

**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

<b>Введение</b>	<b>3</b>
0.1 STAR@RHIC . . . . .	5
0.2 ALICE@LHC . . . . .	6
0.3 MPD@NICA . . . . .	6
0.4 CBM@FAIR . . . . .	6
<b>1 Эксперимент CBM@FAIR и особенности детектора черенковских колец CBM RICH</b>	<b>13</b>
1.1 Экспериментальная установка CBM . . . . .	15
1.1.1 Вакуумная камера и пучковая труба, мишень и стартовый детектор .	17
1.1.2 Дипольный магнит . . . . .	17
1.1.3 Вершинный микрорадар MVD . . . . .	17
1.1.4 Кремниевая трекинговая система STS . . . . .	19
1.1.5 Детектор черенковских колец RICH . . . . .	20
1.1.6 Мюонная система MUCH . . . . .	20
1.1.7 Детектор переходного излучения TRD . . . . .	21
1.1.8 Время-пролётный детектор TOF . . . . .	22
Стартовый детектор SD . . . . .	23
1.1.9 Электромагнитный калориметр ECAL . . . . .	24
1.1.10 Детектор непровзаимодействовавших осколков PSD . . . . .	24
1.2 CBM RICH поподробней . . . . .	24
<b>Список литературы</b>	<b>26</b>

# 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  $\mu_B$ , 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  $\mu_B$  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 ( $T, \mu_B$ ) 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  $\phi$ . 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  $\mu$  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  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ,  $\Lambda$  Коллективные потоки и идентификация адронов Электромагнитные измерения ( $e$ ,  $\gamma$ )

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

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

## 0.4 CBM@FAIR

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  $25^\circ$ , будет лететь до 400 заряженных частиц в одной реакции, а максимальная угловая плотность частиц в центральной области детектора будет достигать  $100 \text{ sr}^{-1}$ .

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 CBM (далее CBM RICH).

## Цели:

- разработать инструментарий для облегчения создания детальных геометрических моделей, предназначенных для таких сред Монте-Карло моделирования прохождения частиц через вещество, как Geant4 и ROOT, а также для обмена геометрической информацией между этими средами и САПР CATIA;
- 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 и практическая ценность работы:

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 работы:**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ЛИТ ОИЯИ и на различных международных конференциях и совещаниях, в том числе:

1. Семинар 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 buidler’ 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.

Третья глава посвящена применению пакета “CATIA-GDML geometry builder” для детектора СВМ RICH. В ней подробно рассмотрены задачи, требующие точного описания геометрии механических конструкций детектора и системы крепления и позиционирования зеркал, учета эффектов, связанных с отклонением позиционирования зеркал от номинального, размещения и экранирования от магнитного поля фотодетекторов. Описаны созданные параметризованные геометрические модели и проведенные с их помощью исследования свойств детектора СВМ RICH. Кроме того, даются рекомендации по эффективному применению использованного инструментария.

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).

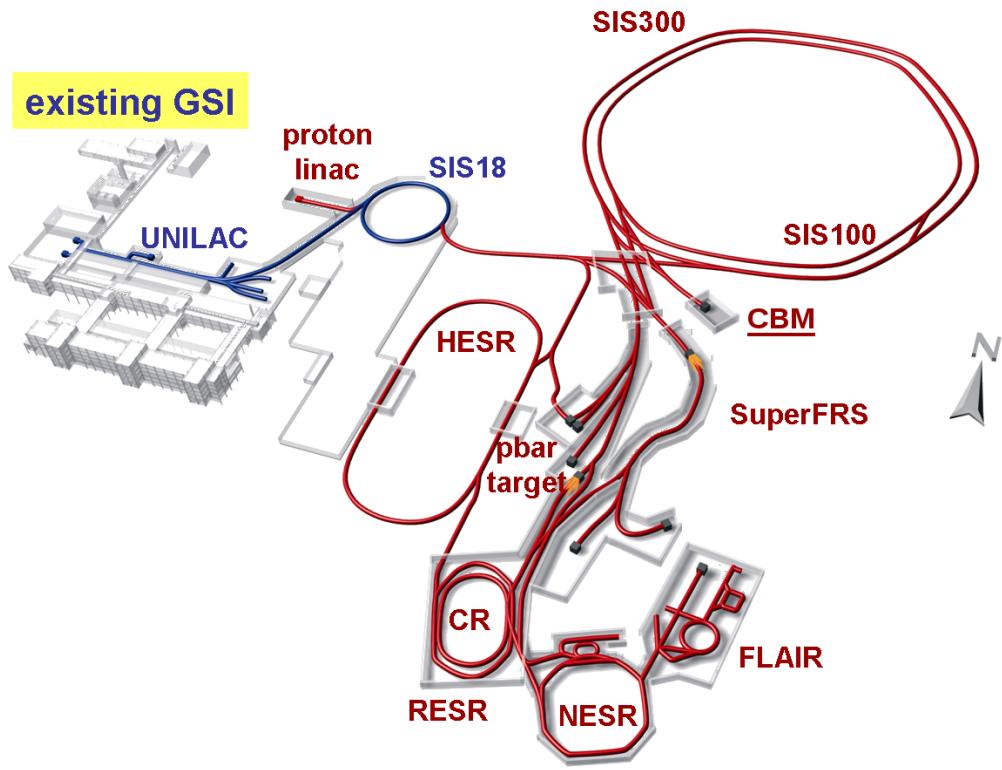


Рис. 1.1: Схема FAIR.

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.

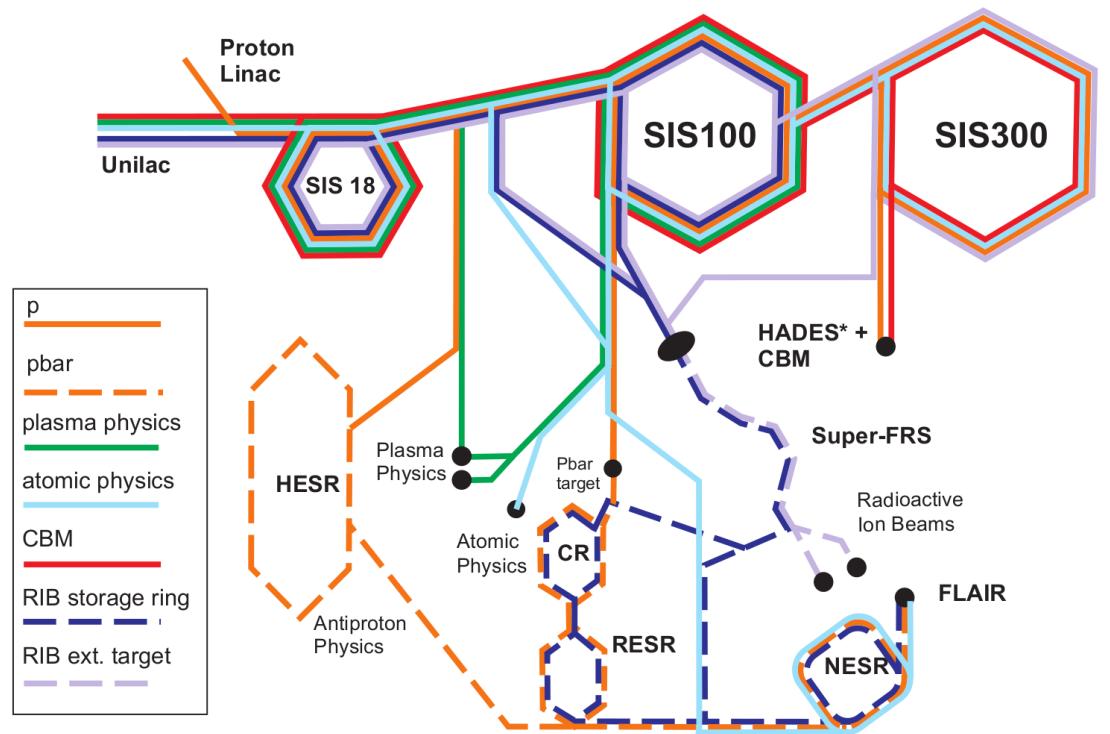


Рис. 1.2: Схема FAIR.

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

**См. английские оригиналы в комментах тех.**

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.

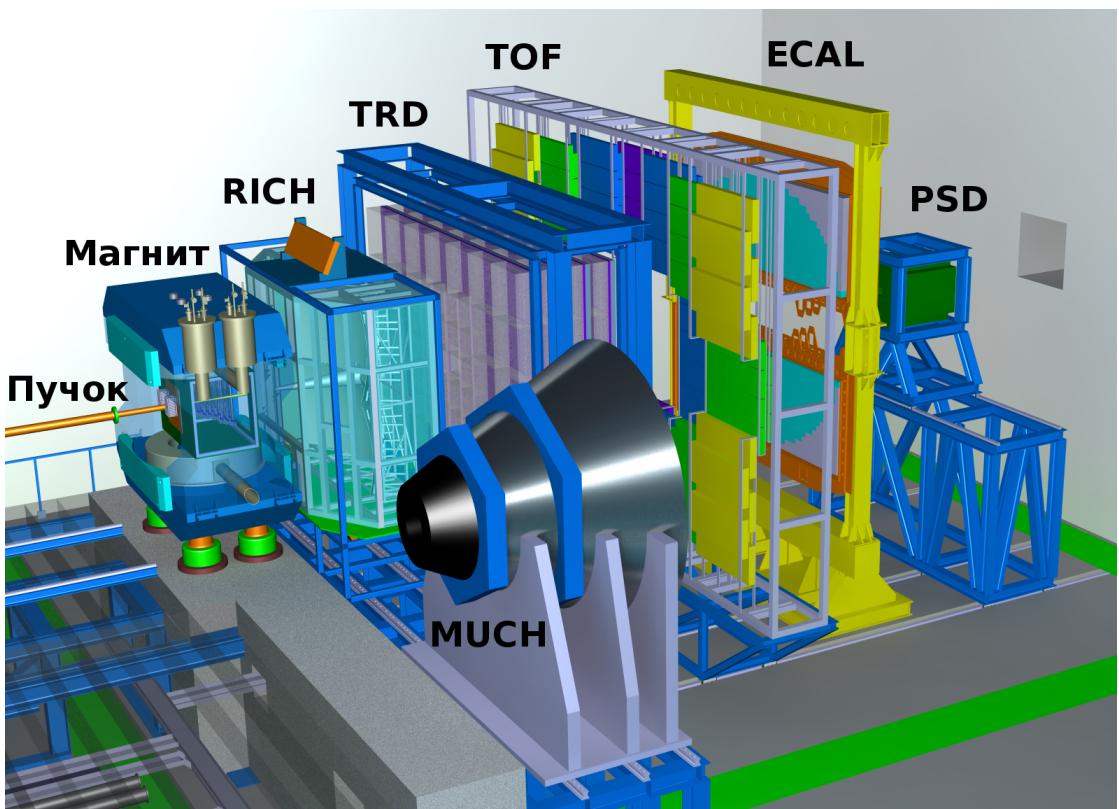


Рис. 1.3: Общий вид экспериментальной установки СВМ в конфигурации с RICH.

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  $J/\psi$  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 ( $\pi^0, \eta$ ) [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 Вакуумная камера и пучковая труба, мишень и стартовый детектор

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 ?.

Для измерения момента времени первичного взаимодействия пучка с мишенью, который необходим для измерения времени пролёта вторичных частиц с помощью TOF, вблизи мишени будет расположен стартовый детектор. ? Более подробно стартовый детектор описан в секции 1.1.8.

### 1.1.2 Дипольный магнит

### 1.1.3 Вершинный микродетектор MVD

Вершинный микродетектор (Micro Vertex Detector, MVD) является первым трекинговым устройством установки СВМ и расположен внутри вакуумной камеры (см. рис. 1.4). MVD состоит из четырёх двухсторонних станций на расстояниях 5, 10, 15 и 20 см от мишени (вниз по пучку ?). MVD улучшает разрешение трековой системы СВМ, позволяя таким образом идентифицировать редкие частицы по пространственному отклонению вершины распада. Open charm particles ? несут информацию о свойствах ядерной материи на ранних этапах столкновения тяжёлых ионов. Их измерение позволит более глубоко понять сложные многочастичные (многотельные?) процессы в процессе столкновения. В таблице 1.1 приведены наблюдаемые, измерение которых возможно за счёт использования MVD. Помимо этого, широкий геометрический аксептанс MVD вносит значительный вклад в трекинг частиц с низким импульсом, что повышает способность системы к подавлению фона при измерении распадов по диэлектронному каналу.

Таблица 1.1

Частица	Канал распада	Коэф. ветвления	Время жизни, $\text{с}\tau$ ?
$D^+$	$K^- + \pi^+ + \pi^+$	9%	$315\mu\text{m}$
$D^0$	$K^- + \pi^+$	4%	$124\mu\text{m}$
$\lambda_C$	$p + K^- + \pi^+$	5%	$62\mu\text{m}$

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

На рис. 1.5 показано устройство сенсора MVD. На части чипа сенсора реализована предварительная обработка сигнала. По тонким гибким шлейфам к сенсорам подводится питание и осуществляется считывание. Детектор MVD будет испытывать значительные радиационные нагрузки, поэтому особое внимание уделяется охлаждению активных сенсоров. За пределами геометрического аксентанса расположены платы передней электроники и система жидкостного охлаждения, соединённая с сенсорами с помощью CVD алмазной пластины. ? Данные (800 Mbps/сенсор) считаются радиационно-стойкими пассивными платами передней электроники и отправляются в DAQ-систему по стандарту HADES-TRB3.

**Какие-то слова о системе считывания, пока что аналогичной той, что используется в СВМ. Временное разрешение  $5\mu\text{s}$  ? ? ?**

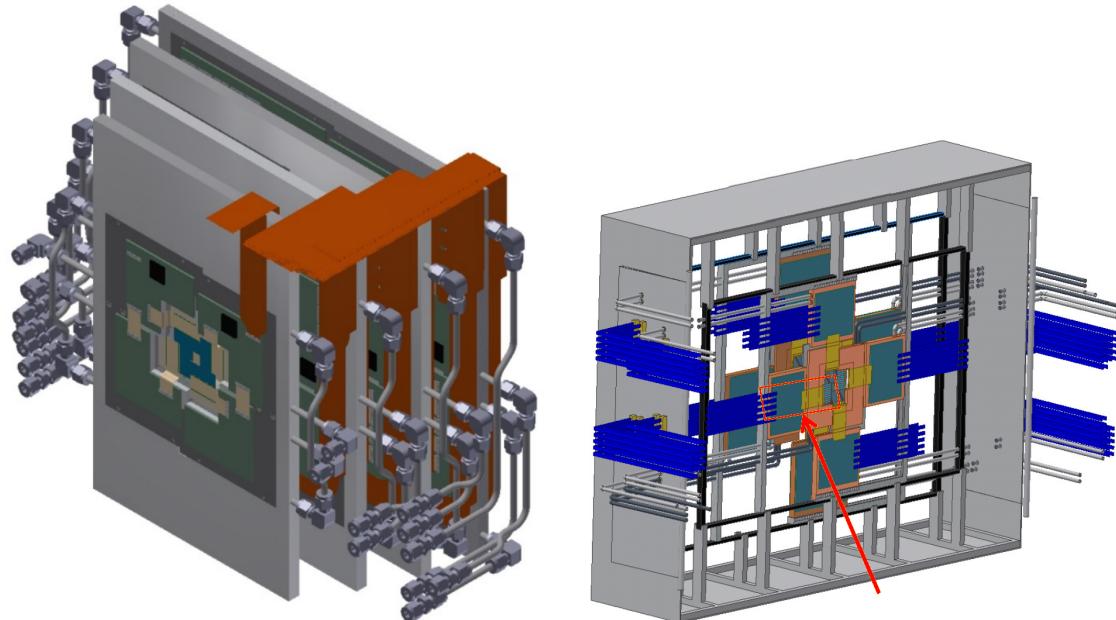


Рис. 1.4

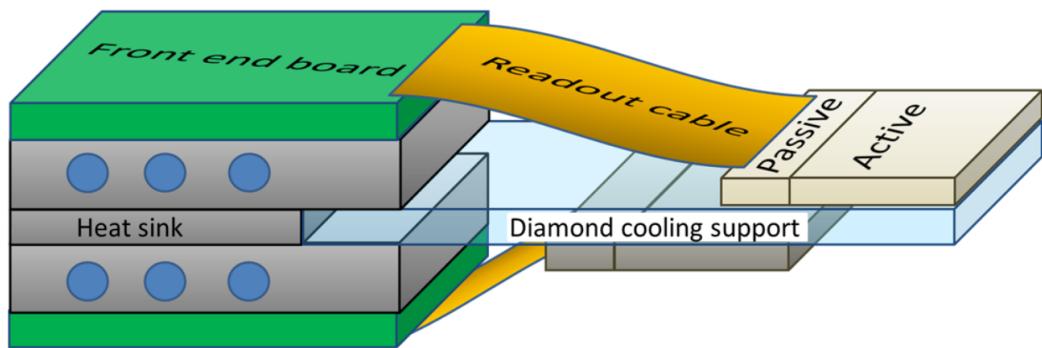


Рис. 1.5

#### 1.1.4 Кремниевая трекинговая система STS

Задача кремниевой трековой системы (Silicon Tracking System, STS) — 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  $7.5^\circ$ . 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  $-5^\circ\text{C}$ . Тепло, рассеиваемое считающей электроникой, отводится с помощью  $\text{CO}_2$  системы охлаждения. Механические опоры детектора и соединения спроектированы так, чтобы была возможность заменить отдельный модуль системы не отсоединяя остальные.

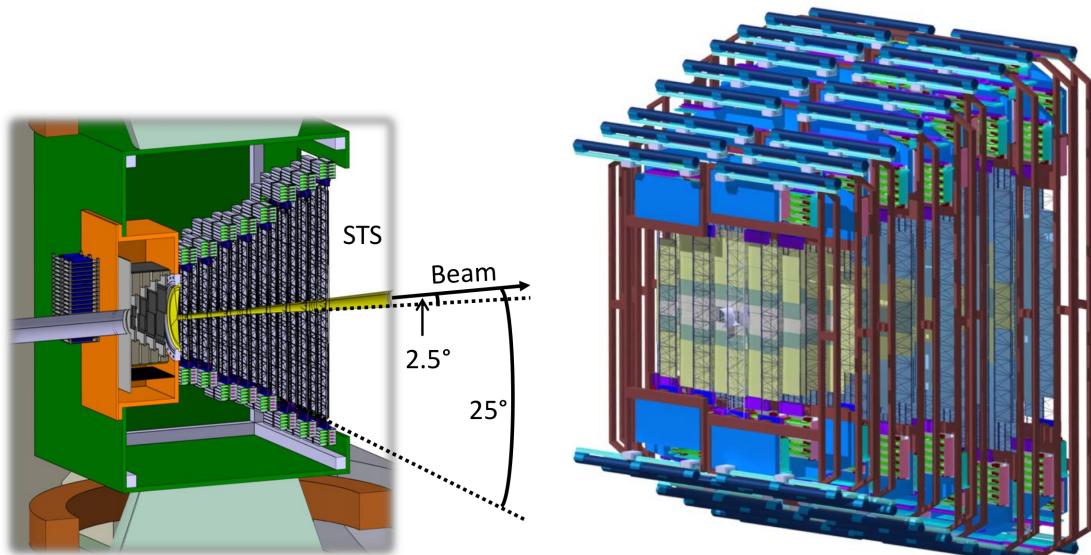


Рис. 1.6

Считывание STS будет осуществляться специально разработанной электроникой, в основе которой лежит чип STS-XYTER. Чувствительный к амплитуде. Столько-то бит в АЦП. Такие-то параметры по времени. Столько-то каналов.

### **1.1.5 Детектор черенковских колец RICH**

Детектор черенковских колец (Ring Imaging Cherenkov detector, RICH).

### **1.1.6 Мюонная система MUCH**

Мюонная система (MUon Chambers, MUCH) необходима для идентификации мюонных пар, рожденных в высокогенергетических 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 фаербала. 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  $\pi^+$ ? радиация от фаербала, которая говорит о его температуре. В области инвариантных масс около 3 ГэВ/ $c^2$  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 тяжелых 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 абсорбераом толщиной 1 м для того, чтобы идентифицировать чармоний при самых высоких энергиях SIS100. По введению в эксплуатацию SIS300 мюонная система будет обновлена введением дополнительной станции абсорбера 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).

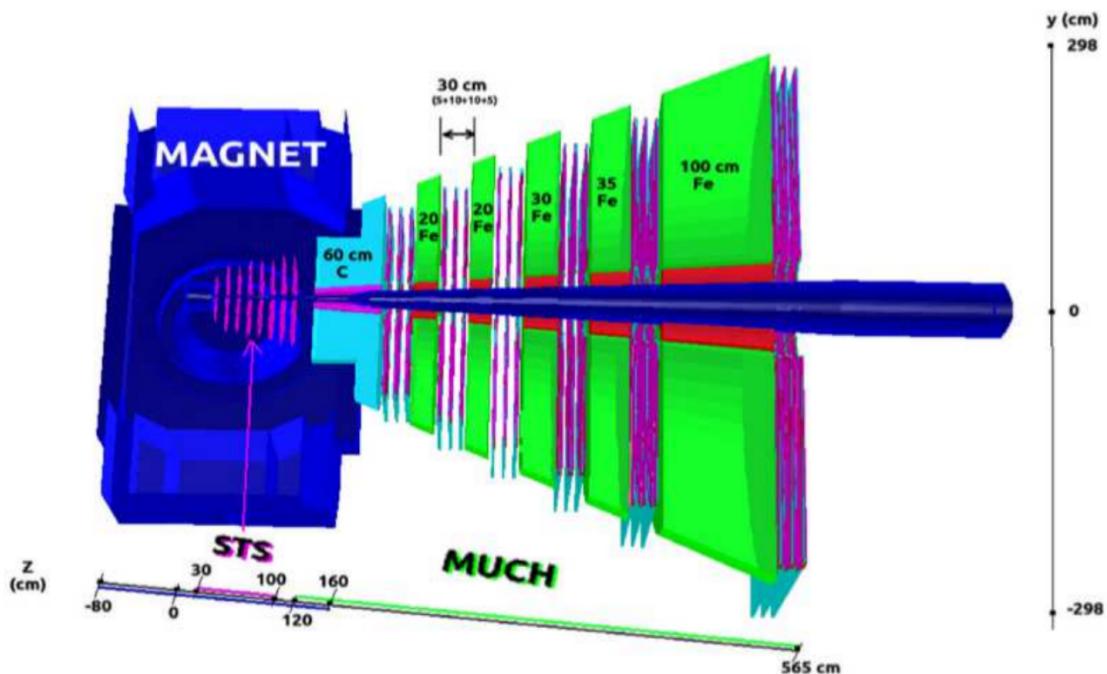


Рис. 1.7

### 1.1.7 Детектор переходного излучения TRD

Основная задача детектора переходного излучения (Transition Radiation Detector, TRD) — идентифицировать электроны с импульсом более 1 ГэВ/с для того чтобы расширить возможности детектора RICH по идентификации частиц в диапазоне импульсов около 5 ГэВ/с . Такая идентификация должна быть достигнута при коэффициенте подавления пионаов порядка 10–20 для получения возможности измерения дигелектронов в диапазоне масс от  $\rho$  и  $\omega$  и выше  $J/\psi$ . 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, дейтронов 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 аборбером MUCH, в мюонной конфигурации CBM.

### 1.1.8 Время-пролётный детектор TOF

**В TDR есть неплохие картинки (см. стр 74).**

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

Так как СВМ 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  $12 \times 9$  м<sup>2</sup>. 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/cm<sup>2</sup> 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 СВМ 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.

СВМ TOF будет собран из MRPC счётчиков 4 типов, организованных в модули 6 типов. Счётчики и модули выполнены по двум технологиям:

- 1) модули, расположенные близко к пучку (M1–M3) — внутри малого полярного угла — ? Счётчики оборудованы low resistivity glass и имеют электроды  $32 \times 10$  см<sup>2</sup> и  $32 \times 20$  см<sup>2</sup>
- 2) Остальные модули (M4–M6)

По той причине, что СВМ требует широкий диапазон энергий пучка, планируется, что TOF будет установлен на подвижной опоре, позволяющей изменять расстояние от мишени

до стены TOF.

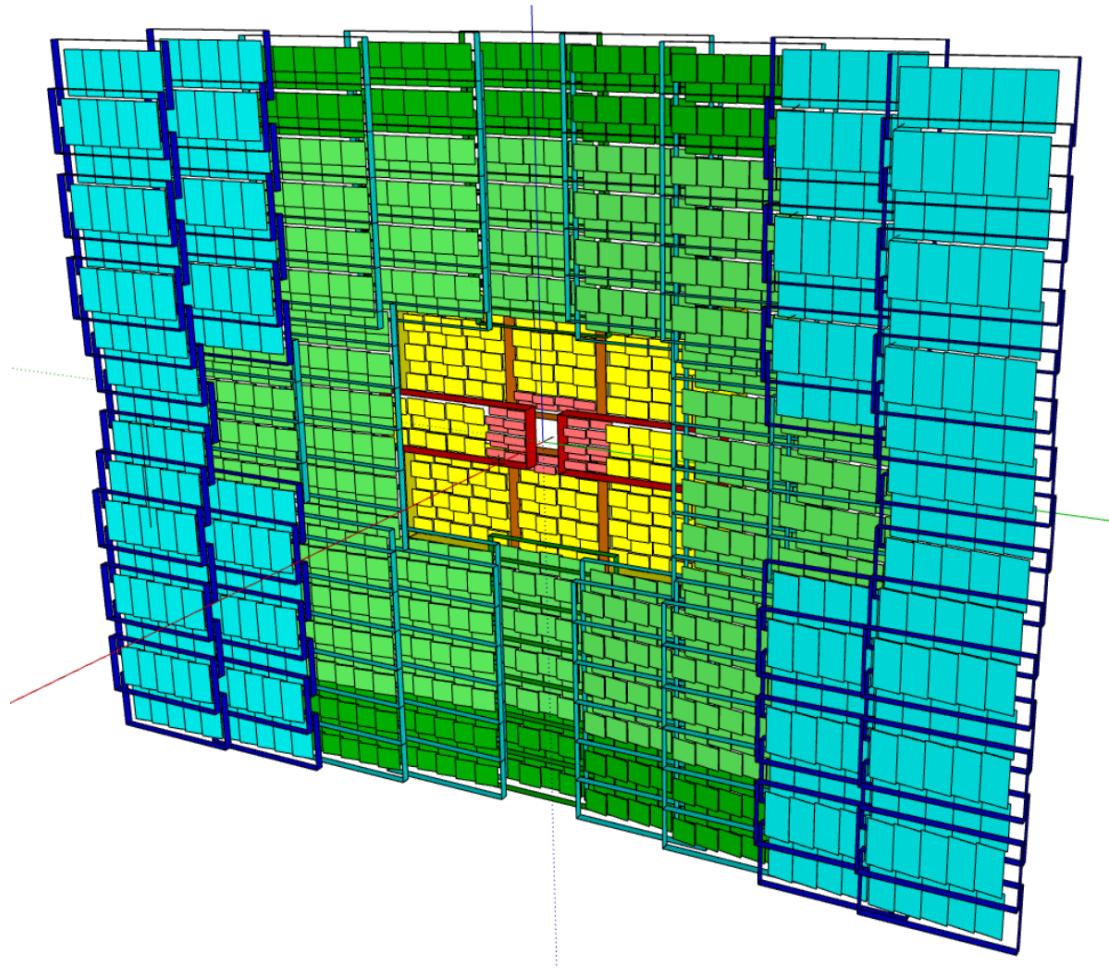


Рис. 1.8

### Стартовый детектор SD

Система для измерения времени пролёта возможна только при наличие детектора, регистрирующего момент старта — временную отметку  $T_0$  первичного взаимодействия.

Высокочастотный стартовый детектор (Start Detector, SD), выполненный из алмаза и расположенный на пучке, может удовлетворить все требования СВМ, включая полный диапазон пучка — от протонов до тяжёлых ионов. Такой детектор в то же время может эффективно использоваться для онлайн диагностики пучка, мгновенно выдавая информацию о профиле пучка, стабильности его положения по отношению к мишени, о количестве частиц в гало ? и о временной структуре пучка.

SD будет расположен внутри вакуумной камеры. Его толщина должна быть минимальна, чтобы минимизировать взаимодействие с пучком.

### 1.1.9 Электромагнитный калориметр ECAL

В эксперименте СВМ будет установлен электромагнитный калориметр (Electromagnetic CALorimeter, ECAL) типа “шашлык”, схожий с калориметрами экспериментов HERA-B, PHENIX и LHCb. Он будет использоваться для измерения прямых фотонов и нейтральных мезонов ( $\pi^0, \eta$ ), 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

Конфигурация для SIS-100 имеет 4352 канала считывания, составленные из 1088 модулей одного типа (6 см×6 см).

### 1.1.10 Детектор непровзаимодействовавших осколков PSD

#### ? не провзаимодействовавших или непровзаимодействовавших ?

Основная задача детектора непровзаимодействовавших 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.

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

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

## 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 речами.

# 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, 25<sup>th</sup> 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), 25<sup>th</sup> 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](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](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](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](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