

**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	3
0.1 STAR@RHIC	5
0.2 ALICE@LHC	6
0.3 MPD@NICA	6
0.3.1 CBM	6
Список литературы	13

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 материей 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 π , K , p , Λ , Ξ , 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 downscaled, 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 $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

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)

π^+ , K^+ , p , ρ , ω , ϕ , Ω , D^0 , J/ψ

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 CBM нацелена на исследование свойств сверхплотной барионной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях при энергии пучка от 2 до 45 ГэВ/нуклон. CBM проектируется с учётом необходимости справляться с измерением высокой статистики адронных, лептонных и фотонных проб в большом аксептансе. 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 (странность 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 ω , которые предоставят ценную информацию о внутренних процессах при ожидаемом восстановлении киральной симметрии в плотной барионной материи.

ω плоскость реакции - ω

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

Экспериментальная задача CBM — 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/ψ 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 и высокая плотность мишени позволяет работать при высокой частоте взаимодействий.

В эксперименте CBM, 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 ср^{-1} .

? Все эти факторы приводят к необходимости совершенствования методов моделирования детекторов, включая высокий уровень детализации описания геометрии и возможность 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 CBM (далее CBM RICH).

Цели:

- разработать инструментарий 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;
- создать гибкое и точное описание детектора CBM 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 CBM RICH в составе полнофункционального прототипа указанного детектора на пучковых тестах;
- провести исследование свойств прототипа системы считывания и сбора данных детектора CBM RICH на основе результатов пучковых тестов и измерений на лабораторном стенде.

Научная новизна 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 CBM RICH выполнена оптимизация компоновки детектора.
6. Собран прототип системы считывания и сбора данных детектора CBM 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 CBM RICH.
9. Разработано программное обеспечение для построения событий из бестриггерного потока данных с детектора CBM RICH в среде CbmRoot.
10. Проведены пучковые тесты прототипа системы считывания и сбора данных в составе полнофункционального прототипа детектора CBM RICH и дополнительные тесты на лабораторном стенде.
11. Проведено комплексное исследование свойств канала считывания и сбора данных для CBM 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 сместителя 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.
15. Исследованы характеристики детектора CBM RICH с учетом неидеальности геометрии и шумов электроники.

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 CBM RICH в среде CbmRoot.
3. Реализация прототипа системы считывания и сбора данных CBM RICH и проведение его тестов на пучке в составе полнофункционального прототипа этого детектора а также дополнительных тестов на лабораторном стенде.
4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для приема, упаковки и передачи бестриггерного потока данных, для калибровки точного времени и относительных задержек каналов и для построения событий из потока данных с детектора CBM RICH в среде CbmRoot.

5. Результаты комплексного исследования временных свойств канала считывания и сбора данных для CBM RICH, реализованного на основе многоанодного ФЭУ H12700 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 временным и аналоговым трактами.
8. Исследование характеристик детектора CBM RICH с учетом неидеальности геометрии и шумов электроники.

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)”, Падуа, 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 (CHENP)”, 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 CBM; 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 CBM RICH и проводится сравнение с аналогичными приборами из ряда других экспериментов; формулируются конкретные задачи, связанные с описанием геометрии детектора CBM RICH в среде Монте-Карло; обсуждается концепция системы считывания и сбора данных эксперимента CBM и воплощение этой концепции в системе считывания и сбора данных детектора CBM 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 CBM 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 CBM 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.

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 Image 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. Zabolotny and G. Kasproicz* // 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. Caragheorghopol 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_deepuv/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] Alphas Lasers Picopower-LD series datasheet, http://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Picosecond_Pulse_Diode_Lasers_with_Driver_PICOPOWER-LD_ALPHAS.pdf
- [41] <http://www.rz.uni-frankfurt.de/39888789/syscore>
- [42] <http://cbmroot.gsi.de/>
- [43] FLESnet development repository, <https://github.com/cbm-fles/flesnet>
- [44] *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] *C.A. Лебедев, Г.А. Ососков* // 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. Kisel, 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