independent of the choice of a specific module or counter type and is based on the PADI and the GET4 - ASIC chips developed by the CBM - TOF group (see sections 3.3.3 and 3.3.5). The combination of both chips in conjunction with a custom - designed clock distribution system (section 3.3.8) offers the possibility to build a large scale system with an electronics contribution to the timing resolution of about 30 ps. This system was tested using a readout controller that implements the full

CBMnet - protocol and allows for online inspection and control of the GET4 - data. The details of the readout-chain are described in section 3.3. However, since up to now no long - term stably working GET4 - system could be demonstrated, an alternative backup solution is also included in this report. It is built on FPGA based TDCs that became available recently (see appendix G.2) and provides timing resolution on the level of 10 ps. A free - streaming readout chain is not yet available, but is planned to be realized in the near future. As a consequence the number of necessary readout controllers would be substantially reduced leading eventually to a more simple and cost effective system. More R'n'D is required in the direction of an FPGA - based digitizer / readout system, specifically considering the radiation environment (see chapter 2.5). Since FPGA - based digitizers are offering a better resolution and more flexibility and would allow e.g. for an improvement of the double hit recognition the decision about the production of the GET4 - system will be taken only after a) the stability of the GET4 readout chain is proven, b) no competitive FPGA based solution is available until start of mass production (Dec.2015). Therefore R'n'D work on FPGA - based TDCs is continuing as part of the project.

The proposal of a high performance TOF wall would be incomplete without the discussion of the time - zero (T 0) - reference that is needed for any velocity measurement. Details can be found in chapter 4 demonstrating that for all of the anticipated running scenarios solutions are available. For most of the heavy-ion reaction running at the initial SIS100 accelerator the software based T 0 - extraction is sufficient (see section 4.2). This method can be calibrated by making use of the diamond based start detector system developed for the HADES experiment (section 4.4) that is operational up to interaction rates of 100 kHz.

As has been shown by Monte-Carlo simulations using the SHIELD event generator the quality of the T 0 - reference determination can be improved by installing the so called Beam Fragmentation T 0 Counter (BFTC) as the innermost part of the TOF wall (see section 4.3). It should cover the region from about 20 to 60 cm from the beam pipe (overlapping with the PSD acceptance). Using a very simple algorithm without tracking information a T 0 - signal with a precision of better than 50 ps can be achieved. A detector concept, anticipated to be able to operate in this harsh environment with fluxes being as high as 100 kHz/cm², built from very radiation-hard materials and possessing minimum gas aging characteristics, is suggested to be based on the ceramic electrodes (see section F.1). Single cell pads with the size of 2×2 cm² seem to fulfill the double hit, maximum rate and cross-talks requirements. Further R'n'D is necessary in order to prove the validity of the concept. The very large dynamical range in terms of incident beam energies that has to be covered by the CBM experiment reflects itself by the movable wall concept where the whole TOF - system is mounted on rails and can be placed at various distances. The rail system is sketched in section 5.1. It allows e.g. to balance the decay losses for kaons against the purity of an anticipated online kaon multiplicity selection. It also enables the servicing of the components independently from the other subsystems of CBM during shutdown periods.

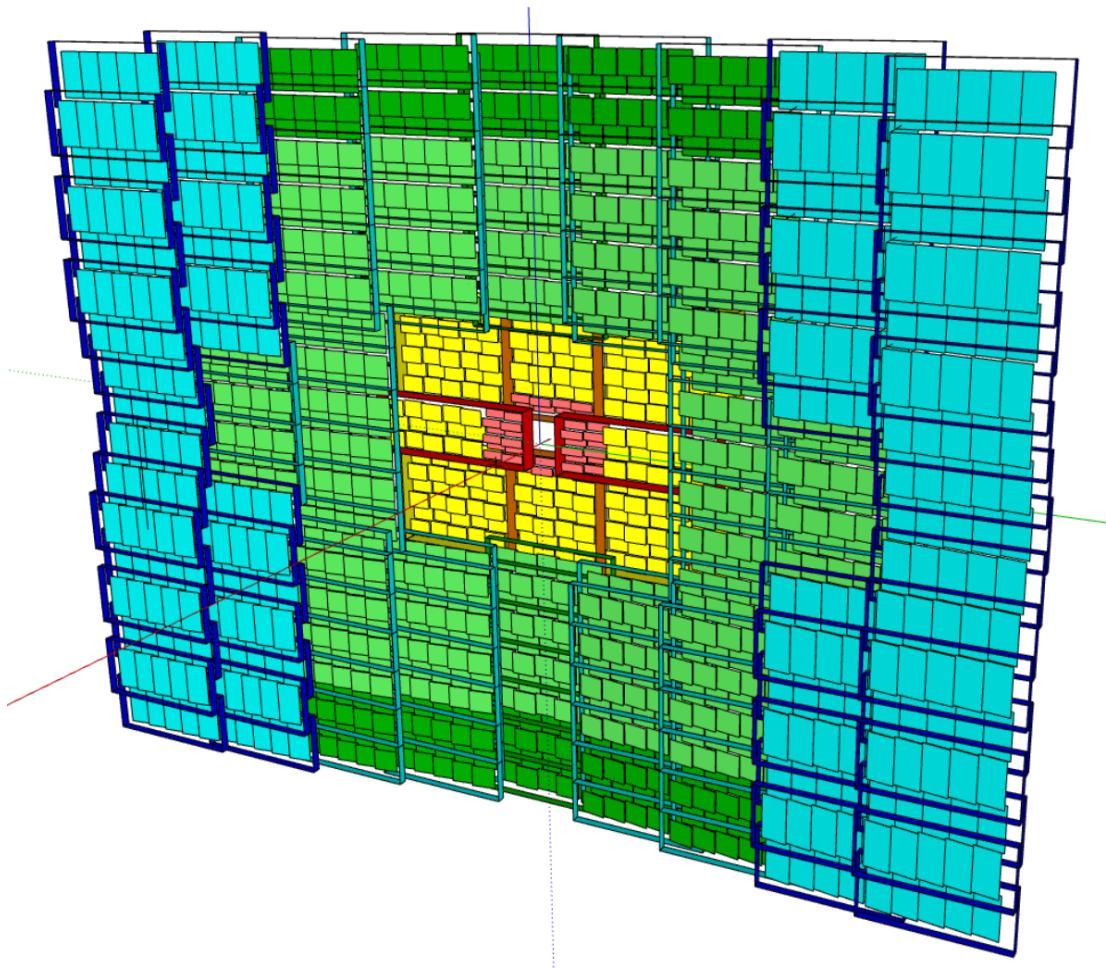


Рис. 1.8

1.1.8 Электромагнитный калориметр ECAL

В эксперименте СВМ будет установлен калориметр типа “шашлык”, 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. Полный калориметр на SIS-300 будет собран из модулей, состоящих из 140 последовательных слоёв свинца и сцинтиллятора толщиной 1 мм. Планируется три типоразмера модулей: 3 см×3 см, 6 см×6 см и 12 см×12 см. Модули могут быть организованы

A “shashlik” type calorimeter as installed in the HERA-B, PHENIX and LHCb experiments will be used to measure direct photons and neutral mesons (π^0, η) decaying into photons. The full ECAL at SIS-300 will be composed of modules which consist of 140 layers of 1 mm lead and 1 mm scintillator, with cell sizes of 3 cm×3 cm, 6 cm×6 cm and 12 cm×12 cm. The shashlik modules can be arranged either as a wall or in a tower geometry with variable distance from the target. To simplify the detector layout and to fit in a very limited budget for ECAL at SIS100 stage we have reduced the number of ECAL sections considering only 4-cell modules.

Конфигурация для SIS-100 имеет 4352 канала считывания, составленные из 1088 моду-

лей одного типа ($6 \text{ см} \times 6 \text{ см}$).

1.1.9 Детектор PSD

См. английский оригинал в комментах теха.

? не провзаимодействовавших или непровзаимодействовавших ?

Основная задача детектора не провзаимодействовавших осколков (Projectile Spectator Detector, PSD) — выполнять измерения центральности столкновений тяжёлых ионов и ориентацию плоскости реакции. PSD представляет собой compensating ? калориметр из свинца и сцинтиллятора, спроектированный для измерения распределения энергии налетающих осколков и летящих вперёд частиц, produced close to the beam rapidity. Основные технические требования к PSD — forward rapidity coverage и достаточное энергетическое разрешение для точного определения центральности столкновений, а также гранулярность в плоскости ?, необходимая для восстановления плоскости симметрии столкновения.

Предлагаемый проект детектора, составленного из 44 модулей, покрывает широкий диапазон transverse area ? вокруг области первичного взаимодействия так, чтобы большая часть непровзаимодействовавших фрагментов оставили всю свою энергию в PSD. За счёт вытянутой в горизонтальном направлении геометрии детектор PSD позволяет регистрировать фрагменты, отклонённые магнитным полем дипольного магнита.

The proposed 44 module design of the PSD covers large transverse area around the beam spot position such that most of the projectile spectator fragments deposit their energy in the PSD. The elongated transverse geometry of the PSD in horizontal direction takes into account the deflection of the fragments by the magnetic field of the CBM Dipole magnet.

A lead-scintillator prototype of the PSD module with scintillator light readout by micropixel avalanche photodiodes and the PSD front-end electronics were tested with the proton and pion beams and cosmic muon rays. Radiation hardness and possible degradation of the PSD were studied with the FLUKA simulation of the CBM detector geometry.

В зависимости от энергии столкновения, PSD имеет разрешение по прицельному параметру, сравнимое с разрешением, предоставляемым кремниевой трековой системой STS. Таким образом, PSD предоставляет независимый метод в эксперименте СВМ для определения центральности и множественности наблюдателей. В случае применения в связке с STS, детектор PSD помогает улучшить определение центральности

Depending on the collision energy, the PSD has a comparable impact parameter resolution to that of the CBM silicon tracking system (STS). Thus, the PSD provides an independent method in the CBM experiment of the centrality determination with spectator multiplicity. When used in a combination with the STS, the PSD helps to improve the overall centrality determination in the centrality range of 0–40% and allows for centrality determination in narrow centrality classes with a width of at least 5%.

Разрешение по определению плоскости реакции с помощью PSD варьируется в диапазоне от 30° до 40° в зависимости от расстояния ? чего ? 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 СВМ. Было проведено сравнение

The PSD event plane resolution varies in the range of 30–40 degrees depending on the distance from the target and the collision energy. With the proposed elongated geometry, and after correction for the detector azimuthal non-uniformity, the resolution of the PSD event plane shows negligible variation with the field strength of the CBM magnet. We compared the PSD event plane resolution with that of STS and an alternative detector setup at forward rapidity such as a forward time of flight (TOF) detector. We concluded that the PSD has significantly

better event plane resolution than both STS and forward TOF detector configurations.

1.2 СВМ RICH поподробней

? Может как-то сделать так, чтобы это описание СВМ рича было после описания других ричей — COMPASS, LHCb, HERA-b? Или как раз наоборот, лучше сразу после этой секции?

? Перенести какую-то часть из секции RICHgeo

Особенность СВМ RICH заключается в том, что в плоскости реконструкции одновременно необходимо восстанавливать порядка ? колец ? хитов в плоскости реконструкции, из них ? сигнальных, а остальные шумовые (откуда? конверсия в материале до рича? , ? хитов на кольцо, ? колец от пионов, ? колец от электронов, ? колец от ?

? далее параметры реконструкции и какие-то слова о том, как это соотносится с другими ричами.

1.3 Обзор существующих детекторов черенковских колец

1.3.1 COMPASS RICH-1

Эксперимент 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 за неподвижной мишенью на отводе пучка M2 ускорителя SPS в CERN. Эксперимент был предложен в 1996 году, в период с 1999 по 2001 года выполнялись работы по установке и в 2001 был выполнен первый (commissioning) запуск. Набор данных разбит на два этапа: COMPASS I (2002–2011) и COMPASS II (2012–2018).

Общие слова о COMPASS RICH и его физической задаче

Детектор Черенковских колец RICH-1 был спроектирован в 1996 г. и функционирует с 2002 г. RICH-1 подвергается постоянной оптимизации, а в 2006 было выполнено обновление. Ожидается второе обновление детектора в 2016 г. ? оно было?

Основная задача детектора Черенковских колец — разделение π , p и K в диапазоне импульсов от 3 до 55 ГэВ/с в условиях высокой интенсивности (что бы это значило? в статье 2014 г. написано, что beam rate 40 МГц, и частота триггеров 20 кГц) в полном аксептансе спектрометра, составляющем ± 250 мрад по горизонтали и ± 180 мрад по вертикали. Для минимизации отрицательного влияния на эффективность стоящих ниже по пучку электромагнитного и адронного калориметров детектор RICH-1 должен иметь минимум количества материала в аксептансе. Также в процессе проектирования COMPASS RICH-1 необходимо было развивать технологии для реализации возможности регистрировать и справляться с высоким для того времени потоком данных. ? По большому счёту, задачи те же, что и у СВМ

<http://localhost/Lib/1-s2.0-S0168900203027499-main.pdf>

In the 2002 run data were taken with a muon beam of 160 ГэВ/с and an intensity of $2 \cdot 10^8$ muons per spill of 4.8 s and a machine cycle of 16.8 s

Корпус и радиатор

Габариты корпуса детектора COMPASS RICH-1, выполненного из алюминия, составляют $6.6 \times 5.3 \times 3.3$ м³. Внутри расположен газовый радиатор C_4F_{10} длиной 3 м и объёмом около 83 м³. 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 100 ± 10 Па. Передняя и задняя стенки корпуса выполнены из тонких алюминиевых пленок спрессованных с жёсткой пеной. ?

Зеркала и опоры

Система фокусировки состоит из двух сферических зеркал радиусом 6.6 м, составленных из 116 сегментов шести- и пятиугольной формы, общей площадью более 21 м². Для фокусировки на фоточувствительные камеры, расположенные за пределами геометрического аксептанса, центры сфер зеркал смешены по вертикали от пучка на 1.6 м, а образовавшийся в результате этого зазор между двумя зеркалами приводит к потере 4% площади отражающей поверхности. Зеркала были произведены компанией IMMA, Ltd., Kinskeho 703, Turnov, Czech Republic. Коллaborацией COMPASS был разработан метод контроля индивидуальных отклонений сегментов зеркал “на лету” (онлайн), называемый CLAM (“a continuous line alignment and monitoring method”).

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.

The mechanical structure supporting the mirror wall has a net-like configuration with spherical design made from aluminum. Each mirror is coupled to a fine thread screw which allows it to rotate around two orthogonal axes.

? картинка - схема, оч похоже на СВМ

Фотодетекторы

Исходя из необходимости иметь суммарную площадь фоточувствительных камер 5.3 м², изначально для реализации были выбраны многопроволочные пропорциональные камеры (MWPC) с сегментированным фотокатодом из CsI. RICH-1 оборудован восемью идентичными камерами, каждая площадью 576×1152 мм². Фотокатоды выполнены из двух двухсторонних печатных плат размером 576×576 мм². Окна из silica-quartz состоят из двух одинаковых quartz-plates размером $600 \times 600 \times 5$ мм³. Сегментированный фотокатод обеспечивает размер пикселя 8×8 мм² и в общей сложности 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 считающей электроникой. В общей сложности было установлено 4 панели по 144 МА ФЭУ Hamamatsu R7600-03-M16, имеющими 16 каналов и входное стекло, прозрачное в ультрафиолетовой области, и специальный делитель напряжения.

Электроника

Сигнал с МА ФЭУ считывается платами передней электроники, основанными на ASIC “CMAD”, реализующем 8-канальный предусилитель-дискриминатор, разработанный на основе “MAD4” специально для COMPASS RICH-1. CMAD позволяет работать на частоте до 5 МГц на канал.

? **перефразировать** Хорошее временное разрешение МА ФЭУ не портится за счёт использования цифровых карт DREISAM, в которых реализован ВЦП F1, имеющий временное разрешение 110 пс и может работать с чатотой до 10 МГц на канал и частоте триггера до 100 кГц.

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 платам считывания CATCH, которые группируют данные и передают дальше также по оптике через S-LINK в систему сбора данных эксперимента.

Заключение такое, что в целом конструкция этого RICH очень схожа с конструкцией СВМ RICH.

1.3.2 LHCb

Эксперимент LHCb

LHCb — один из четырёх крупных экспериментов на Большом Адронном Коллайдере (LHC). LHCb посвящён изучению нарушения СР-инвариантности и редких распадов тяжёлых ?. Он представляет собой прямой спектрометр, спроектированный принимать летящие прямо b- и c-адроны, рождённые в $p - p$ столкновениях. Схема установки LHCb показана на рис. 1.9.

LHCb is one of the four major experiments at the LHC, and is dedicated to the study of CP violation and the rare decay of heavy flavours. It is a forward spectrometer designed to accept forward-going b- and c-hadrons produced in proton-proton collisions. The layout of the spectrometer is shown in рис. 1.9.

Википедия: Основными задачами эксперимента LHCb являются: изучение редких эффектов СР-нарушения в распадах прелестных адронов, измерение углов треугольника универсальности, прецизионная проверка предсказаний Стандартной Модели (СМ) в редких радиационных, полулептонных и лептонных распадах В-мезонов, изучение редких распадов очарованных частиц и экзотических распадов τ -лептонов.

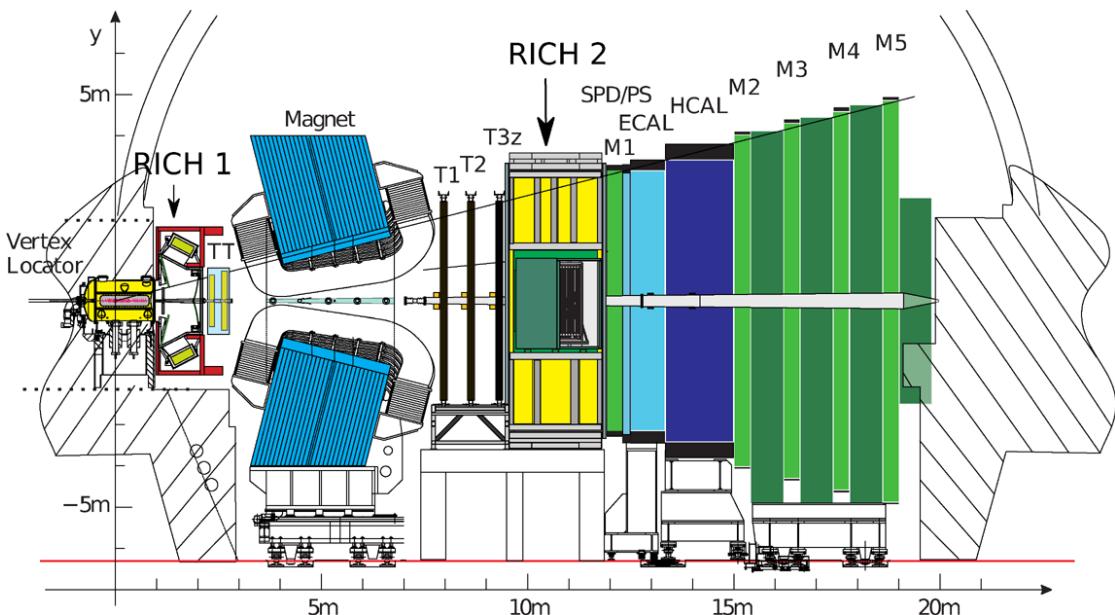


Рис. 1.9: Схема установки LHCb.

Общие слова о LHCb RICH и его физической задаче

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 with respect to the beam axis.

RICH1 покрывает нижний и средний диапазон импульсов от 2 до 40 ГэВ/с во всём угловом акцептансне 25–300 мрад. Ограничение снизу возникает от размера ионопровода (выше по пучку ?). RICH2 покрывает диапазон высоких импульсов от 15 до 100 ГэВ/с в области 15–120 мрад.

RICH1 covers the low and intermediate momentum region 2–40 ГэВ/с over the full spectrometer angular acceptance of 25–300 mrad. The acceptance is limited at low angle by the size of the beampipe upstream of the magnet. RICH2 covers the high-momentum region 15–100 ГэВ/с , over the angular range 15–120 mrad.

Корпус и радиатор

RICH-1 расположен максимально близко к точке взаимодействия, насколько это возможно. 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 детектора VELO. Выходное окно RICH-1 изготовлено из легковесного (композитного ?)материала, представляющего собой “сэндвич” из углепластика и пены.

RICH-1 is placed as close as possible to the interaction region. To minimize the material budget there is no separate entrance window, and the RICH-1 gas enclosure is sealed directly to the exit window of the VELO vacuum tank. The downstream exit window is constructed from a low-mass carbon-fibre/foam sandwich.

RICH-2 располагается за магнитом, т.к. треки с высоким импульсом, которые он изменяет, меньше подвержены воздействию магнитного поля. Благодаря этому RICH-2 может быть помещён за трекинговыми детекторами для уменьшения количества материала, что

оказывает положительное влияние на регистрацию треков заряженных частиц. Так же, как и в случае RICH-1, входное и выходное окна RICH-2 выполнены из ?

RICH-2 is placed downstream of the magnet, since the high momentum tracks it measures are less affected by the magnetic field. In this way it can be placed after the downstream tracking system in order to reduce material for the measurement of the charged tracks. The entrance and exit windows are again a foam sandwich construction and skinned with carbon-fibre and aluminium, respectively.

Fluorocarbon gases ? при комнатной температуре и нормальном давлении используются в качестве Черенковских радиаторов — C_4F_{10} в RICH1 и CF_4 в RICH2 — по причине низкой дисперсии. Коэффициенты преломления соответственно равны 1.0014 и 1.0005 при $0^\circ C$, 101.325 кПа и 400 нм. Около 5% CO_2 было добавлено в CF_4 для погашения сцинтилляции в газе.

Fluorocarbon gases at room temperature and pressure are used as Cherenkov radiators; C_4F_{10} in RICH 1 and CF_4 in RICH 2 were chosen for their low dispersion. The refractive index is respectively 1.0014 and 1.0005 at $0^\circ C$, 101.325 kPa and 400 nm. About 5% CO_2 has been added to the CF_4 in order to quench scintillation in this gas.

Порог по импульсу для черенковского света в C_4F_{10} составляет 9.3 ГэВ/с . Частицы с меньшим импульсом идентифицируются как каоны, а не пионы в режиме запрета ?, то есть ?. Чтобы поддерживать положительную идентификацию при низких импульсах и для того чтобы разделять каоны и протоны, в RICH1 был включён второй радиатор: стенка толщиной 50 мм, составленная из 16 плиток silica аэрогеля, была помещена при входе в RICH1. Коэффициент преломления равен 1.03, a light scattering length ? составляет приблизительно 50 мм при длине волны 400 нм в чистом N_2 . Аэрогель помещён в C_4F_{10} ? и тонкий стеклянный фильтр ограничивает дисперсию ?

The momentum threshold for kaons to produce Cherenkov light in C_4F_{10} is 9.3 GeV/c. Particles below this momentum would only be identified as kaons rather than pions in veto mode, i.e. by the lack of Cherenkov light associated to the particle. To maintain positive identification at low momentum and in order to separate kaons from protons, a second radiator is included in RICH 1: a 50 mm thick wall made of 16 tiles of silica aerogel [10] at the entrance to RICH 1. The refractive index is $n=1.03$ and the light scattering length is around 50 mm at 400 nm in pure N_2 . The aerogel is placed in the C_4F_{10} gas volume and a thin glass filter is used on the downstream face to limit the chromatic dispersion.

Зеркала и опоры

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 опоре, 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 ?

The RICH-1 detector utilizes innovative carbon-fibre mirror. ?

Particles produced in the collisions in LHCb will travel through the mirrors of RICH-1 prior to reaching measurement components further downstream. To reduce the amount of scattering,

RICH-1 uses special lightweight spherical mirrors constructed from a carbon-fibre reinforced polymer (CFRP), rather than glass. There are four of these mirrors, each made from two CFRP sheets moulded into a spherical surface with a radius of 2700 mm and separated by a reinforcing matrix of CFRP cylinders.

The result of the optics redesign was that the radius of curvature of the spherical mirror was increased from 2710 mm to 3800 mm and it was moved downstream by 86 mm.

To be able to place the focal surface outside the particle flux (± 160 mrad vertically), the mirror is split horizontally and both halves are tilted by 9° away from the beam-line.

?

Both RICH detectors have a similar optical system, with a tilted spherical focusing primary mirror, and a secondary flat mirror to limit the length of the detectors along the beam direction. Each optical system is divided into two halves on either side of the beam pipe, with RICH 1 being divided vertically and RICH 2 horizontally. The vertical division of RICH 1 was necessitated by the requirements of magnetic shielding for the photon detectors, due to their close proximity to the magnet. The spherical mirrors of RICH 1 (4 segments) are constructed in four quadrants, with carbon-fibre structure, while those of RICH 2 (56 segments), and all flat mirrors (16 and 40 segments in RICH 1 and RICH 2 respectively), are tiled from smaller mirror elements, employing a thin glass substrate.

Фотодетекторы

Черенковские фотоны, рождённые заряженной частицей, проходящей вквозь радиаторы, фокусируются в (изображения ?) кольца на плоскости фотодетекторов, расположенные за пределами аксептанса спектрометра. Инновационные гибридные фотодетекторы (HPD) были разработаны в сотрудничестве с индустрией 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. Пиксели организованы в массив 32×32 , давая 1024 пикселя на трубку. Размер пикселя составляет $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ на уровне фотокатода ? В общей сложности 484 HPD плотно упакованы, формируя 4 плоскости фотодетекторов. Каждый из двух RICH детекторов использует две плоскости, 196 HPD в RICH1, 288 — в RICH2. Плоскости фотодетекторов отделены от радиатора кварцевым окном, что позволяет содержать HPD в CO_2 . Чипы передней электроники смонтированы непосредственно в вакуумном пространстве внутри HPD ? .

The Cherenkov photons emitted by charged particles passing through the RICH radiators are focused into ring images on the photon detector planes, situated outside of the spectrometer acceptance. A novel hybrid photon detector (HPD) was developed in collaboration with industry specifically for application in the LHCb RICH system [11]. The HPDs employ vacuum tubes with a 75 mm active diameter, with a quartz window and multialkali photocathode. The photoelectrons are focused onto a silicon pixel array, using an accelerating voltage of -16 kV. The pixel array is arranged in 32 columns and 32 rows, giving a total of 1024 pixels per tube. The pixel size is $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ at the level of the photocathode. A total of 484 HPDs are close-packed to cover the four photodetector planes. Two planes are employed in each RICH, with 196 tubes used in RICH1 and 288 in RICH2. The photodetector planes are separated from the radiator gas volumes by quartz windows, and the photodetector volumes are maintained in an atmosphere of CO_2 . The front-end electronics chip is encapsulated within the HPD vacuum tube, and bump-bonded to the silicon pixel sensor, which results in extremely low noise (typically 150 e- RMS per pixel for a signal of 5000 e- [12,13]). The tubes also feature high detection efficiency, with an active area fraction of about 82%. The quantum efficiency is about 30% at 270 nm.

Электроника

1.3.3 HERA-b RICH

Эксперимент HERA-b

? пару слов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.10.

HERA-B, a fixed target experiment (see Fig. 1) at the HERA storage ring at DESY, was designed [1] to measure rare processes in the decays of B mesons. The B mesons are produced in collisions of 920 GeV/c protons with a fixed target, which consists of 8 wires which can be individually inserted into the halo of the proton beam in order not to disturb experiments measuring ep collisions. One of the essential components of the spectrometer is the Ring Imaging Cherenkov counter (RICH) [1,2,3,4]. The main purpose of the RICH counter is the identification of charged hadrons, in particular kaons from decays of B mesons. Identifying charged kaons essentially means separating them from pions in the momentum range between 3 GeV/c and about 50 GeV/c at an interaction rate of up to 40 MHz.

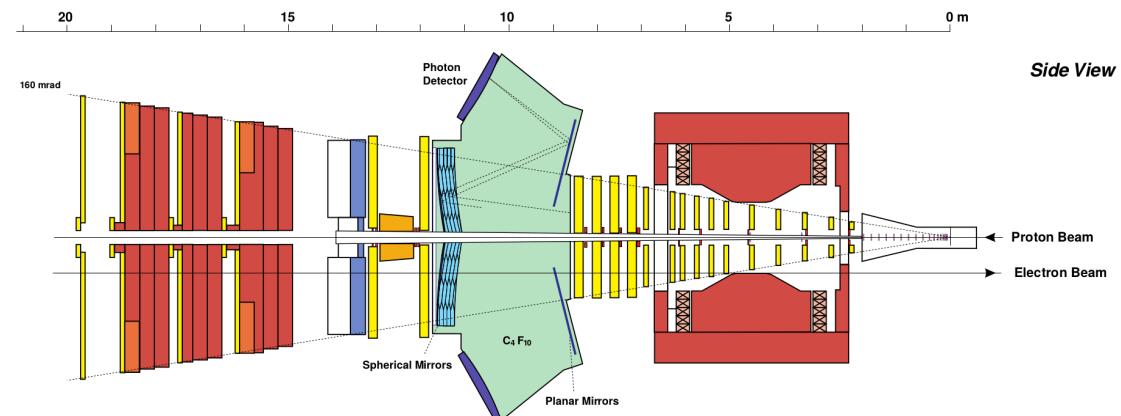


Рис. 1.10: Схема установки HERA-b.

Общие слова о HERA-b RICH и его физической задаче

Корпус и радиатор

Схема детектора RICH эксперимента HERA-b показана на рис. 1.11. Он имеет газовый радиатор C_4F_{10} объёмом 108 м³ и массой 1100 кг. Длина радиатора 2.8 м, коэффициент преломления $n=1.00137$, порог импульса для рождения Черенковских фотонов для пионов и каонов 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 пионами и каонами составляет 0.9 мрад при 50 ГэВ/с . Радиатор поддерживается при избыточном давлении 2.5 мбар.

Корпус детектора изготовлен из нержавеющей стали, кроме передней и задней стенок 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.

Зеркала и опоры

Система фокусировки состоит из двух пар зеркал, расположенных симметрично относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Первое зеркало сферическое, второе — плоское. Сферические зеркала (см. рис. 1.12) составлены из 80 полных или обрезанных шестиугольных сегментов, имеют радиус 11.4 м и толщину 7 мм. Они покрывают прямоугольную область 6×4 м, общая площадь 24 м^2 . Каждый сегмент крепится к раме трёмя моторизированными актуаторами с удалённым управлением. Для фокусировки за пределы геометрического аксептанса сферические зеркала наклонены на 9° от пучка. Каждое из двух плоских зеркал состоит из 18 сегментов.

The mirror, a $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ rectangular cutout from the sphere, consists of 80 full or partial hexagons made from 7 mm thick Pyrex glass, coated with 200 nm of aluminum and 30 nm of MgF_2 .

Фотодетекторы

HERA-b RICH имеет две фоточувствительные камеры, расположенные соответственно над и под пучком. Одна фоточувствительная камера (см. рис. 1.13) 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 soft iron. 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 $18 \times 18 \text{ мм}^2$ е 4-пиксельного R5900-03-M4.

Электроника

МА ФЭУ монтируются на платы-адаптеры $70 \times 70 \text{ мм}^2$, 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 пары длиной 7.5 м к драйверам передней электроники (front end dirver, FED). 1 FED имеет 4 дочерние платы, к каждой 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.

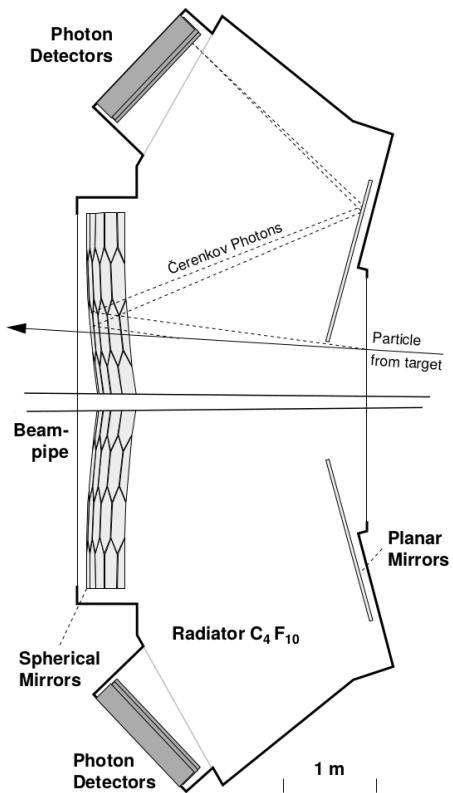


Рис. 1.11: Схема детектора HERA-b RICH.

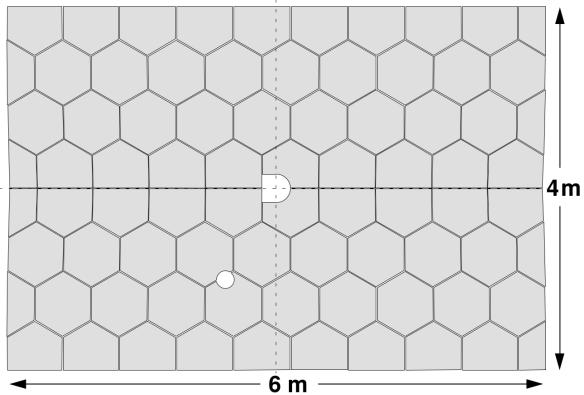


Рис. 1.12: Схема компоновки сферических зеркал HERA-b RICH.

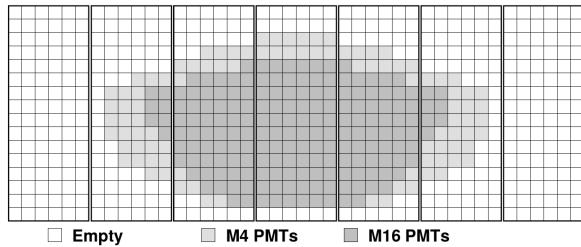


Рис. 1.13: Схема заполненности одной фоточувствительной камеры HERA-b RICH. Одна ячейка соответствует модулю из 8 МА ФЭУ.

1.4 Обработка сигнала с детектора

Экспериментальная установка в физике высоких энергий или физике тяжёлых ионов ставит своей задачей восстанавливать события, произошедшие в области первичного взаимодействия. Такой областью будет являться точка взаимодействия пучка с мишенью в случае эксперимента с фиксированной мишенью, либо точка взаимодействия встречных пучков на коллайдерном эксперименте. Для выполнения этой задачи в некоторой области рядом с точкой взаимодействия ставят набор из нескольких детекторов, регистрирующих вторичные частицы и их продукты распада. Детекторы вырабатывают электрические сигналы, которые в случае современного крупного эксперимента необходимо доставить в ЭВМ, чтобы выполнять программную обработку, включающую в себя реконструкцию треков и частиц и анализ многочисленных распределений.

В этой главе обсуждаются решения, выбранные СВМ для организации считывания данных с детекторной установки.

Задача: дать общую картину — детектор, передняя электроника, передающая электроника, ЭВМ. Затем указать, что вот типа электроника с внешним триггером, а вот самотриггирующаяся электроника. Далее переходим к free-running DAQ.

Рассмотрим общую последовательность обработки сигнала детектора частиц. Источни-

ком является некоторое детектирующее устройство (или просто детектор). В зависимости от типа детектируемых частиц и внешних условий — радиационная среда, температура, частота регистрации — это может быть фотодиод, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), полупроводниковый детектор, микроканальная пластина, газовый электронный умножитель, и т.д. Все эти детекторы обладают таким общим свойством, что выходной сигнал, несущий информацию о зарегистрированной частице, это относительно слабый токовый импульс. В любом случае, для того, чтобы выполнять дальнейшую обработку этого сигнала в ЭВМ его необходимо оцифровать.

В связи с этим обрабатывающую электронику условно можно разделить на переднюю и остальную. Основная задача передней электроники — оцифровать выходной аналоговый сигнал детектирующего устройства, при необходимости предварительно его усилив и отфильтровав. Передача аналогового сигнала затруднена, поэтому его обработка и оцифровка обычно выполняется как можно ближе к месту, где этот сигнал вырабатывается, т.е. непосредственно на детекторе. В простом случае последующие слои электроники концентрируют и передают оцифрованные сигналы со многих каналов передней электроники. В более сложном случае возможна какая-то аппаратная обработка оцифрованных сигналов, например архивация или фильтрация с целью уменьшения потока данных.

Разработан целый ряд подходов к оцифровке сигналов с детекторов. Каждый из них лучше всего подходит к определённому детектору, однако возможно применение методов, разработанных для одного детектора, для оцифровки сигналов с другого детектора. Перечислим лишь некоторые из них. Если не вдаваться в подробности реализации, можно выделить следующие способы: регистрация момента времени прихода фронта, регистрация амплитуды сигнала, непрерывное семплирование (ещё?). Практически всегда требуется регистрация момента времени прихода сигнала, поэтому широко применяются комбинации перечисленных способов — регистрация амплитуды сигнала вместе с моментом времени прихода переднего фронта, регистрация моментов времени переднего и заднего фронтов без захвата амплитуды, регистрация момента времени переднего фронта и формирование ограниченного числа семплов после него.

Если необходимо предварительное усиление, то применяют один из двух типов усилителей — зарядочувствительный усилитель либо ?. В силу устрйства зарядочувствительный усилитель является также формирователем (шейпером). Любая электроника подвержена шумам, поэтому для подавления шумов сигнал обычно предварительно проходит фильтр нижних частот, эффективно отрезающий частоты выше некоторого значения. (Что-то сказать про шейпирование и его неизбежность и влияние на временные характеристики) Ещё один способ борьбы с шумами — фильтрация по амплитуде, т.е. установление некоторого порога по напряжению, ниже которого сигнал игнорируется.

Описанные процедуры обработки сигнала могут быть реализованы на разной аппаратной платформе. Самый примитивный вариант — это когда канал реализуется с применением “сквозного монтажа” (THT) или “поверхностного монтажа” (SMT, SMD) ? таких-то компонентов. В принципе, это возможно, но в этом случае геометрические размеры определяют заметное время прохождения сигнала, таким образом ограничивая частоту функционирования. Также габариты ограничивают плотность каналов в пространстве и, вообще говоря, стоимость такой электроники выше современных компактных вариантов. В эксперименте СВМ ожидается огромное число каналов при очень высокой плотности в пространстве. Один только детектор RICH будет иметь более 60000 каналов при плотности каналов около $0.5 \text{ см}^2/\text{канал}$. Следовательно, рассматриваются более продвинутые технологии — интегральные схемы, в том числе программируемые.

На данный момент существует множество разновидностей интегральных схем, однако наибольший интерес в СВМ (экспериментальной физике?) проявляется к интегральным

схемам специального назначения (ASIC) и программируемым пользователем вентильным матрицам (ППВМ, FPGA). ASIC уже широко применяются в экспериментальной физике и в быту на протяжении десятилетий, в то время как ППВМ доступны сравнительно недавно. Эти два варианта принципиально отличаются тем, что ASIC невозможно изменить после изготовления, а FPGA не имеет какой-либо программы по умолчанию и программируется пользователем. Более того, программа FPGA стирается при отключении питания, поэтому рядом необходимо обеспечить постоянную память, из которой FPGA берёт программу при загрузке. Процесс проектирования FPGA фактически заключается в процессе разработки прошивки на языке описания аппаратуры (HDL, verilog), при этом в любой момент есть возможность применить прошивку к чипу чтобы выполнить отладку. Достоинство ASIC заключается в том, что чипы изготавливаются относительно дёшево при большом размере партии. Высокую стоимость имеет шаблон, на основе которого можно дёшево изготовить большую партию чипов. С другой стороны процесс проектирования ASIC осложнён тем, что если для отладки требуется физический экземпляр, а не программная модель, то требуется изготовление шаблона.

Рассмотрим схему, когда аналоговый импульс с детектора обрабатывается электроникой, регистрирующей момент времени прихода переднего фронта. Любой сигнал переключается за некоторое ненулевое время, поэтому необходимо определить точку, обозначающую фронт. Для этого применяют дискриминатор — прибор, вырабатывающий логический “0”, когда входной сигнал ниже установленного порога, и логическую “1”, когда входной сигнал выше установленного порога. Таким образом точка пересечения сигнала и порога это точка, условно обозначающая момент времени прихода сигнала. На выходе дискриминатора получается логический сигнал, который необходимо преобразовать в цифровой с помощью время-цифрового преобразователя (ВЦП). На выходе ВЦП уже будет цифровой сигнал, а не логический.

Коллаборацией СВМ ведётся разработка нескольких чипов, на базе которых будут построены платы передней электроники. STS-XYTER — ASIC для кремниевой трековой системы, регистрирующий амплитуду сигнала и временную отметку переднего фронта. SPADIC — ASIC для детектора переходного излучения, имеющий богатый функционал, но, самое главное, выполняющий непрерывное семплирование входного сигнала. (**Наверное, нет смысла описывать подробнее — слишком сложный чип**) Группы СВМ RICH, HADES RICH и PANDA DIRC совместно занимаются разработкой программ для FPGA, выполняющих функции дискриминатора и ВЦП.

(Тут нужно обсудить и почитать ещё. Возможен ли такой сценарий, в наше время или в прошлом, когда триггер чисто аналоговый. То есть передняя электроника игнорирует сигнал до тех пор, пока не сработает схема совпадения с триггером. В той модели традиционного триггера, которую я себе сейчас представляю, входной сигнал обрабатывается непрерывно, но выпускается на выход из буфера только при наличии триггера. Вероятно, возможно и то и то, но вопрос в том, что реально используется, что более распространено.) Рассмотрим систему считывания и сбора данных “традиционного” эксперимента, имеющего аппаратный триггер. Каждый канал передней электроники имеет выходной буфер, куда по принципу FIFO складываются оцифрованные входные сигналы. В экспериментальной установке присутствуют детекторы, вырабатывающие триггер — сигнал, который заводится (условно) на каждый канал считывания, и говорит о том, что произошло интересное событие, которое необходимо сохранить для последующей обработки. Данный подход имеет свои причины. Во-первых, до недавнего времени физические эксперименты не требовали высоких частот регистрации — выполнение физической программы при относительно низких частотах первичного взаимодействия было осуществимо в разумные сроки. Во-вторых, многие регистрирующие приборы имеют заметное “мёртвое время” — время после регистра-

ции одного входного сигнала, в течение которого прибор не может обрабатывать последующие входные сигналы. Следовательно, если канал регистрирует ложный входной сигнал, велика вероятность того, что будет пропущен полезный сигнал. С развитием электроники “мёртвое время” уменьшалось. Более того, возможность применения принципиально другой считающей электроники, как например чисто временной канал, реализованный в ППВМ, для обработки сигналов с МА ФЭУ в СВМ RICH, исследуемая в данной работе, позволяет на порядки снизить “мёртвое время” и повысить точность регистрации временной отметки в ущерб полноты информации.

(Сюда подмешивается секция 2.2 ?)

В СВМ планируется использование программного триггера. Это означает, что для того, чтобы принять решение, сохранять принятые данные или нет, необходимо выполнить полную реконструкцию события, включая реконструкцию треков, которая является высокозатратной задачей. Рассматривается также возможность на определённых этапах работы установки использовать для выработки триггера частичную реконструкцию. Например исследуется возможность триггирования по результатам реконструкций треков только в MUCh, когда стоит задача поиска (? такой-то частицы).

В “традиционном” эксперименте триггер может формироваться в результате логических операций над сигналами с нескольких детекторов, реализованных аппаратно. Такая логика работает за (? масштаб времени). Реконструкция треков выполняется за гораздо большее время (? на столько-то порядков выше). По этой причине необходимо иметь не только буфер в электронике — его будет недостаточно.

(Сказать о том, что нужно хорошо настраивать пороги.)

1.4.1 Система считывания и сбора данных эксперимента СВМ

Блок-схема архитектуры системы считывания и сбора данных эксперимента СВМ приведена на рис. 1.14.

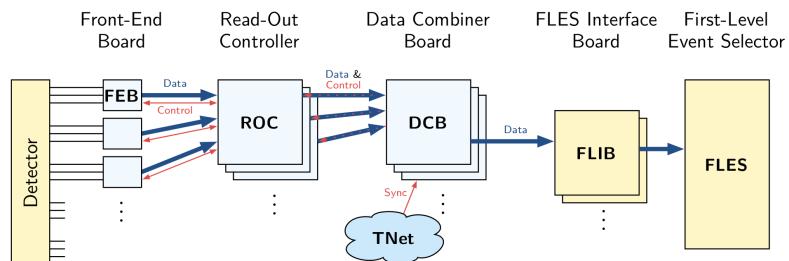


Рис. 1.14: Система считывания и сбора данных СВМ.

Развёрнутое описание выше делается для понимания этой секции.

Источником электрических сигналов являются детекторы, выполненные по разным технологиям, и требующие оцифровки различными способами. Эта оцифровка выполняется разнообразными платами передней электроники (FEB), имеющими разные принципы и основанными на различных чипах. Затем цифровые данные опрашиваются с плат передней электроники контроллерами считывания (ROC). После этого данные группируются в соответствующих платах (DCB) и поступают во FLES через платы FLIB.

1.4.2 FLES

переработать Всё вместе привело к разработке аппаратно-программного комплекса, называемого системой отбора первого уровня — First Level Event Selector (FLES). По сути DAQ-часть (приём данных) неотделима от FLES, поэтому иногда эту систему называют FLES/DAQ. Отличительные черты FLES — самотrigгирующаяся электроника, несколько уровней концентрации данных, многочисленные буферы, формирование срезов времени, построение интервалов и только после этого мы переходим к построению событий.

Функционал FLES/DAQ можно разбить на три части. Первая — приём и объединение данных, поступающих с группы каналов, в срезы времени (timeslice). Такую группу образует некоторое множество каналов одного детектора, количество которых определяется ожидаемым потоком данных, а ограничение диктуется максимальной пропускной способностью входного канала FLES.

Один из наиболее важных и нестандартных этапов работы FLES — это построение интервалов (Interval building, IB). Построение интервалов — это получение контейнеров с данными со всех детекторов за некоторый интервал времени путём перегруппировки данных из срезов времени. Суть построения интервалов показана на рис. 1.15. Данные от одного “входного узла” (input node, IN) 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” (processing node, computing node, CN).

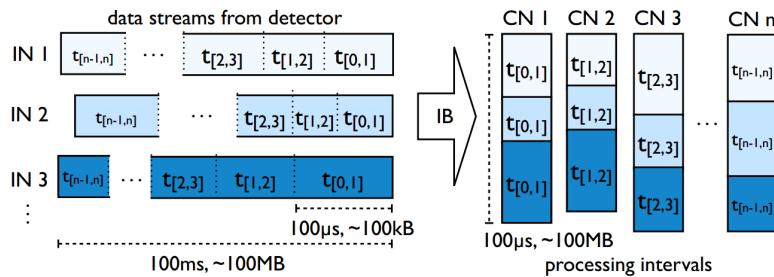


Рис. 1.15: Построение интервала.

Заключительный 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 эксперимента СВМ был выполнен оценочный расчёт. Отправная точка — возможно сохранение 1 Гбайт/сек данных. 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. $25 \cdot 10^6 \cdot 40$ Кбайт = 1 Тбайт/сек. Планируется разбить этот поток в 1 Тбайт/сек на 1000 входных каналов FLES, каждый по 1 Гбайт/сек, передающихся по 10-Гбитным оптическим каналам связи. Один входной канал FLES соответствует одному “входному узлу” — ЭВМ с установленной платой FLIB. Все вычисления, необходимые для отбора данных будут осуществляться на так называемых “вычислительных узлах”. Входные и вычислительные узлы объединены в компьютерную сеть посредством InfiniBand QDR, образуя уникальную распределённую вычислительную

систему, называемую FLES, см. рис. 1.16. Вычислительная подсеть будет иметь приблизительно 60000 ядер.

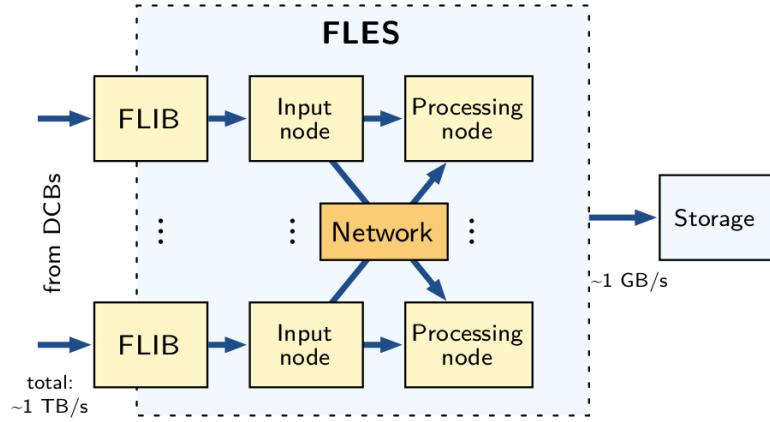


Рис. 1.16: Общая схема устройства FLES.

Планируется также, что FLES сможет функционировать в особом режиме, когда для выполнения реконструкции с целью отбора данных для сохранения будет использоваться только часть входного потока. На рис. 1.17 приведена блок-схема функционирования FLES в таком режиме. Это имеет смысл при работе эксперимента над некоторыми пунктами физической программы, но принципиальная возможность и эффективность реконструкции частиц с целью триггирования по ограниченному набору детекторов является предметом исследований. Например, можно восстанавливать ? такую-то частицу только по трекам в MUCH. При этом система приёма данных работает в полную силу — идёт приём со всех детекторов и никакие данные не выбрасываются до тех пор, пока не будет выполнена реконструкция по данным с MUCH. Если в результате реконструкции выясняется, что принятая порция данных потенциально интересна, то она извлекается из буферов и записывается. Это позволяет ? снизить поток сохраняемых данных в ? раз, что особенно актуально при экстремально высоких частотах взаимодействия.

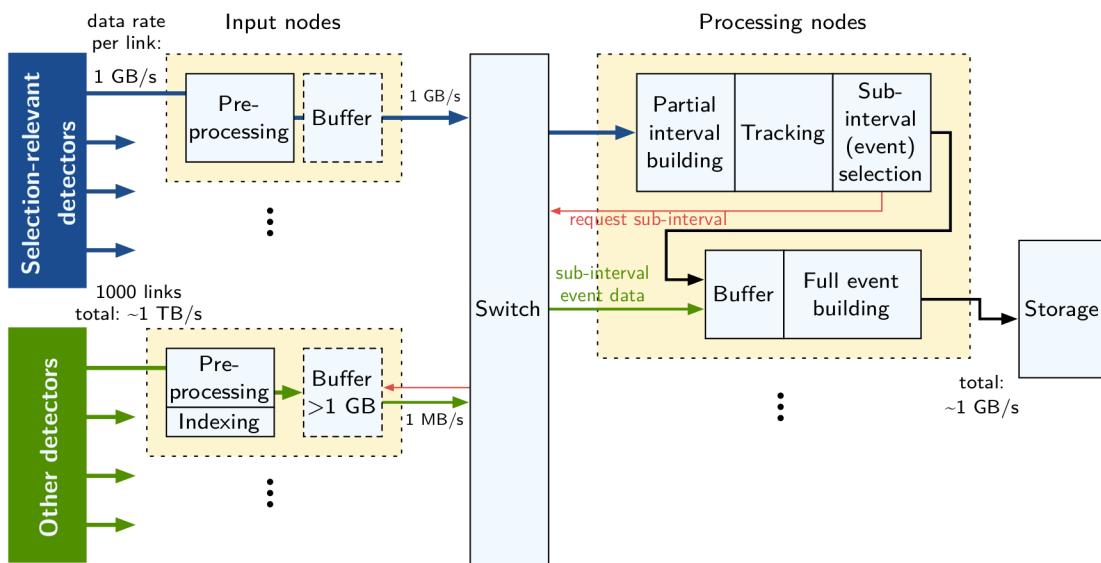


Рис. 1.17: Блок-схема функционирования FLES в режиме отбора по данным с части детекторов.

? Подробное описание того, что на картинке

FLES Interface Board

В качестве платы-интерфейса между электроникой, разрабатываемой специально для СВМ, и ЭВМ стандартной архитектуры, будет выступать плата, в общем называемая платой интерфейса FLES — FLES Interface Board, или FLIB. 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. В качестве платформы для реализации FLIB в СВМ рассматривается коммерческая PCI-E плата HTG K-7. Архитектура FLIB показана на рис. 1.18. Основные компоненты FLIB — драйверы входных оптических портов, программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ, FPGA), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и драйвер шины PCI-Express.

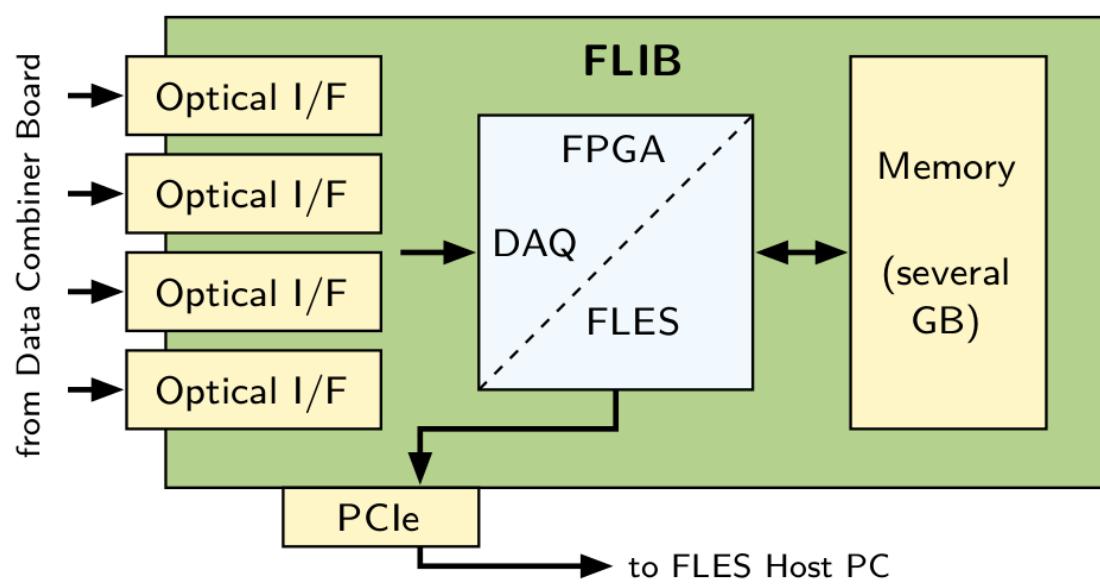


Рис. 1.18: Архитектура FLIB.

Список литературы

- [1] *H. H. Gutbrod* // FAIR Baseline Technical Report, ISBN: 3-9811298-0-6, 2006.
- [2] *B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp and P. Senger* // The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments, Lect. Notes Phys. **814** (2011) pp. 980.
- [3] *P. Senger and V. Friese* // The CBM Collaboration: Nuclear Matter Physics at SIS-100, GSI, Darmstadt (2012) 18 p.
- [4] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. GSI, Darmstadt (2005) 406 p.
- [5] *V. Friese and C. Sturm* // CBM Progress Report 2014, ISBN: 978-3-9815227-2-3, 2015.
- [6] *A. Malakhov and A. Shabunov* // Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet, GSI, Darmstadt (2013) 80 p.
- [7] *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>
- [8] *J. Heuser et al.* // Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS), GSI, Darmstadt (2013) 167 p.
- [9] *C. Höhne et al.* // Technical Design Report for the CBM Ring Imagine Cherenkov (RICH), GSI, Darmstadt (2013) 201 p.
- [10] *S. Chattopadhyay et al.* // Technical Design Report for the CBM Muon Chambers (MuCh), GSI, Darmstadt (2014) 192 p.
- [11] *S. Biswas et al.* // Development of a GEM based detector for the CBM Muon Chamber (MUCH), 2013 JINST 8 C12002.
- [12] *M. Petris et al.* // TRD detector development for the CBM experiment, NIM A, Volume 732, 21 December 2013, Pages 375–379.
- [13] *N. Herrmann et al.* // Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF), GSI, Darmstadt (2014) 182 p.
- [14] *I. Korolko* // CBM Calorimeter for SIS100 (TDR status), 25th CBM Collaboration Meeting, Darmstadt, 20-24 April 2015.
<https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=138&sessionId=29&resId=1&materialId=slides&confId=2960>

- [15] *F. Guber et al.* // Technical Design Report for the CBM Projectile spectator detector (PSD), GSI, Darmstadt (2014) 78 p.
- [16] Hamamatsu H12700 manual, <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700 TPMH1348E.pdf>
- [17] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 and R12699-03 multi-anode photomultiplier tubes, 2015 JINST 10 P09021.
- [18] *M. Calvi et al.* // Characterization of the Hamamatsu H12700A-03 multi-anode photomultiplier tube for the LHCb RICH upgrade, LHCb-INT-2015-006.
- [19] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966 TPMH1327E.pdf
- [20] T. Mahmoud RICH2016 proceedings.
- [21] *C. Pauly et al.* // The CBM RICH project, NIM A 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.05.102.
- [22] *S. Reinecke et al.* // The CBM-RICH detector, JINST 11 (2016) no.05, C05016.
- [23] J. Kopfer PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal.
- [24] Official TRB project web site, <http://trb.gsi.de/>
- [25] *C. Ugur, S. Linev, J. Michel, T. Schweitzer, and M. Traxler* // A novel approach for pulse width measurements with a high precision (8 ps RMS) TDC in an FPGA, 2016 JINST 11 C01046.
- [26] TRB v3 documentation, <http://jspc29.x-matter.uni-frankfurt.de/docu/trb3docu.pdf>
- [27] *W. M. Zablotny and G. Kasprowicz* // Data processing boards design for CBM experiment, Proc. SPIE 9290, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014, 929023 (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2073377;
- [28] *J de Cuveland et al.* // A First-level Event Selector for the CBM Experiment at FAIR, 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 331 022006.
- [29] *J. Michel, M. Faul, J. Friese, C. Höhne, K.-H. Kampert, V. Patel, C. Pauly, D. Pfeifer, P. Skott, M. Traxler, and C. Ugur* // Electronics for the RICH detectors of the HADES and CBM experiments, 2017 JINST 12 C01072.
- [30] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Data acquisition and online monitoring software for CBM test beams, 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 396 012001.
- [31] *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.
- [32] *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.
- [33] *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, 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 724 012037.

- [34] Information about the T9 beam line and experimental facilities, http://home.web.cern.ch/sites/home.web.cern.ch/files/file/spotlight_students/information_about_the_t9_beam_line_and_experimental_facilities.pdf
- [35] *L.M. Kotchenda, P.A. Kravtsov* // CBM RICH PROTOTYPE GAS SYSTEM.
- [36] *J. Adamczewski-Musch et al.* // Determination of tolerances of mirror displacement and radiator gas impurity for the CBM RICH detector, doi: 10.1016/j.nima.2014.04.074
- [37] *J. Bendarouach, C. Höhne, and T. Mahmoud* // Mirror misalignment control system and prototype setup, CBM Progress Report 2014, p.56.
- [38] Roithner UVTOP240 datasheet, http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deeppuv/uvtop240.pdf
- [39] *M. Dürr, J. Kopfer et al.* // Influence of wavelength-shifting films on multianode PMTs with UV-extended windows, NIM A, Volume 783, 21 May 2015, Pages 43–50.
- [40] Alphalas Picopower-LD series datasheet, http://www.alphalas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHALAS.pdf
- [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- [43] FLESnet development repository, <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
- [44] *J. Adamczewski-Musch, S. Linev, E. Ovcharenko, and C. Ugur* // HADES trbnet data formats for DABC and Go4, PHN-SIS18-ACC-41, GSI SCIENTIFIC REPORT 2012, p.297.
- [45] *R. Szplet, J. Kalisz, and R. Pelka* // Nonlinearity correction of the integrated time-to-digital converter with direct coding, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 46:449–453, April 1997.
- [46] *С.А. Лебедев, Г.А. Осоков* // Быстрые алгоритмы распознавания колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента CBM, Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т.6, №2(151). С.260-284.
- [47] *S. Lebedev, C. Höhne, I. Kisiel, G. Ososkov* // Fast Parallel Ring Recognition Algorithm in the RICH Detector of the CBM Experiment at FAIR, ACAT2010 proceedings.
- [48] *E. Ovcharenko, S. Belogurov et al.* // Tests of the CBM RICH readout and DAQ prototype, PEPAN letters.
- [49] M. Dürr, private communication.
- [50] *D.V. O'Connor, D. Phillips* // Time Correlated Single Photon Counting, Academic Press, London 1984.
- [51] *F. Gonnella, V. Kozhuharov, M. Raggi* // Time over threshold in the presence of noise, NIM A, Volume 791, p. 16-21.
- [52] Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование 2002 Физматлит ISBN 5-94052-048-0