

На правах рукописи

Финогеев Дмитрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА БЕСТРИГГЕРНОЙ
ПОТОКОВОЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ
ПЕРЕДНЕГО АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА
ЭКСПЕРИМЕНТА СВМ**

01.04.01 — «приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук

Научный руководитель: *Губер Федор Фридрихович*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Отдел экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. *Волков Алексей Анатольевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение экспериментальной физики, Лаборатория инклюзивных процессов, ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности начальника лаборатории.
2. *Яшин Иван Васильевич*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева, лаборатория космической рентгеновской и гамма-астрономии, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета

Д 002.119.01, канд. физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Исследование свойств ядерной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях при релятивистских энергиях, является одной из актуальных задач современной ядерной физики. Фазовая диаграмма КХД (Квантовая Хромодинамика) изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности на коллайдерах RHIC и LHC. В этих экспериментах на коллайдерах проводятся исследования свойств ядерной материи при сверхвысоких температурах и почти нулевых барионных плотностях [1]. Квантовая Хромодинамика предсказывает, что при очень низких барионных плотностях, когда количество частиц и античастиц примерно одинаково, происходит плавный переход из состояния адронной материи в кварк-глюонную плазму при температуре выше 160 МэВ [2–4] рис. 1, слева. Предполагается, что обратный процесс происходил во Вселенной в течение первых нескольких микросекунд после Большого взрыва.

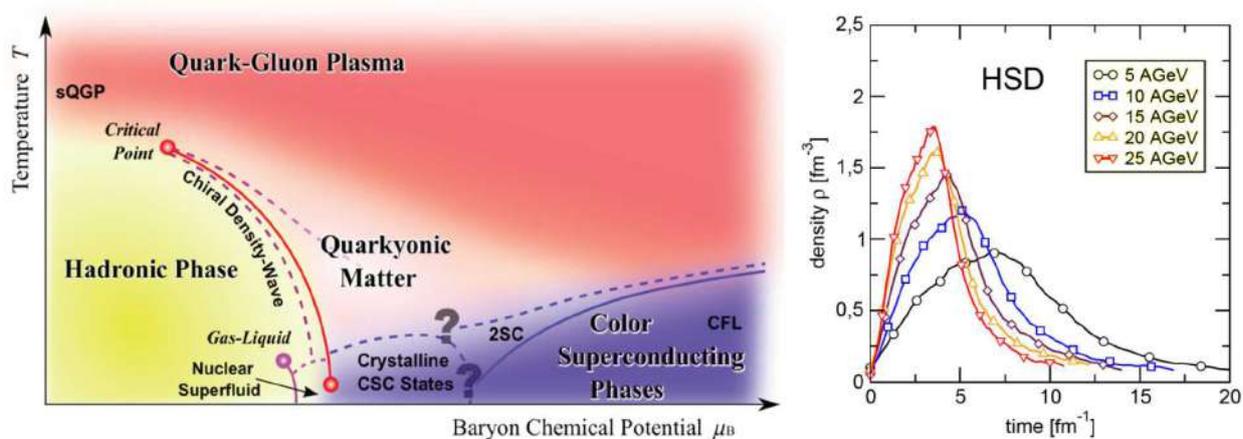


Рис. 1 — Слева: Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи [4]; справа: плотность барионов как функция от времени реакции для центральных столкновений Au + Au при различных энергиях, рассчитанных с помощью транспортной модели HSD (Hadron-String-Dynamics) [5].

Для больших значений барионной плотности и меньших температур фазовая диаграмма КХД имеет более сложную структуру. При конечных значениях барионного химического потенциала, ожидается фазовый переход первого рода между адронной и партонной или кваркионной материей, заканчивающийся критической точкой, а также киральный фазовый переход. Экспериментальное открытие этих особенностей фазовой диаграммы КХД было бы большим прорывом в нашем понимании свойства ядерной материи. Для

этого необходимы количественные экспериментальные измерения свойств адронов в плотной ядерной материи, которые могут пролить свет на восстановление киральной симметрии и происхождение адронных масс.

В настоящее время, уже существует целый ряд экспериментов, направленных на изучение ядерной материи и исследование фазовой диаграммы КХД при высоких барионных плотностях, которая образуется в столкновениях тяжелых ионов. Область высокой плотности на фазовой диаграмме в настоящее время изучается в эксперименте HADES [6] на выведенном пучке тяжелых ионов с ускорителя SIS18 в GSI (Дармштадт, Германия) с энергией пучка до 2 АГэВ и в коллайдерном эксперименте BES на установке STAR RHIC [7; 8] при энергиях 14.5 - 200 ГэВ в системе центра масс. В эксперименте NA61/SHINE [9; 10] на ускорителе SPS в CERN выполнен целый ряд экспериментов при энергиях пучка в диапазоне от 13 до 150 АГэВ. В этих экспериментах изучаются выходы частиц, их угловые и импульсные распределения с целью поиска начала деконфаймента и критической точки фазового перехода первого рода в ядро-ядерных взаимодействиях.

Большие возможности для изучения фаз плотного вещества КХД и определения характерных процессов-индикаторов фазовых превращений, появятся на установке NICA, сооружаемой в ОИЯИ, Дубна [11]. Однако, перечисленные эксперименты ведутся при достаточно низких интенсивностях пучка, что ограничивает изучение выходов частиц в этих реакциях.

В настоящее время в Дармштадте (Германия) создается ускорительный комплекс FAIR (Facility for Antiproton Ion Research), на котором будут проводиться исследования элементарных частиц, физики атомного ядра, свойств антивещества, а также для решения прикладных задач в области материаловедения и медицинских технологий.

Эксперимент CBM (Compressed Baryonic Matter), который создается на FAIR, будет работать с пучками тяжелых ионов с интенсивностью до 10^9 ионов в секунду что позволит исследовать свойства сжатой барионной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов с энергиями в диапазоне 2 – 11 АГэВ. При этом, как показывают расчеты по транспортным моделям (рис. 1, справа), в процессе очень короткого времени столкновения, плотность ядерной материи, образующейся в центральных столкновениях в реакции Au + Au при энергии пучка ядер золота 10 АГэВ [5], может превосходить в семь

раз плотность насыщения обычной адронной материи. При таких условиях нуклоны перекрываются между собой, и теория предсказывает переход материи в смешанную фазу барионов и кварков. Исследование уравнения состояния ядерной материи при таких больших плотностях, близких к плотности нейтронных звезд, имеет приложения и к вопросам астрофизики.

Актуальность темы.

В эксперименте СВМ будут исследоваться процессы рождения частиц, содержащие как обычные, так и очарованные кварки. Векторные мезоны, такие как ω , ρ и ϕ мезоны, образуются непрерывно при аннигиляции в ходе реакции и распадаются либо снова на мезоны, либо на пару лептонов. Поскольку лептоны не участвуют на поздних стадиях процесса столкновения, исследования дилептонных распадов векторных мезонов ω , ρ и ϕ , а также, D- и J/ Ψ -мезонов позволят узнать о состоянии ядерной материи в момент столкновения двух ядер.

Измерения выходов и коллективных потоков мульти-странных гиперонов и мезонов, имеющие малые сечения взаимодействия с адронами, также позволяют исследовать свойства материи в плотной фазе столкновения. Для проведения измерений выходов частиц в столкновениях тяжелых ионов установка СВМ оснащена рядом детекторных систем для событийной идентификации частиц и измерения их энергии в условиях высоких скоростей счета и радиационных нагрузок. Для измерения геометрии столкновения тяжелых ядер (центральность столкновения и ориентация плоскости реакции) установка СВМ будет использовать передний адронный калориметр – Projectile Spectator Detector (PSD).

Этот калориметр разрабатывается и изготавливается в ИЯИ РАН в рамках соглашения между ИЯИ РАН и FAIR. Работы включают не только разработку и изготовление модулей калориметра, но и разработку электроники калориметра, а также такую актуальную работу, как разработка бес-триггерной системы сбора данных с калориметра, ее синхронизацию с системами сбора данных с других детекторных систем СВМ, а также интеграцию системы сбора данных с калориметра в общую систему сбора данных эксперимента СВМ. Для изучения редких процессов в эксперименте СВМ необходимо выполнять реконструкцию и отбор таких событий во время набора данных при загрузках калориметра до 1 МГц, подавления фоновых событий

на уровне 1:100 и обеспечить запись только тех данных, которые необходимы для дальнейшего физического анализа. Таким образом, задача разработки бестриггерной системы сбора данных калориметра PSD, которая обеспечит работу и управление детектором при высоких загрузках является важной и актуальной задачей.

Цели и задачи диссертационной работы

Система сбора данных калориметра PSD должна осуществлять регистрацию сигналов фотодетекторов калориметра в диапазоне от 2.5 мВ до 1.5 В без общего триггера, обеспечивать определение заряда сигнала и разделение сигналов при их наложении друг на друга. Измерение времени заряда должно выполняться синхронно с другими детекторами эксперимента CBM. Для обеспечения бестриггерного режима сбора данных эксперимента CBM, все сигналы детектора при загрузке до 1 МГц должны быть обработаны и переданы в вычислительный кластер эксперимента CBM для реконструкции и отбора событий. Использование протокола GBT предпочтительно для проектирования системы сбора данных калориметра PSD, поскольку этот протокол отвечает всем требованиям эксперимента и является стандартным решением для детекторов CBM. Разработанная система сбора данных должна быть интегрирована в общую систему обработки данных эксперимента CBM и протестирована в условиях приближенных к эксплуатационным.

Целью работы положенной в основу диссертации, является разработка и тестирование потоковой системы сбора данных с переднего адронного калориметра эксперимента CBM, ее интеграция в общую систему сбора данных CBM. Разработанная система отвечает всем требованиям, предъявляемым к детектору PSD на эксперименте CBM. В связи с высоким радиационным фоном вблизи детектора, аналоговые сигналы с фотодетекторов калориметра передаются по коаксиальным кабелям длиной 60 м на детекторную электронику без пред-усиления, что позволяет добиться высокого динамического диапазона и хорошего разделения сигнала от шума. Для регистрации сигналов без общего триггера, определения заряда сигналов и разделения сигналов при их наложении друг на друга были применены математические методы цифровой обработки сигналов, реализованные в ПЛИС (Программируемая Логическая Интегральная Схема) детектирующей электроники.

Научная новизна и практическая значимость

Классическая схема регистрации элементарных частиц в физическом эксперименте подразумевает наличие триггерного сигнала для сбора данных с детекторных систем. Триггерный сигнал, вырабатывается в триггерных детекторах, и позволяет отделение полезного сигнала регистрируемых частиц от фоновых событий, импульсов теплового шума в детектирующих элементах, и т.п. Триггерный сигнал обеспечивает индикацию «полезного» события для передачи данных и выполняет роль синхроимпульса для измерения времени события синхронно для всех детекторных систем эксперимента. Для соответствия триггера «полезному» физическому событию, он вырабатывается по определенным условиям в триггерных детекторах, и также, по одновременному срабатыванию триггерных детекторных установок эксперимента.

Бестриггерная система сбора данных подразумевает набор данных независимо каждой детекторной системой эксперимента, передачу данных в единый кластер для обработки и анализа данных, реконструкцию и отбор событий с использованием данных со всех детекторных систем и передачу данных в систему записи для дальнейшего физического анализа. Одна из первых бестриггерных систем сбора данных была применена в 2004 г. для детектора «Near Detector» в эксперименте MINOS [12] в «Fermilab» по изучению осцилляций нейтрино. Несмотря на то, что данные набирались по стро-бу от спила ускорителя, регистрация сигналов выполнялась в считывающей электронике без общего триггера, а разделение полезных событий от фона выполнялась с помощью процессорных вычислений с реконструкцией событий. Скорость передачи данных детектора «MINOS Near Detector» составляла 10 МБ/с. Реализации «бестриггерной» системы сбора данных для непрерывной регистрации продуктов реакции при столкновении ядер на пучках с высокой интенсивностью, требует сложных алгоритмов регистрации событий детекторной установкой, высокоскоростную передачу данных от каждого детектора в общую систему сбора данных и мощного вычислительного центра для обработки данных. В 2009–2011 гг. было предложено использование бестриггерной системы сбора данных для экспериментов PANDA [13] и CBM [14] на строящемся ускорительном комплексе FAIR. В 2013–2014 гг. бестриггерная система сбора данных была предложена для экспериментов LHCb [15] и ALICE [16] на LHC. Впервые данный метод был реализован в 2021 г. на

экспериментах LHCb [17] и ALICE [18] в рамках модернизации ускорителя LHC для выполнения программы «Run 3».

Разработка бестриггеной потоковой системы сбора данных велась автором параллельно как для детектора FIT@ALICE на LHC, так и для детектора PSD@CBM на FAIR. Первые испытания бестриггерной системы сбора данных для детектора PSD были проведены в 2019 г. В детекторе PSD применяется прямая оцифровка сигналов с помощью "блока цифровой обработки" и обработка событий с применением фильтра FIR (Finite Impulse Response). Разработанная электроника для детектора PSD регистрирует сигналы от 2.5 мВ до 1.5 В, что обеспечивает динамический диапазон $\times 500$ при подстройке напряжения смещения фотодетекторов калориметра для температурной коррекции их усиления. Прямая оцифровка малых сигналов без использования активной электроники на стороне детектора, является новым подходом для проектирования систем сбора данных с детекторов в ядерной физике, позволяющим реализовать максимально возможный динамический диапазон детектора.

Система сбора данных эксперимента CBM основана на передаче данных с чипа GBTx разработанного в CERN [19]. Чип GBTx является радиационно-стойким и предназначен для сбора данных с детекторной установки находящийся в зоне с высоким радиационным фоном. GBTx позволяет передавать данные на скорости 3,2 – 4,48 Гб/с, осуществляет синхронизацию тактового сигнала электроники и управление детекторной частью. Использование GBTx в системе сбора данных с детекторных установок является новым подходом в современной ускорительной физике, который применен впервые в 2021 г. на экспериментах ALICE, ATLAS, LHCb, CMS [20] на ускорителе LHC и также будет реализован в экспериментах CBM и PANDA на ускорителе FAIR. Разработанная система сбора данных для калориметра PSD позволяет реализовать бестриггерный сбор данных по протоколу GBT, сортировку и анализ событий на наличие наложений вычислительными методами ПЛИС во время измерения. Научная значимость разработки системы сбора данных детектора PSD определяется задачами переднего адронного калориметра в эксперименте CBM на ускорителе FAIR.

Методология и методы исследования

Разработка системы сбора данных калориметра PSD включает тестирование электроники для регистрации сигналов от фотодетекторов калориметра, разработку и отладку логической структуры ПЛИС и программного обеспечения для работы электроники, а также тестирование системы сбора данных в условиях, близких к эксплуатационным. Тестирование электроники с фотодетекторами калориметра проводилось на специально созданном рабочем стенде в ИЯИ РАН и на установке mCBM в институте GSI.

Установка mCBM собрана из прототипов всех детекторных систем эксперимента CBM для их тестирования на выведенных пучках ионов с ускорителя SIS18 в GSI при загрузках и радиационных условиях максимально приближенных к эксплуатационным на установке CBM, а также для тестирования бестриггерной системы сбора данных с этих детекторов. Один из модулей калориметра PSD (mPSD) также тестируется на mCBM.

Для тестирования разделительной способности сигнал/шум был проведен набор данных с помощью разработанной системы сбора данных при регистрации модулем калориметра космических мюонов – частиц с минимальной ионизацией. Для изучения возможности регистрации сигналов с фотодетекторов, переданных по коаксиальному кабелю длиной 60 м электроникой калориметра PSD, и определения динамического диапазона системы, были проведены тесты по регистрации сигналов фотодетектором от лазера с ультракоротким импульсом длительностью 200 пс. Для тестирования разработанной системы сбора данных в условиях, приближенных к эксплуатационным, были проведены тесты по набору данных на пучках установки mCBM. Система сбора данных была интегрирована в установку mCBM, данные набирались синхронно со всеми детекторными протатипами для эксперимента CBM.

Разработка логической структуры ПЛИС выполнялась на языке VHDL в среде разработки «Vivado 2020.1». Для проверки и отладки алгоритмов логической структуры ПЛИС использовалась программная симуляция, и логический анализатор «ChipScope» встроенный в ПЛИС, отображающий реальные значения сигналов в ПЛИС во время ее работы. Для тестирования электроники и обеспечения сбора данных по протоколу GBT в ИЯИ РАН, была использована плата разработки ПЛИС KC705EK (Kintex-7 FPGA KC705

Evaluation Kit). ПЛИС платы KC705EK использовалась для прототипирования и отладки части логической структуры ПЛИС (Detector Specific Part) для платы «CRI» (Common Readout Unit) - основного элемента системы сбора данных детектора CBM. В ходе разработки использовался пакет контроля версий GIT для отслеживания изменений программного кода и хранения файлов в облачном хранилище.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты тестирования платы ADC по «оцифровке» аналоговых сигналов фотодетекторов MPPC, используемых для регистрации сцинтилляционных сигналов калориметра.
2. Интеграция модуля передатчика GBT в ПЛИС платы ADC для синхронизации тактовых сигналов, временной синхронизации и передачи данных с детектора PSD в систему сбора данных эксперимента CBM.
3. Разработанная логическая структура ПЛИС электроники PSD, которая позволяет:
 - Регистрировать события с калориметра в бестриггерном режиме при загрузке до 1 МГц.
 - Сортировать и передавать данные с переднего адронного калориметра в общую систему сбора данных эксперимента CBM по протоколу GBT.
 - Управлять электроникой системы сбора данных калориметра PSD.
4. Разработанная часть логической структуры ПЛИС «Detector Specific Part» платы «CRI» (Common Readout Interface), которая является основным элементом системы сбора данных эксперимента CBM. Данная часть логики ПЛИС позволяет:
 - Принимать и сортировать данные со всех плат ADC детектора PSD.
 - Выполнять временную синхронизацию плат ADC детектора PSD в эксперименте CBM.
 - Обеспечивать управление системой сбора данных детектора PSD по протоколу GBT.

5. Результаты тестирования разработанной системы сбора данных PSD на пучковых сеансах установки mCBM в ходе которых, данные с модуля mPSD набирались в общей системе сбора данных установки mCBM синхронно с другими детекторами.

Личный вклад.

Автор принимал непосредственное участие в решении следующих задач:

- Создание стенда на базе блока TRB (Trigger and Readout Board), позволяющий набирать данные платой ADC. Проведение тестов по «оцифровке» платой ADC аналоговых сигналов фотодетекторов модуля калориметра как от космических мюонов, так и от фрагментов ядер на пучках установки mCBM.
- Проведение исследования характеристик и особенностей функционирования платы ADC. Разработка технических требований для периферийной электроники PSD.
- Интеграция протокола GBT используемого в CBM, в плату ADC для синхронизации тактовых сигналов, временной синхронизации и передачи данных с детектора PSD. Проведение тестирования синхронизации по протоколу GBT между платой ADC и платой «CRI».
- Разработка логической структуры ПЛИС для платы ADC для обнаружения событий и измерения заряда с детектора PSD в бестриггерном режиме. Разработанная структура ПЛИС обеспечивает сортировку и передачу данных с переднего адронного калориметра в общую систему сбора данных эксперимента CBM. Разработанная структура ПЛИС отвечает всем требованиям эксперимента CBM и позволяет передачу данных по протоколу GBT при загрузке детектора до 1 МГц.
- Разработка части логической структуры ПЛИС «Detector Specific Part» платы «CRI» (Common Readout Interface), которая является основным элементом системы сбора данных эксперимента CBM. Разработанная часть логики ПЛИС обеспечивает сортировку данных детектора PSD и их передачу в систему реконструкции эксперимента CBM.

Достоверность

Разработанная система сбора данных калориметра PSD была интегрирована в прототип системы сбора данных эксперимента CBM и протестирована на пучках установки mCBM при регистрации модулем калориметра PSD продуктов реакции при взаимодействии пучков тяжелых ионов с фиксированной мишенью при скорости взаимодействия от 0.7 до 3.6 МГц. Корректность работы разработанной системы сбора данных оценивалась по наличию временной корреляции со всеми детекторами эксперимента, а также, по совпадению измеренных данных с данными полученными из симуляции.

Апробация работы.

Результаты диссертации представлены на следующих международных конференциях:

1. N.Karpushkin (oral), D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestnyy, S.Morozov. // "Study of the PSD CBM response on hadron beams" // FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 2019 // <https://indico.gsi.de/event/7684/overview>
2. D. Finogeev (poster) F Guber, N Karpushkin // The Readout system of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR // The International Conference "Instrumentation for Colliding Beam Physics"(INSTR-20), 2020 // <https://indico.inp.nsk.su/event/20/contributions/819/>
3. D. Finogeev (poster) F Guber, N Karpushkin, A Makhnev, S Morozov // mPSD readout system at mCBM experiment // 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 2020 // <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/contributions/2219/>
4. D. Finogeev (poster) // Firmware development for trigger-less mPSD readout at mCBM experiment at GSI // International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, 2020 <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295590/>

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 6 статьях в журналах рекомендованных ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Содержание работы

Во введении дается обоснование актуальности разработки системы сбора данных переднего адронного калориметра для эксперимента CBM, сформулированы задачи и цели разработки, показаны новизна работы, ее практическая значимость.

В первой главе приводится краткое описание эксперимента CBM на ускорительном комплексе FAIR и его системы сбора данных, ее архитектуры и функциональные особенности. Также приводится описание установки mCBM, которая позволяет испытывать прототипы детекторных систем и систему сбора и анализа эксперимента CBM в условиях максимально приближенных к эксплуатационным на эксперименте CBM.

Во второй главе описывается передний адронный калориметр и его конструкция, приводятся результаты изучения отклика калориметра на тестовых пучках T9 и T10 на ускорителе PS в ЦЕРНе. Также, во второй главе описывается электроника для системы сбора данных калориметра, и приводятся результаты проведенных тестов.

Центральность столкновения в эксперименте CBM предполагается определять как по измерению множественности заряженных частиц в трековых детекторах установки, так и по измерению выделенной энергии частиц (в основном частиц-спектаторов налетающего ядра), попавших в аксептанс переднего адронного калориметра PSD (Projectile Spectator Detector). Поперечная модульная грануляция калориметра необходима для пособытийного измерения плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях при исследовании азимутальных потоков заряженных частиц. Передний адронный калориметр будет установлен на расстоянии 10 м от мишени и будет состоять из 46 модулей с пучковым отверстием в центре. Схема калориметра показана на рис. 2

Каждый модуль адронного калориметра (рис. 3) имеет поперечный размер 20×20 см² и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной 16 мм с расположенными между ними пластинами из пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. Длина модуля калориметра соответствует 5.6 длинам ядерного взаимодействия. Свет с каждой из 60 сцинтилляционных пластин в модуле собирается с помощью спектросмещающего оптоволоконна Kuraray Y11, вклеенного в канавку глубиной 1.2 мм на одной из лицевых поверхностей сцинтилляционной пластины. Оптоволоконна с каждых шести последовательно распо-

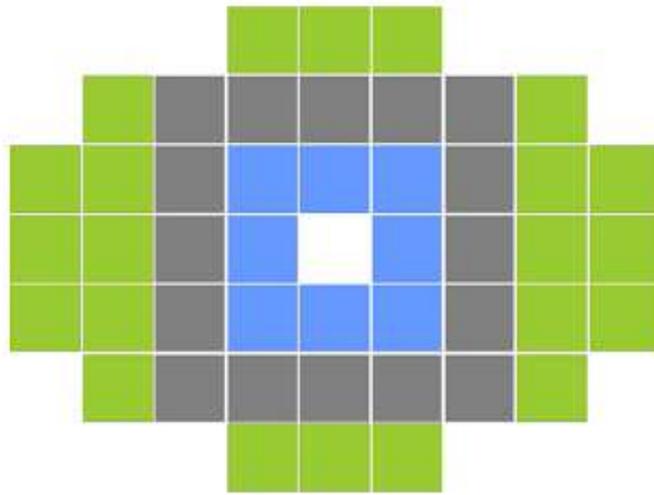


Рис. 2 — Схема калориметра PSD. PSD состоит из 46 модулей с квадратным пучковым отверстием $20 \times 20 \text{ см}^2$

ложенных сцинтилляционных пластин в модуле вклеиваются в соответствующие отдельные оптические разъемы, которые размещены на панели, установленной в торце корпуса модуля. На этой панели установлены 10 оптических разъемов для считывания света с 10 секций модуля. Для считывания света с каждой секции модуля используется кремниевый микропиксельный фотодиод НАМАМАТСУ MPPC S14160-3010P с чувствительной областью $3 \times 3 \text{ см}^2$.

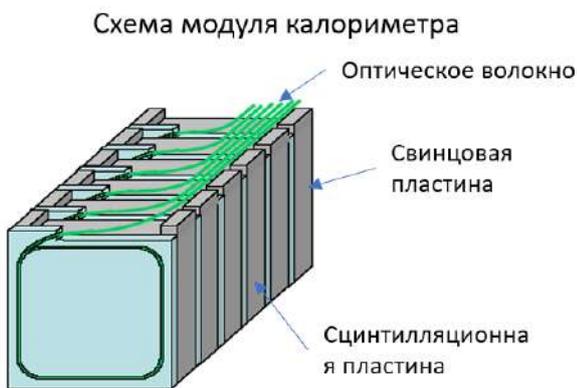


Рис. 3 — Схема конструкции модуля калориметра (слева) и его фотография при сборке (справа).

Для измерения отклика калориметра в диапазоне энергий эксперимента CBM (от 2 до 11 ГэВ) была использована сборка из 9 модулей калориметра PSD, размещенная на тестовых пучках ускорителя PS в ЦЕРНе [21]. Основная цель выполненных тестов состояла в изучении основных параметров калориметра, таких как энергетическое разрешение и линейность отклика. Автор принимал активное участие в проведении этих тестов, обработке данных и анализе результатов.

Основные результаты измерений — энергетическое разрешение и линейность отклика представлены на рис. 4.

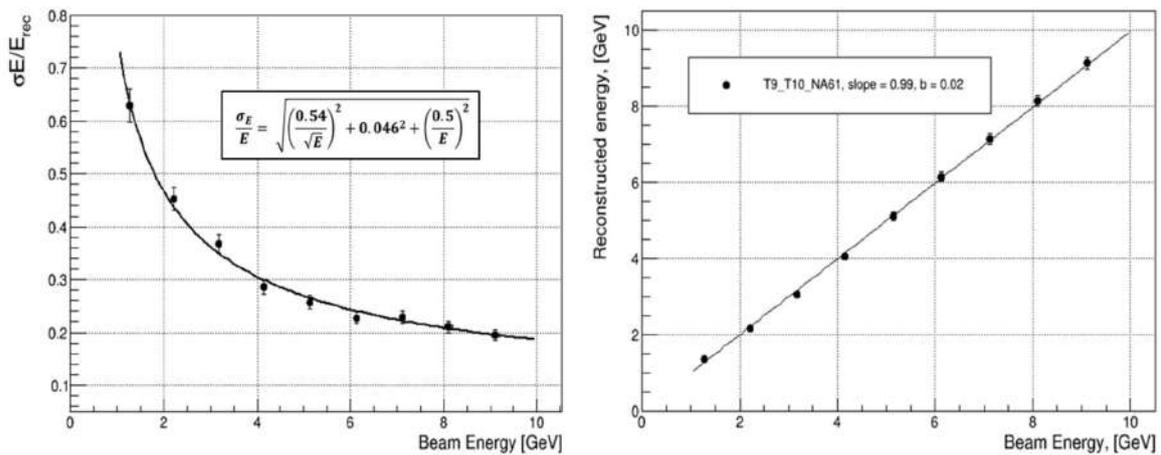


Рис. 4 — Энергетическое разрешение (слева) и линейность отклика (справа) сборки из 9 модулей PSD в диапазоне импульсов 2 – 10 ГэВ/с.

Было показано, что энергетическое разрешение сборки из 9 модулей составляет $\sigma_E/E = 54\% \sqrt{E(\text{GeV})}$, а отклонение от линейности лучше 1% [21], что полностью соответствует требованиям к переднему адронному калориметру PSD [22].

Также, в ходе тестов было изучено энергетическое разрешение модуля калориметра с фотодетекторами облученными нейтронами с эквивалентной дозой, соответствующей $2,5 \times 10^{11}$ нейтронов на квадратный сантиметр, которая ожидается при эксплуатации в течение года калориметра PSD в эксперименте CBM. На рис. 5 показано, что энергетическое разрешение модуля калориметра при регистрации сцинтилляционного света облученными фотодетекторами ухудшилось незначительно, особенно в области энергий CBM [23].

Наиболее подходящей электроникой для оцифровки сигналов с фотодетекторов калориметра PSD, является плата ADC (рис. 6), разработан-

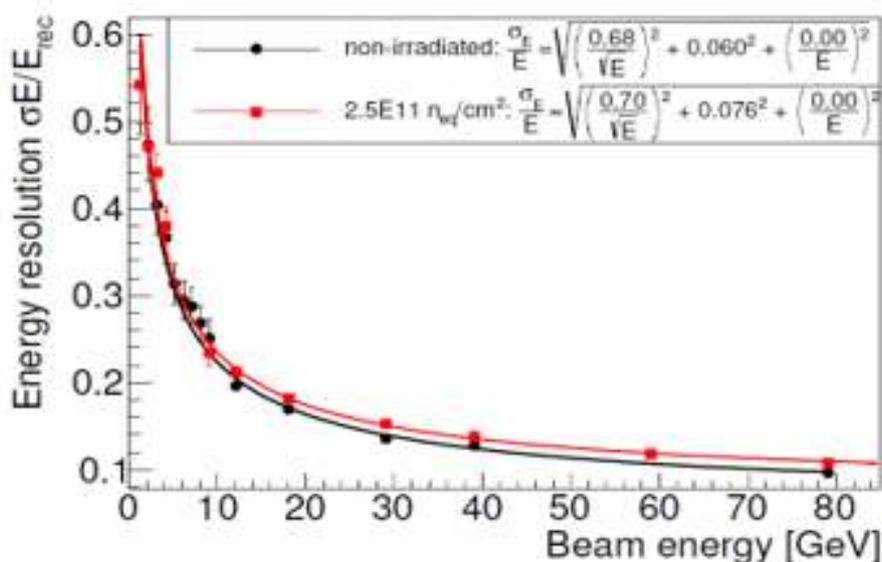


Рис. 5 — Сравнение энергетического разрешения одного модуля калориметра в диапазоне энергий до 80 ГэВ, при регистрации сцинтилляционного света облученными фотодетекторами S12572-3010 дозой, эквивалентной потоку нейтронов $2,5 \times 10^{11}$ (красный), и необлученными фотодетекторами той же модели (черный).

ная в университете Uppsala (г. Упсала, Швеция) для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA [24]. В эксперименте PANDA плата ADC используется для оцифровки аналоговых сигналов с фотодетекторов (ФЭУ Hamamatsu 11375-MOD, APDs [24]) с помощью амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП) LTM9011 с частотой дискретизации 80 МГц (с возможностью увеличения этой частоты до 125 МГц). АЦП имеют восемь каналов, с разрешением 14 бит в диапазоне 2 Vpp. На плате установлены две микросхемы ПЛИС Kintex 7, каждая из которых подключена по линии LVDS (Low-voltage differential signaling) к четырем АЦП и позволяет регистрировать и обрабатывать сигналы с 32 каналов. Каждый входной канал подключен к двум операционным усилителям с коэффициентами $\times 1$ и $\times 10$ и считывается двумя каналами АЦП для увеличения динамического диапазона. Также, входной контур имеет фильтр для подавления шума на высоких частотах. На плате используются 4 температурных датчика и медленные АЦП для контроля напряжения и тока питания. Мощность питания зависит от загрузки ПЛИС и составляет, в среднем, 22 Вт.



Рис. 6 — Фотография платы ADC разработанной для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA.

Тесты платы ADC по оцифровке аналоговых сигналов от фотодетекторов калориметра показали хорошее разделение полезного сигнала от шума на уровне 2σ для сигналов минимальной амплитудой 1 MIP (Minimum ionizing particles).

После проведенной модификации платы ADC для детектора PSD, усиление каждого канала составляет $\times 1$, ширина входного фильтра от 20 до 25 МГц для фильтрации шумов сигналов в широком диапазоне амплитуд. Применен стандартный фильтр развязки выхода усилителя конденсатором 20 пс. Разрешение амплитудно-цифрового преобразователя 14 бит достаточно для получения динамического диапазона $\times 500$ с сигналами от фотодетекторов.

По итогу проведенных тестов было принято решение использовать эту плату ADC для системы сбора данных калориметра PSD совместно со специальной «интерфейсной платой» для корректировки нулевого уровня. Плата ADC была адаптирована для детектора PSD: усиление каждого канала составляет $\times 1$, ширина полосы фильтра от 20 до 25 МГц для согласования частоты дискретизации и спектра входного сигнала. Вход АЦП развязан по постоянному току RC цепью с постоянной времени 20 мкс.

Для системы сбора данных калориметра PSD были разработаны три платы: «интерфейсная плата», плата для обеспечения питания фотодетекто-

ров и плата для управления светодиодом. «Интерфейсная плата» регулирует уровень базовой линии, выполняет индивидуальную коррекцию напряжения смещения фотодетектора для каждого канала и считывает показания термомодатчика с платы фотодетекторов. Плата для подачи общего напряжения смещения фотодетекторов обеспечивает контроль как выставленного напряжения, так и тока питания фотодетекторов, с возможностью аварийного отключения по выставленному порогу. Плата для управления светодиодом, имеет 48 каналов для всех плат МРРС детектора PSD. Управление электроникой системы сбора данных калориметра PSD выполняется по протоколу I2C. Плата ADC принимает конфигурационные данные от системы сбора данных эксперимента CBM по линии GBT и передает конфигурацию на «интерфейсную плату» по протоколу I2C. Микроконтроллер на «интерфейсной плате» принимает конфигурационные данные и передает их на плату для подачи напряжения смещения МРРС и плату управления светодиодами по протоколу I2C.

Для детектора PSD применяется прямая оцифровка сигналов амплитудой от 2.5 мВ до 1.5 В, переданных по коаксиальному кабелю длиной порядка 60 м. Прямая оцифровка малых сигналов без использования активной электроники на стороне детектора, является одной из преимуществ предложенной схемы сбора и передачи сигналов с адронного калориметра, которая позволяет реализовать максимально возможный динамический диапазон детектора.

Согласно симуляции [22], максимальный импульс от секции модуля калориметра ожидаемой на эксперименте CBM будет составлять порядка 500 МIP. Сигнал от фотодетектора при напряжении смещения 44 В и амплитуде лазерного импульса эквивалентному сцинтилляционному 500 МIP составляет 1015 мВ при передаче через кабель длиной 60 м. Поскольку динамический диапазон АЦП, установленных на плате ADC составляет 2 В, то возможно установить входное усиление на канал $\times 2$ на «интерфейсной плате» для лучшего разделения сигнал/шум и покрытия всего диапазона АЦП.

Рис. 7 демонстрирует что коаксиальный кабель длиной 60 м не затягивает сигнал фотодетектора, а ослабление составляет не более $\times 1.5$. Входной каскад платы ADC в сборке с интерфейсной платой, незначительно затягивает сигнал фотодетектора, что говорит о хорошей согласованности системы.

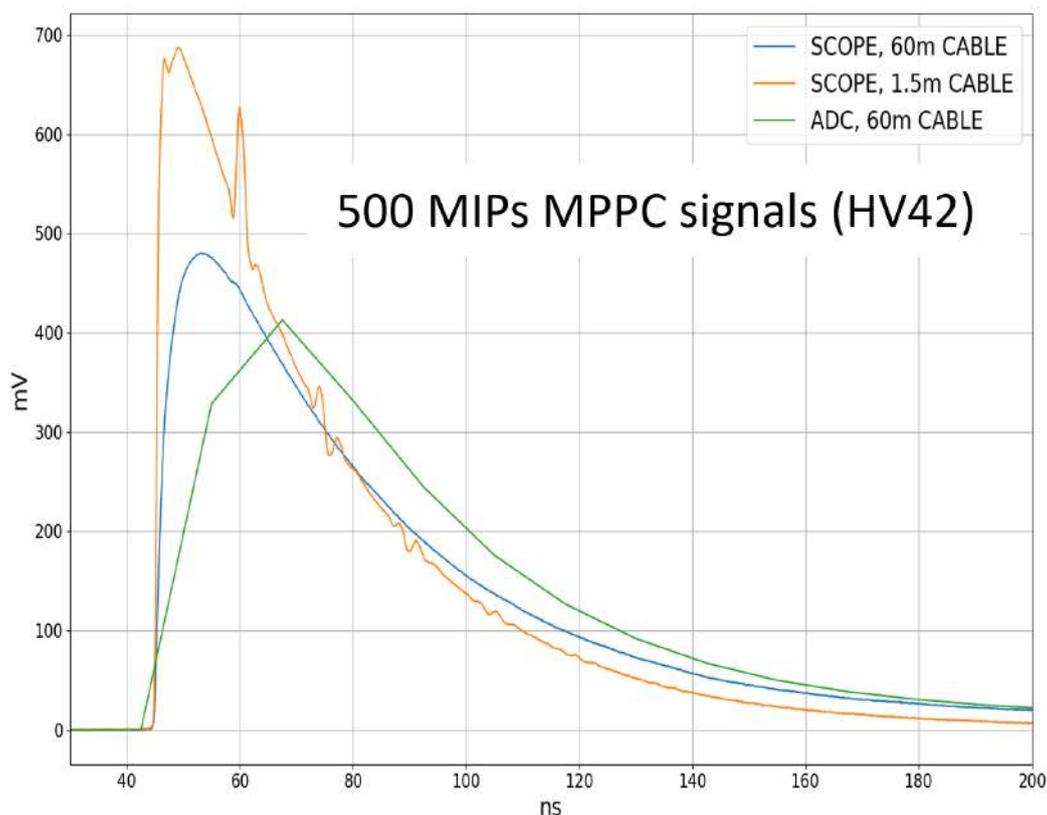


Рис. 7 — Сравнение формы сигнала фотодетектора амплитудой 500 MIP, при передаче через кабель длиной 1.5 м (оранжевый) и 60 м (синий) оцифрованным осциллографом с частотой дискретизации 10 ГГц; сигнал переданный через кабель 60 м, и оцифрованный платой ADC с частотой дискретизации 80 МГц (зеленый).

В третьей главе представлена разработка логической структуры ПЛИС платы ADC и части логической структуры ПЛИС “Detector Specific Part” платы CRI. Продемонстрированы функциональные схемы, принцип работы и функциональные возможности разработанных логических структур ПЛИС.

Для передачи оцифрованных данных платой ADC с адронного калориметра PSD в общую систему сбора данных эксперимента CBM предпочтительно использовать протокол GBT, поскольку он является стандартным решением в эксперименте CBM и не требует дополнительной модификации логической структуры ПЛИС платы CRI. GBT соединение обеспечивает передачу данных и передачу тактовых сигналов, необходимую для временной синхронизации событий детектора PSD с другими детекторами эксперимента CBM.

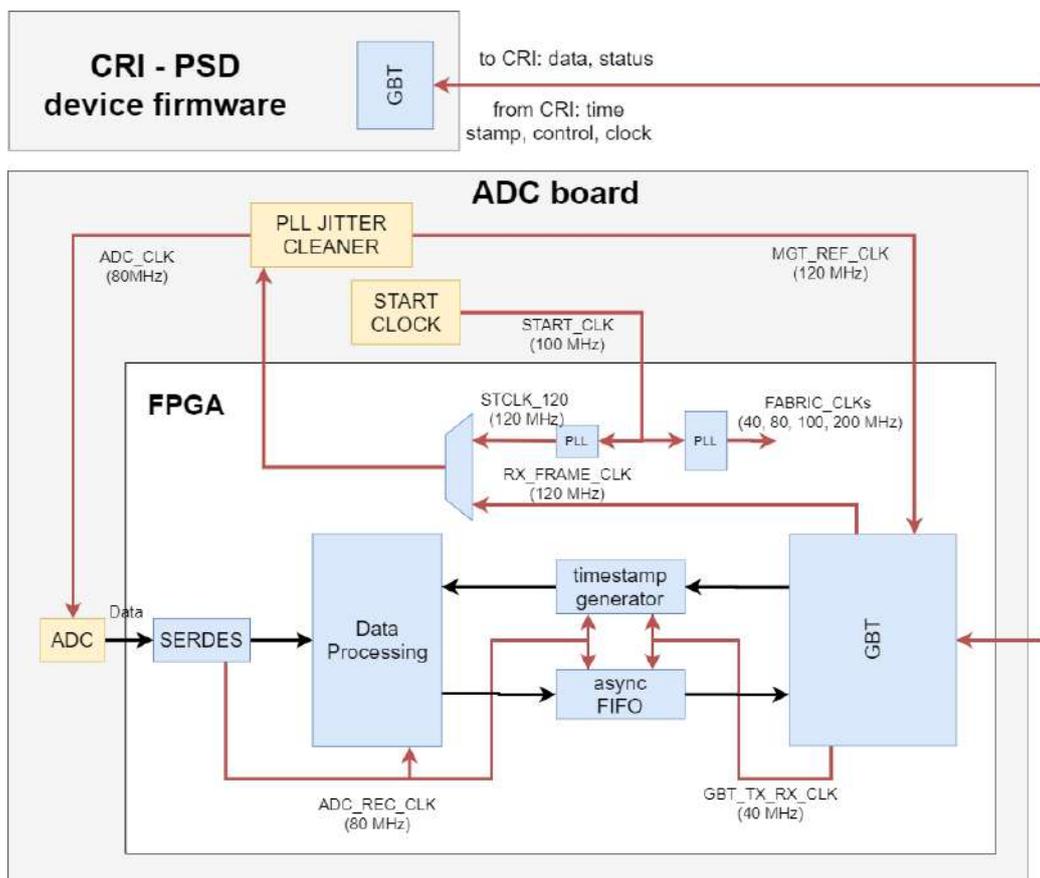


Рис. 8 — Схема тактовых сигналов логической структуры ПЛИС платы ADC.

На рис. 8 представлена схема тактовых сигналов логической структуры ПЛИС платы ADC. На плате имеется генератор тактовых сигналов «Start_clock» (FXO-LC535R-160), асинхронный к системе сбора данных СВМ. Тактовый сигнал от генератора преобразуется на двух компонентах ПЛИС – PLL в сигналы с частотами 40, 80, 100, 200 МГц для вспомогательных задач и в сигнал 120 МГц «STCKL_120», который при инициализации, подается на стабилизатор тактовых сигналов «PLL_JITTER_CLEANER» (LMK04608). Стабилизатор имеет на выходе синхронные, стабильные тактовые сигналы 80 МГц «ADC_CKL» и 120 МГц «MGT_REF_CLK». Джиттер тактовых сигналов гарантированно обеспечивает стабильную работу передатчика по оптической линии SFP+. Тактовый сигнал 80 МГц используется в АЦП, а сигнал 120 МГц подается на передатчик, и используется для него как опорный. После синхронизации передатчика по протоколу GBT, вход компонента «PLL_JITTER_CLEANER» переключается со внутреннего генератора, на тактовый сигнал от передатчика GBT «RX_FRAME_CLK», синхронный к системе сбора данных СВМ.

Такая схема переключения тактовых сигналов обеспечивает синхронность АЦП ко всем детекторным системам и позволяет измерять время события калориметра PSD относительно других детекторов. Обработка данных происходит по тактовому сигналу «ADC_REC_CLK» (80 МГц), полученному в ПЛИС при синхронизации с АЦП в компоненте SERDES (Serializer/Deserializer).

При пропускной способности протокола GBT 400 МБ/с, разработанная логическая структура ПЛИС может обеспечить передачу данных при загрузке детектора до 1.2 МГц при срабатывании всех каналов в каждом событии. Текущий формат данных был разработан для отладки системы сбора данных и является избыточным. При отправке только заряда размером 16 бит и номера канала – 4 бита для каждого хита, размер одного события составит не более 100 байт, что позволит передавать данные без потерь при загрузках детектора на уровне 4 МГц на канал.

В настоящее время ведется разработка цифрового фильтра FIR (Finite Impulse Response) для обработки цифровых сигналов от АЦП. Разработка проводится средствами языка Python, где выполнена симуляция на основе измеренных сигналов с АЦП, набранных во время пучковых сеансов платой ADC. Обработка сигнала фотодетектора с использованием FIR фильтра позволяют проводить регистрацию сигналов фотодетекторов независимо от уровня базовой линии и уменьшает долю наложения сигналов при высокой загрузке детектора.

Результаты симуляции показали хорошую эффективность регистрации сигналов, обработанных фильтром по фиксированному порогу, при которой сигналы минимальной амплитуды 1 MIP хорошо разделяются от шумовых срабатываний. Обработка сигнала фильтром FIR позволяет определять заряд по максимальной точке сигнала, обработанного фильтром FIR, и снизить количество точек необходимых для обработки одного события, что уменьшает мертвое время и увеличивает эффективность системы сбора данных. Обработка данных с АЦП фильтром FIR позволяет определить заряды наложенных сигналов, разделенных по времени до 50 нс друг от друга, что позволит снизить долю наложенных (не разделенных) сигналов до 10% при загрузке детектора 1 МГц.

В таблице 1 представлено использование ресурсов ПЛИС для разработанного проекта. Использовано 57% компонентов LUT (Look Up Table), и 72% регистров, что говорит о достаточности ресурсов ПЛИС для реализации метода обработки сигналов фильтром FIR и развития функциональности логической структуры ПЛИС платы ADC.

Site Type	Used	Fixed	Available	Util%
Slice LUTs [†]	57343	0	101400	56.55
LUT as Logic	55254	0	101400	54.49
LUT as Memory	2089	0	35000	5.97
LUT as Distributed RAM	34	0		
LUT as Shift Register	2055	0		
Slice Registers	146164	0	202800	72.07
Register as Flip Flop	146164	0	202800	72.07
Register as Latch	0	0	202800	0.00
F7 Muxes	995	0	50700	1.96
F8 Muxes	6	0	25350	0.02
Site Type	Used	Fixed	Available	Util%
DSPs	352	0	600	58.67
DSP49E1 only	352			

Таблица 1 — Использование ресурсов ПЛИС разработанной логической структурой платы ADC для системы сбора данных детектора PSD.

Как уже было отмечено ранее, сигналы оцифрованные платой ADC, должны передаваться по протоколу GBT в систему сбора данных эксперимента CBM на плату CRI. Для интеграции платы ADC в систему сбора данных эксперимента CBM необходимо было разработать часть логической структуры ПЛИС платы CRI («Detector Specific Part»). Плата CRI должна сортировать данные принятые от платы ADC, и формировать пакеты для отправки в систему анализа данных. Также, плата CRI должна осуществлять контроль платы ADC по протоколу GBT. Плата CRI предназначена для синхронного сбора данных со всех детекторных систем эксперимента CBM и их передачу в вычислительный кластер для отбора и обработки данных. Поскольку данные каждого детектора эксперимента CBM должны обрабатываться индивидуальным алгоритмом, в логической структуре ПЛИС платы CRI предусмотрен модуль DSP (Detector Specific Part), который является различным для каждого детектора. Для временной синхронизации, сортировки данных и управления системой сбора данных калориметра PSD была разработана часть ло-

гической структуры ПЛИС DSP-PSD для платы CRI. DSP-PSD включает вычислительную логику для обработки принятых пакетов от платы ADC и обмена управляющими пакетами с платой ADC. Проект логической структуры ПЛИС является индивидуальным для каждой детекторной системы, поскольку содержит различные модули DSP, все остальные модули являются одинаковыми для всех детекторных систем.

Для калориметра PSD используется одна плата CRI принимающая данные от 8 плат ADC по 16 GBT линиям передачи. Функциональная схема модуля DSP-PSD представлена на рис. 9. В модуле используется два тактовых сигнала «gbt_clk», 40 МГц и «flim_clk» 160 МГц, синхронных между собой, передатчику GBT и модулю интерфейса PCIe – FLIM. По передатчику GBT от платы ADC передаются данные детектора и пакеты статуса системы сбора данных.

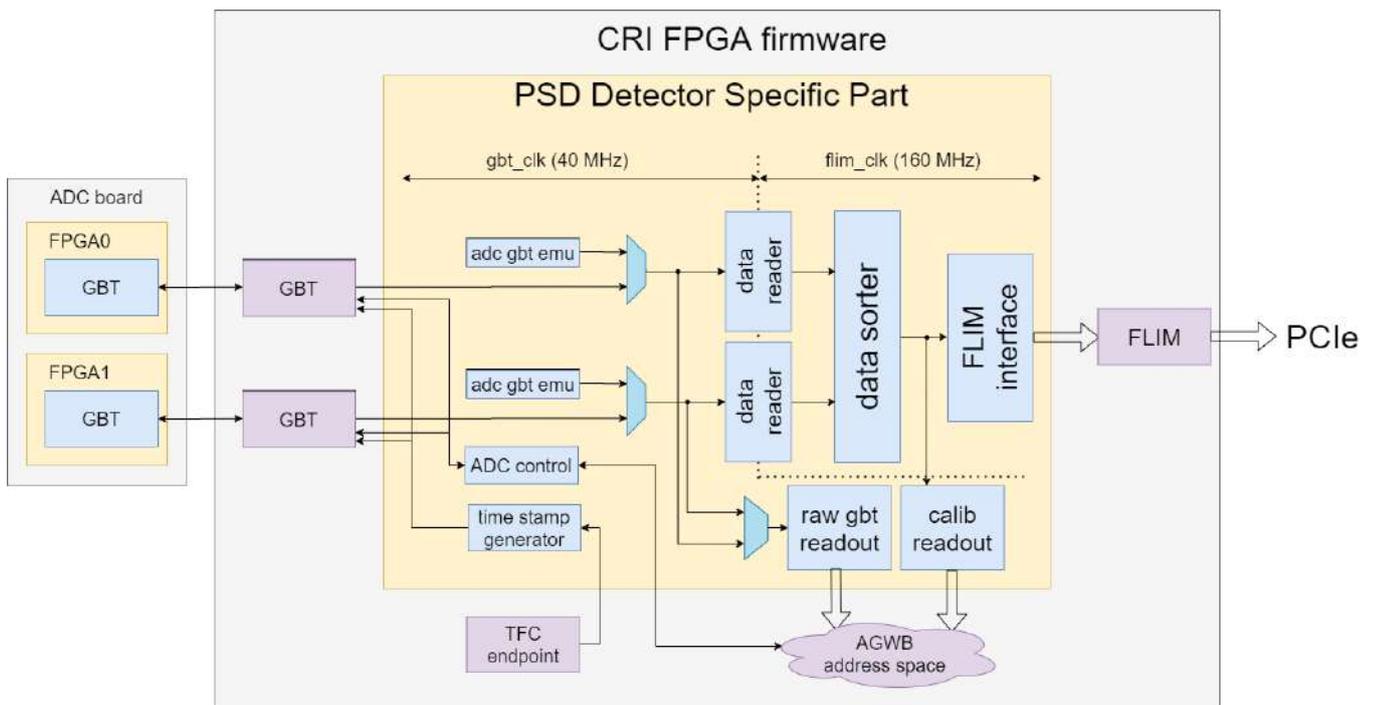


Рис. 9 — Функциональная схема части логической структуры ПЛИС «Detector Specific Part» платы CRI.

На плату ADC передаются временные метки для синхронизации событий и управляющие пакеты. Временные метки формируются в модуле «time stamp generator» по команде от системы синхронизации платы CRI «TFC endpoint». Для каждой линии GBT расположен компонент «data reader», который принимает данные, переданные платой ADC по GBT. Данные, принятые от каждой платы ADC по двум GBT линиям комбинируются между собой и

сортируются по временным меткам в компоненте «data sorter» для отправки в компонент «FLIM interface» для дальнейшей передачи в вычислительный кластер. Компонент «FLIM interface» читает отсортированные данные и формирует пакеты для передачи в модуль «FLIM» интерфейса PCIe. Управление платой CRI выполняется по медленной шине интерфейса PCIe. Управление платой ADC и периферийной электроники (по протоколу I2C от платы ADC) выполняется обменом управляющих пакетов по протоколу GBT.

В четвертой главе приводится описание созданного в ИЯИ РАН стенда для разработки логической структуры ПЛИС платы ADC и прототипирования части логической структура ПЛИС “Detector Specific Part” платы CRI для PSD. Приводятся результаты тестирования разработанной системы сбора данных на прототипе детектора PSD - mPSD на пучках установки mCBM в институте GSI.

Для сбора данных с модуля калориметра PSD платой ADC и разработки логической структуры ПЛИС этой платы в ИЯИ РАН был собран стенд на основе платы «FTM board». Плата «FTM board» позволяет подключить плату ADC по протоколу GBT и обеспечить передачу данных на персональный компьютер. На рис. 10 показана фотография платы ADC, подключенной к «FTM board» (слева) и фотография стенда по сбору данных с модулей калориметра PSD (справа). Плата «FTM board» была разработана в 2017г. в ОЭФ ИЯИ для отладки системы сбора данных детектора FIT (Fast Interaction Trigger) на эксперименте ALICE (A Large Ion Collider Experiment) на ускорителе LHC (Large Ion Collider). Плата «FTM board» представляет собой аддон FTM для «платы разработки» с ПЛИС KC705EK (Kintex-7 FPGA KC705 Evaluation Kit) [25].

Собранный стенд позволяет разработку и тестирование системы сбора данных калориметра PSD в институте ИЯИ РАН.

Для испытания разработанной системы сбора данных калориметра PSD в условиях максимально приближенным к условиям в эксперименте CBM, были проведены тесты по сбору данных с модуля калориметра на пучковых сеансах на установке mCBM. Фотография mPSD установленного в пучковой зоне mCBM показана на рис. 11.

Система сбора данных модуля mPSD содержит все ключевые элементы полномасштабной системы сбора данных калориметра PSD: плату с



Рис. 10 — Испытательный стенд для разработки системы сбора данных калориметра PSD. Слева: плата ADC подключенная к плате «FTM board»; справа: фотография стенда по сбору данных с модулей калориметра PSD.



Рис. 11 — Фотография модуля mPSD на установке mCBM в «положении обслуживания» (слева) и направленным на мишень в «пучковом положении» (справа).

MPPC; плату ADC; «интерфейсную плату»; коаксиальные кабели DRAKA CB50 длиной 60 м (рис. 12). Плата ADC подключена к плате CRI по оптической линии по протоколу GBT. Логическая структура ПЛИС платы CRI содержит часть «Detector Specific Part» для детектора PSD для обработки данных и управления системой сбора данных модуля mPSD.

Тестирование системы сбора данных было выполнено во время пучковых сеансов на пучках ядер Au, O, Ni при энергиях до 2 ГэВ на нуклон и в диапазоне интенсивностей от 0.7 до 3.6 МГц. На рис. 13, слева показана временная корреляция событий между детекторами mPSD и mTOF. Узкий

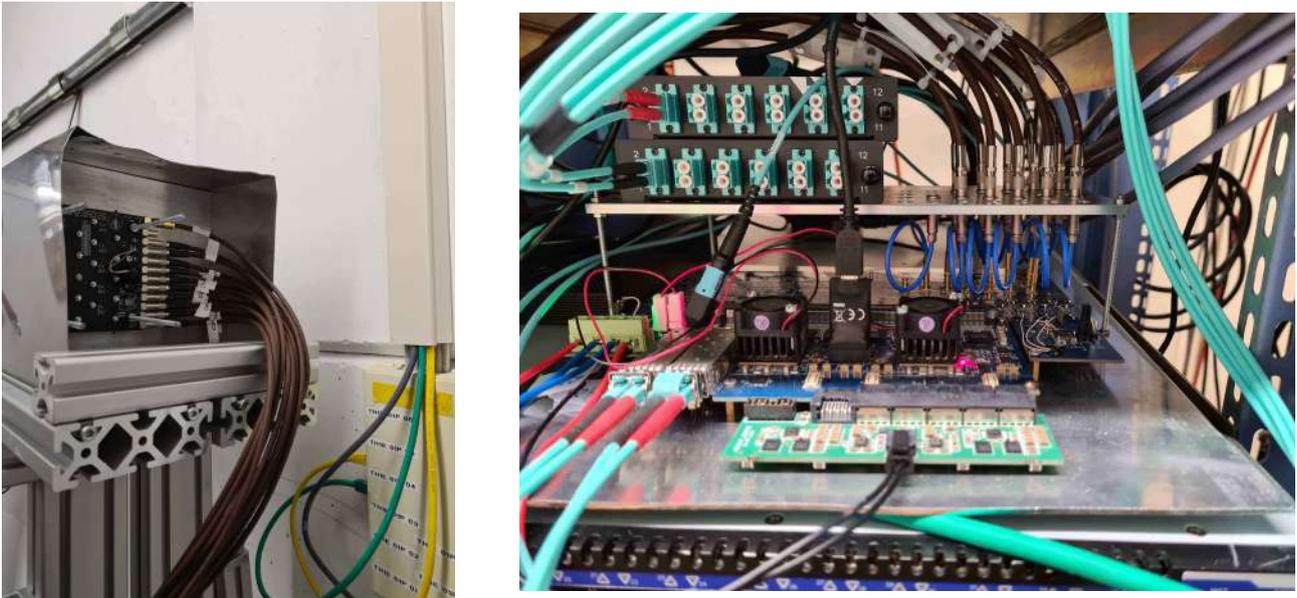


Рис. 12 — Слева: Плата MPPC установленная на модуль mPSD и подключенная коаксиальными кабелями длиной 60м к плате ADC, расположенной в серверной комнате. Справа: фотография платы ADC расположенной в серверной комнате.

пик шириной 50 нс демонстрирует синхронное измерения времени событий детектора mPSD относительно всех детекторных систем установки mCBM.

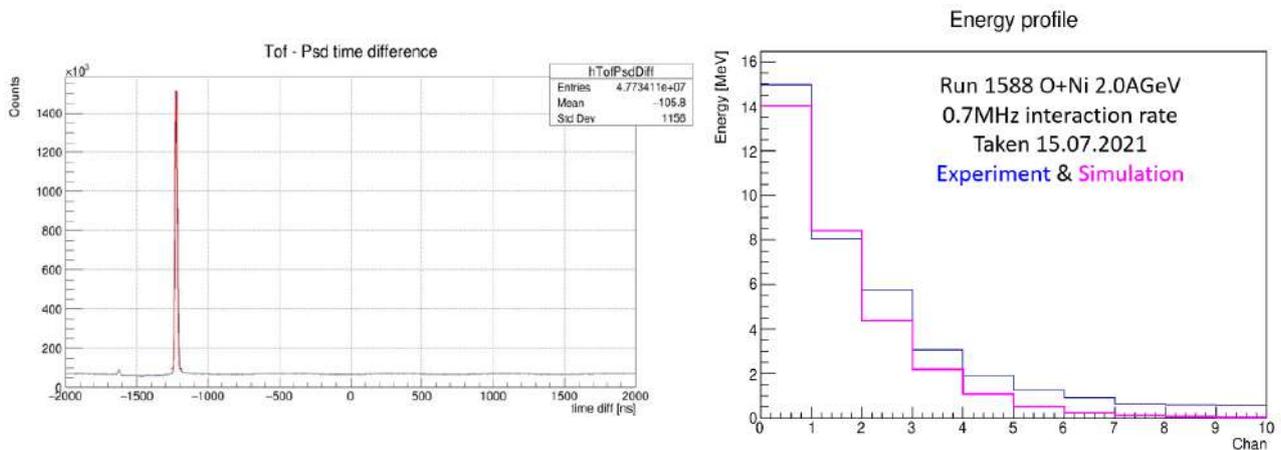


Рис. 13 — Слева: временная корреляция событий между детекторами mPSD и mTOF; справа: энергетический профиль модуля mPSD, измеренные данные (синий) и симуляция (маджента).

На рис. 13 справа, показан энергетический профиль модуля mPSD, на рис. 14 показаны амплитудные спектры для каждой секции модуля mPSD. Согласование измеренных данных, с данными полученными в результате симуляции, демонстрирует корректную регистрацию событий и определение заряда от сигналов фотодетекторов системой сбора данных детектора PSD.

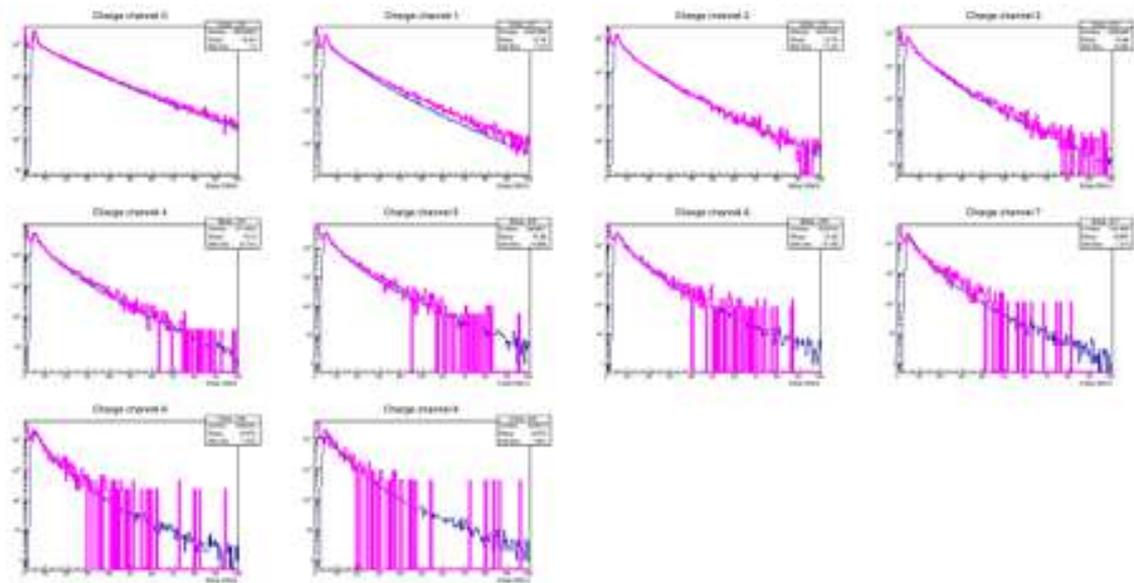


Рис. 14 — Амплитудные спектры для каждой секции mPSD. При соударении $O+Ni$ (2 АГэВ). Измеренные данные (синий) и симуляция (маджента).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Была испытана плата ADC, разработанная в университете Uppsala (г. Уппсала, Швеция) для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA, с целью изучения возможности ее использования для оцифровки и считывания сигналов с адронного калориметра установки CBM. Были проведены тесты по регистрации платой ADC сигналов от фотодетекторов, как от космических частиц, так и от фрагментов ядер на тестовых пучках mCBM в GSI (Германия). Было показано разделение шумового пьедестала от минимального сигнала 1 MIP на уровне 2σ , и возможность оцифровки сигналов на частоте дискретизации 80 МГц. Также, было показано, что оцифровка каждого канала с двумя усилителями для увеличения динамического диапазона в стандартной модификации платы ADC является излишней для детектора PSD. На основе полученных результатов, было принято решение изменить модификацию входного контура платы ADC и использовать только один канал усиления для оцифровки сигналов фотодетекторов PSD и не использовать входной фильтр. После проведенной модификации платы ADC, усиление каждого канала составляет $\times 1$, ширина входного фильтра от 20 до 25 МГц, для согласования частоты дискретизации и спектра

входного сигнала. Применен стандартный фильтр развязки выхода усилителя конденсатором 20пф. Разрешение амплитудно-цифрового преобразователя 14 бит достаточно для получения динамического диапазона $\times 500$ с сигналами от фотодетекторов. В результате данного теста было разработано техническое задание для разработки и изготовления плат с фотодетекторами и «интерфейсной платы». Плата с фотодетекторами должна содержать дополнительно светодиод для калибровки фотодетекторов и температурный датчик для компенсации температурного дрейфа усиления фотодетекторов. «Интерфейсная плата» должна регулировать уровень базовой линии сигналов фотодетекторов и осуществлять индивидуальную подстройку напряжения смещения фотодетектора. По результатам теста данной платы по регистрации аналоговых сигналов с фотодетекторов калориметра PSD, было принято решение использовать эту плату ADC для системы сбора данных калориметра PSD.

2. Передатчик GBT был интегрирован в плату ADC для синхронизации тактовых сигналов, временной синхронизации и передачи данных с детектора PSD в систему сбора данных эксперимента CBM. Для этого была разработана система переключения тактовых сигналов с внутреннего генератора платы ADC на принимаемый тактовый сигнал по GBT. Система переключения тактовых сигналов позволяет обеспечить синхронность тактов АЦП платы ADC к системе сбора данных эксперимента CBM, и измерение времени событий в детекторе PSD относительно других детекторных систем эксперимента. Была проведена оптимизация скорости перестройки PLL для устойчивой работы передатчика GBT во время переключения тактовых сигналов. Синхронизация тактовых сигналов и передача данных по протоколу GBT между платами ADC и системой сбора данных CBM была испытана во время пучковых сеансов и показала стабильную непрерывную работу в течение более 300 часов.
3. Разработана логическая структура ПЛИС для платы ADC для оцифровки сигналов фотодетекторов и обработки данных с детектора PSD. Логическая структура ПЛИС позволяет регистрировать оцифрованные сигналы от фотодетекторов по превышению сигнала

лом порога, измерять время сигнала синхронно ко всем детекторам эксперимента СВМ, измерять заряд зарегистрированного сигнала, отправлять форму сигнала и его заряд в систему сбора данных эксперимента СВМ. Набор данных выполняется без общего триггера с максимальной загрузкой детектора 1 МГц на канал. Также, разработанная логическая структура ПЛИС обеспечивает управление периферийной электроникой системы сбора данных детектора PSD по протоколу I2C.

4. Разработана часть логической структуры ПЛИС “Detector Specific Part” (DSP) платы “CRI” (Common Readout Interface), которая является основным элементом системы сбора данных эксперимента СВМ. Модуль DSP обеспечивает временную синхронизацию плат ADC детектора PSD в эксперименте СВМ по протоколу GBT. Временная синхронизация обеспечивается синхронной передачей временных меток, относительно которых выполняется измерение времени события во всех детекторных системах эксперимента СВМ. Модуль DSP обеспечивает сортировку данных детектора PSD и осуществляет управление системой сбора данных детектора PSD по протоколу GBT.
5. Для тестирования электроники системы сбора данных калориметра PSD и разработки логической структуры ПЛИС платы ADC, в ИЯИ РАН был создан стенд на базе платы «FTM board». Данный стенд позволяет собирать данные платой ADC по протоколу GBT на персональный компьютер и управлять электроникой системы сбора данных. Прототип детектора PSD – mPSD был установлен на mСВМ и интегрирован в общую систему сбора данных установки mСВМ для проведения тестов на пучках при скоростях набора данных близким к ожидаемым на СВМ. Показана временная корреляция между детекторными системами mPSD и другими детекторными системами mСВМ. Измеренные амплитудные спектры при регистрации фрагментов ядер и энергетический профиль модуля согласуются с данными, полученными в результате симуляции. Полученные экспериментальные результаты показывают коррект-

ную работу системы сбора данных калориметра PSD в условиях максимально приближенных к эксплуатационным.

Разработанная система сбора данных была испытана на установке mCBM на прототипе детектора PSD – mPSD. В дальнейшем, при запуске ускорительного комплекса FAIR, разработанную систему сбора данных для детектора PSD необходимо будет установить и отладить на установке CBM.

Разработанная система сбора данных имеет широкий спектр применения и перспективы дальнейшей разработки. Регистрация сигналов с фотодетекторов по коаксиальным кабелям длиной 60 м с динамическим диапазоном $\times 1000$ и временным разрешением 50 нс делает возможным ее применение в разрабатываемых, в данный момент, детекторах - нейтронный детектор в эксперименте BM@N и апгрейд PHOS для работы в эксперименте ALICE во время «Run 4».

Разработанная логическая структура ПЛИС для платы ADC имеет большой потенциал для дальнейшей разработки. В настоящий момент проводятся работы по увеличению частоты тактирования АЦП с 80 до 120 МГц, что позволит увеличить временное и зарядовое разрешение детектора. Возможна реализация дополнительной сортировки и обработки данных «налету» в ПЛИС платы ADC. Также, возможна реализация протокола IPbus в ПЛИС платы ADC, что обеспечит передачу данных по протоколу UDP при подключении платы ADC напрямую к персональному компьютеру. Возможность адаптации логической структуры ПЛИС платы ADC к различным протоколам передачи данных и схемам временной синхронизации расширяет применимость разработанной системы сбора данных в различных экспериментах.

Публикации автора по теме диссертации

1. The Projectile Spectator Detector for measuring the geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment on FAIR / CBM Collaboration, N. Karpushkin, D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, V. Ladygin, S. Morozov, A. Kugler, V. Mikhaylov, A. Senger // Nucl. Instrum. Meth. A / под ред. G. Batignani, M. Grassi, R. Paoletti, A. Retico, G. Signorelli, P. Spagnolo. — 2019. — Т. 936. — С. 156—157. — DOI: [10.1016/j.nima.2018.10.054](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.054).

2. The PSD CBM Supermodule Response Study for Hadrons in Momentum Range 2 – 6 GeV/c at CERN Test Beams / D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov, A. Reshetin // KnE Energ. Phys. — 2018. — Т. 3. — С. 333–339. — DOI: [10.18502/ken.v3i1.1763](https://doi.org/10.18502/ken.v3i1.1763).
3. Transverse and longitudinal segmented forward hadron calorimeters with SiPMs light readout for future fixed target heavy ion experiments / NA61/SHINE and CBM and BM@N Collaborations, F. Guber, D. Finogeev, M. Golubeva, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov, A. Kugler, V. Mikhaylov, A. Senger // Nucl. Instrum. Meth. A / под ред. М. Krammer, Т. Bergauer, М. Dragicevic, М. Friedl, М. Jeitler, J. Schieck, С. Schwanda. — 2020. — Т. 958. — С. 162728. — DOI: [10.1016/j.nima.2019.162728](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162728).
4. Study of the hadron calorimeters response for CBM and BM@N experiments at hadron beams / N. Karpushkin, D. Finogeev, N. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, S. Morozov // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. М. Destefanis, Т. Galatyuk, А. Bauswein, С. Ratti, L. Tolos. — 2020. — Т. 1667, № 1. — С. 012020. — DOI: [10.1088/1742-6596/1667/1/012020](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1667/1/012020).
5. Development of readout chain for CBM Projectile Spectator Detector at FAIR / D. Finogeev, F. Guber, N. Karpushkin, A. Makhnev, S. Morozov, D. Serebryakov // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. P. Teterin. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012059. — DOI: [10.1088/1742-6596/1690/1/012059](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012059).
6. The readout system of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR / CBM Collaboration, D. Finogeev, F. Guber, N. Karpushkin, A. Makhnev, S. Morozov, D. Serebryakov // JINST. — 2020. — Т. 15, № 09. — С. C09015. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/09/C09015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09015).

Список литературы

1. *Schmah A.* Highlights of the Beam Energy Scan from STAR // Central Eur. J. Phys. — 2012. — Т. 10. — С. 1238–1241. — DOI: [10.2478/s11534-012-0149-1](https://doi.org/10.2478/s11534-012-0149-1). — arXiv: [1202.2389](https://arxiv.org/abs/1202.2389) [nucl-ex].

2. The chiral and deconfinement aspects of the QCD transition / A. Bazavov [и др.] // Phys. Rev. D. — 2012. — Т. 85. — С. 054503. — DOI: [10.1103/PhysRevD.85.054503](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.054503). — arXiv: [1111.1710 \[hep-lat\]](https://arxiv.org/abs/1111.1710).
3. Is there still any T_c mystery in lattice QCD? Results with physical masses in the continuum limit III / S. Borsanyi, Z. Fodor, C. Hoelbling, S. D. Katz, S. Krieg, C. Ratti, K. K. Szabo // JHEP. — 2010. — Т. 09. — С. 073. — DOI: [10.1007/JHEP09\(2010\)073](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2010)073). — arXiv: [1005.3508 \[hep-lat\]](https://arxiv.org/abs/1005.3508).
4. *Fukushima K., Hatsuda T.* The phase diagram of dense QCD // Rept. Prog. Phys. — 2011. — Т. 74. — С. 014001. — DOI: [10.1088/0034-4885/74/1/014001](https://doi.org/10.1088/0034-4885/74/1/014001). — arXiv: [1005.4814 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1005.4814).
5. *Ehehalt W., Cassing W.* Relativistic transport approach for nucleus nucleus collisions from SIS to SPS energies // Nucl. Phys. A. — 1996. — Т. 602. — С. 449—486. — DOI: [10.1016/0375-9474\(96\)00097-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(96)00097-8).
6. Evaluation of QCD sum rules for HADES / S. Zschocke, B. Kampfer, O. P. Pavlenko, G. Wolf // 40th International Winter Meeting on Nuclear Physics. — 02.2002. — arXiv: [nuc1-th/0202066](https://arxiv.org/abs/nuc1-th/0202066).
7. *Zhao J., Zhuang P.* Cold and hot nuclear matter effects on J/ψ production at RHIC-BES energies. — 2022. — Февр. — arXiv: [2202.11335 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2202.11335).
8. *Huang Y.* Strange Hadron Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 54.4$ GeV // EPJ Web Conf. — 2022. — Т. 259. — С. 03002. — DOI: [10.1051/epjconf/202225903002](https://doi.org/10.1051/epjconf/202225903002).
9. *Galoyan A., Ribon A., Uzhinsky V.* Towards model descriptions of the latest data by the NA61/SHINE collaboration on $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ and $^7\text{Be} + ^9\text{Be}$ interactions // Eur. Phys. J. C. — 2022. — Т. 82, № 2. — С. 181. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-022-10116-3](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10116-3).
10. The production of ϕ mesons at SPS, RHIC and LHC energies / U. Tabassam, M. Ali, I. Siddique, Z. U. Abidin, Y. Ali // Eur. Phys. J. Plus. — 2022. — Т. 137, № 2. — С. 255. — DOI: [10.1140/epjp/s13360-022-02489-x](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02489-x).
11. Topical issue on Exploring Strongly Interacting Matter at High Densities - NICA White Paper / V. F. David Blaschke Elena Bratkovskaya [и др.] // The European Physical Journal A volume. — 2016. — DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16267-x>. — URL: <https://rdcu.be/cIASX>.

12. The MINOS near detector front end electronics / T. Cundiff [и др.] // 2004 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. — 2004. — С. 65–72. — DOI: [10.1109/NSSMIC.2004.1462070](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2004.1462070).
13. SODA: Time distribution system for the PANDA experiment / I. Konorov, H. Angerer, A. Mann, S. Paul //. — 2009. — DOI: [10.1109/NSSMIC.2009.5402172](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2009.5402172).
14. *Cuveland J. de, Lindenstruth V.* A first-level event selector for the CBM experiment at FAIR // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. S. C. Lin. — 2011. — Т. 331. — С. 022006. — DOI: [10.1088/1742-6596/331/2/022006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/331/2/022006).
15. *Franzoso E.* The upgrade and performance of the LHCb RICH detector // Nuovo Cim. C. — 2021. — Т. 44, № 2/3. — С. 46. — DOI: [10.1393/ncc/i2021-21046-1](https://doi.org/10.1393/ncc/i2021-21046-1).
16. *Collaboration T. A.* Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Read-out & Trigger System 2014. — 2013. — URL: <http://cds.cern.ch/record/1603472/files/ALICE-TDR-015.pdf>.
17. A new scheduling algorithm for the LHCb upgrade trigger application / E. Govorkova, C. Hasse, R. Matev, N. Nolte, S. Ponce, G. Raven, S. Stahl // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Т. 1525, № 1. — С. 012052. — DOI: [10.1088/1742-6596/1525/1/012052](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1525/1/012052).
18. ALICE Central Trigger System for LHC Run 3 / J. Kvapil [и др.] // EPJ Web Conf. — 2021. — Т. 251. — С. 04022. — DOI: [10.1051/epjconf/202125104022](https://doi.org/10.1051/epjconf/202125104022). — arXiv: [2106.08353](https://arxiv.org/abs/2106.08353) [physics.ins-det].
19. The eCDR-PLL, a radiation-tolerant ASIC for clock and data recovery and deterministic phase clock synthesis / P. Leitao, R. Francisco, X. Llopart, F. Tavernier, S. Baron, S. Bonacini, P. Moreira // JINST. — 2015. — Т. 10, № 03. — С. C03024. — DOI: [10.1088/1748-0221/10/03/C03024](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/C03024).
20. CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter / D. Mans Anderson [и др.]. — 2012. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1481837?ln=ru>.
21. The very forward hadron calorimeter PSD for the future CBM@FAIR experiment / V. Mikhaylov [и др.] // EPJ Web Conf. / под ред. S.

- Bondarenko, V. Burov, A. Malakhov. — 2019. — Т. 204. — С. 11004. — DOI: [10.1051/epjconf/201920411004](https://doi.org/10.1051/epjconf/201920411004).
22. Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD) / I. S. F. Guber [и др.]. — 2014. — URL: https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Public/PublicPSD/20140624_CBMTDR_PSD_version2.pdf.
 23. *Mikhaylov V.* Radiation hardness and performance of the hadron calorimeter designed for Projectile Spectator Detector in the framework of international collaboration CBM@FAIR. — 2021. — URL: <https://indico.gsi.de/event/13241/contributions/56313/>.
 24. *Collaboration P.* Technical Design Report for: PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC). — URL: http://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2018/08/MPD_DAQ_TDR-2018-8.pdf.
 25. USER GUIDE: KC705 Evaluation Board for the Kintex-7 FPGA / Xilinx. — 2016. — URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/kc705/ug810_KC705_Eval_Bd.pdf.