

Карпушкин Николай Михайлович

**Методы анализа данных
передних адронных калориметров
ядро-ядерных экспериментов
с фиксированной мишенью**

1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

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:

Мочалов Василий Вадимович, 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 поляризационных экспериментов, ведущий научный сотрудник.

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. Скобельцына, лаборатория космической рентгеновской и гамма-астрономии, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"».

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Изучение свойств ядерной материи в экстремальных условиях высоких плотностей и температур является актуальным направлением исследований современной ядерной физики, о чем свидетельствует большое число экспериментальных программ, направленных на ее изучение. Столкновения ядер при ультрарелятивистских энергиях изучаются на Большом адронном коллайдере (LHC) в экспериментах ATLAS [1], CMS [2], ALICE [3] и на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) в экспериментах PHENIX [4] и STAR [5]. Данные эксперименты позволяют создать в лаборатории экстремальные условия существования ядерной материи, характеризующиеся высокой температурой и околонулевым значением барионного химического потенциала. Согласно современным представлениям, подобная форма материи существовала в ранней Вселенной до образования адронов.

В дополнение к этим экспериментам при высоких энергиях существует также второй класс экспериментов, изучающих сильновзаимодействующую ядерную материю при более низких энергиях столкновения. К ним относятся эксперименты на коллайдере RHIC, проведенные на установке STAR в рамках программы сканирования по энергии пучка [6] и в рамках эксперимента с фиксированной мишенью [7], а также эксперимент NA61/SHINE в CERN-SPS [8], эксперимент BM@N [9] в ОИЯИ-Нуклотрон, эксперимент HADES в GSI-SIS18 [10] и строящиеся в настоящий момент эксперименты MPD в ОИЯИ-NICA [11] и CBM [12] на GSI-FAIR-SIS100, а также проект J-PARC-HI [13]. При этих энергиях в результате ядерных столкновений образуется среда с умеренной температурой, но высокой плотностью барионов, которая может превышать номинальную ядерную плотность в 5-9 раз [14; 15]. Считается, что подобные формы материи могут образовываться при взрывах сверхновых и существовать в таких экстремальных астрофизических средах, как ядра нейтронных звезд [16]. В этой области температур и барионных плотностей фазовая диаграмма ядерной материи имеет более сложную структуру, с фазовым переходом первого рода из состояния адронного газа в состояние КГП. Таким образом, поскольку в пределе малых барионных плотностей предсказывается непрерывный характер фазового перехода (кроссовер), а при больших барионных плотностях – фазовый переход первого рода, должна существовать критическая точка, разграничивающая их, в которой тип фазового перехода будет второго рода. Выделяют также киральный фазовый переход, при этом, возможное несоответствие кирального перехода и деконфайнмента в пределе больших барионных плотностей приводит к образованию области материи, получившей название кваркония. Экспериментальное открытие этих особенностей фазовой диаграммы ядерной материи стало бы крупным прорывом в нашем понимании ее свойств.

Определение глобальных геометрических характеристик каждого ядронного столкновения, а именно центральности и плоскости реакции, является

важнейшей задачей как в действующих экспериментах по изучению свойств сильновзаимодействующей ядерной материи, так и в готовящихся экспериментах. Связано это с тем, что свойства ядерной материи, образующейся в таких столкновениях, экспериментально изучаются путем измерения выходов идентифицированных частиц, их энергетических спектров, распределений по множественности и поперечному импульсу, коллективных азимутальных потоков и т.д. в зависимости от центральности столкновения, которая определяет плотность энергии в зоне столкновения ядер. При этом, плоскость реакции, которая определяется направлением импульса налетающего ядра и вектором, соединяющим центры сталкивающихся ядер, используется в качестве системы отсчета для изучения, к примеру, азимутальных потоков образующихся идентифицированных частиц. В таких экспериментах с фиксированными мишенями как BM@N, NA61/SHINE и CBM@FAIR для определения геометрии столкновений предназначены передние адронные калориметры, разработанные и созданные в ИЯИ РАН.

Эта диссертация посвящена разработке новых методов анализа данных передних адронных калориметров. А именно: цифровой обработке сырых сигналов, разработке программных пакетов хранения данных и отслеживания качества данных в экспериментальных сеансах, калибровке отклика детектора и методам определения центральности. Принимая во внимание бурное развитие современных экспериментов по изучению свойств горячей и плотной ядерной материи и важность определения в них геометрических характеристик столкновений ядер, тема диссертационной работы представляет важную и актуальную задачу.

Целью представленной работы является разработка методов анализа данных передних адронных калориметров ядро-ядерных экспериментов с фиксированной мишенью BM@N, NA61/SHINE и CBM@FAIR. Разработанные методы призваны улучшить соотношение сигнал/шум в детекторе, обеспечить надежный механизм калибровки детекторов и подготовить программный инструмент для определения центральности столкновений.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

1. Разработан метод цифровой обработки сигналов (ЦОС), основанный на методе наименьших квадратов Прони, позволяющий сопоставить набору эквидистантных зашумленных экспериментальных значений амплитуды сигнала модель, состоящую из композиции экспоненциальных функций. Разработан критерий оценки качества ЦОС, позволяющий надежно отсеивать электронные шумы и наводки электроники.
2. Создано программное обеспечение (ПО) для чтения-записи данных передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM. Разработанное ПО обеспечивает чтение сырых бинарных файлов, их конвертацию и хранение в формате данных эксперимента, а также отвечает за организацию к ним доступа для последующего анализа.

3. Разработан метод выравнивания откликов секций передних адронных калориметров с использованием реконструкции треков космических мюонов в материале детектора. Метод использует наличие продольной и поперечной сегментации детекторов и особенно актуален для передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ ввиду отсутствия вторичных мюонных пучков на ускорительных комплексах, где эти установки расположены.
4. Для эксперимента CBM разработан метод ЦОС на основе полосового фильтра, необходимый для уменьшения доли событий с наложениями сигналов, возникающих при высоких частотах ядерных взаимодействий. Применение разработанного фильтра снижает долю событий с наложениями с 40% всех событий до 10% всех событий. Кроме того, он позволяет отфильтровать низкочастотные флуктуации, такие как дрейф нулевого уровня, и подавить высокочастотный шум. Ядро разработанного фильтра состоит всего из 11 компонентов, что позволит в дальнейшем реализовать его на уровне ПЛИС.
5. Разработаны методы определения центральности по данным передних адронных калориметров, использующие пространственное распределение выделенной энергии в детекторе. Один из методов основан на применении асимметрии выделенной энергии в передних адронных калориметрах. Другой метод использует технику машинного обучения по принципам, схожим с анализом изображений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1. Метод ЦОС, основанный на методе наименьших квадратов Прони, был разработан и впервые применен для описания сигналов адронного калориметра суперпозицией экспоненциальных функций. Был разработан критерий оценки качества ЦОС, обеспечивающий надежную фильтрацию электронных шумов и помех электроники.
2. Разработано программное обеспечение для считывания и записи данных адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и CBM . ПО было разработано для чтения двоичных файлов, их преобразования и сохранения в формате экспериментальных данных. Разработанное ПО также отвечает за организацию доступа к данным для дальнейшего физического анализа.
3. Разработан новый метод выравнивания откликов адронных калориметров с использованием реконструкции треков космических мюонов в материале детектора, что достигается благодаря наличию продольной и поперечной сегментации детекторов. Метод особенно актуален для экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ из-за отсутствия вторичных мюонных пучков на их ускорительных комплексах.
4. Для эксперимента CBM был разработан метод ЦОС на основе полосового фильтра, направленный на снижение доли событий с наложенными

сигналами, возникающих в большом количестве при высокой частоте ядерных взаимодействий.

5. Были разработаны методы определения центральности по данным передних адронных калориметров с использованием пространственного распределения выделенной энергии в детекторе. Впервые к задаче были применены методы машинного обучения по принципам, аналогичным анализу изображений. Разработан метод определения центральности с использованием пространственной асимметрии выделенной энергии в калориметре.

Практическая значимость

Сбор, хранение, обработка и анализ экспериментальных и смоделированных данных являются неотъемлемой частью современных экспериментов физики высоких энергий. Работа предоставляет ряд практических решений для анализа данных существующих и строящихся детекторов — передних адронных калориметров. Разработана полная цепочка анализа данных: разработан метод цифровой обработки сырых сигналов, разработаны программные пакеты хранения данных и отслеживания качества данных в экспериментальных сеансах, разработан метод калибровки передних адронных калориметров для экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ и методы определения центральности.

Практическая польза представляемой работы заключается непосредственно в применении разработанных методов для адронных калориметров, как то: разработанный метод ЦОС на основе метода наименьших квадратов (МНК) Прони позволяет надежно выделять срабатывания детектора в зашумленных данных, что особенно важно для проведения калибровки детектора, поскольку при этом требуется выделять слабые сигналы близко к уровню шума. Разработанный метод ЦОС на основе полосового фильтра позволяет значительно снизить долю срабатываний детектора, в которых присутствует наложение сигналов, что имеет решающее значение для экспериментов с особо высокой интенсивностью ядерных взаимодействий, таких как CBM . Программные пакеты чтения-записи данных детектора и отслеживания качества набираемых в процессе экспериментальных сеансов данных имеют самое непосредственное практическое применение, позволяя обнаруживать и устранять в реальном времени возможные ошибки, связанные с набором данных. Разработанные методы определения центральности представляют собой практический инструмент анализа данных, позволяющий использовать пространственное распределение выделенной энергии в детекторе в поставленной задаче.

Методология и методы исследования

Разработанные методы предоставляют ряд практических решений для анализа данных существующих и строящихся детекторов – передних адронных калориметров. При их разработке были использованы аналитические и численные методы исследования. Программное изложение математической записи

разработанных методов реализовано на языках C++ и Python. Для демонстрации результатов разработанных методов определения центральности в работе используются данные, полученные посредством компьютерного моделирования: расчета ядро-ядерных столкновений в модели DCM-QGSM-SMM [17] и транспортной модели GEANT4 [18].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан и впервые применен к сигналам передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ метод цифровой обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов Прони. Разработан критерий оценки качества обработки сигналов, обеспечивающий надежную фильтрацию электронных шумов и помех электроники.
2. Разработано программное обеспечение для чтения и записи данных передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$. Программное обеспечение предназначено для преобразования записанных данных в формат данных эксперимента и для организации к ним доступа с целью последующего анализа. Разработано программное обеспечения для отслеживания в реальном времени качества данных передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ в физических сеансах.
3. Разработан метод выравнивания откликов секций передних адронных калориметров путем восстановления треков космических мюонов в материале детектора. Метод особенно актуален для передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$ из-за отсутствия вторичных мюонных пучков на их ускорительных комплексах.
4. Разработан метод цифровой обработки сигналов переднего адронного калориметра эксперимента CBM на основе полосового фильтра, позволяющий существенно сократить долю событий с наложениями сигналов.
5. Разработаны методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием для экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$. В методах используется пространственное распределение выделенной энергии в детекторе: разработаны методы на основе средств машинного обучения и метод на основе расчета асимметрии выделенной энергии в калориметре.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается следующим:

- Разработанный метод ЦОС на основе МНК Прони вместе с программными пакетами чтения-записи данных уже используются в действующем

эксперименте BM@N и прототипе эксперимента CBM@FAIR применительно к передним адронным калориметрам и демонстрируют свою работоспособность.

- Метод выравнивания откликов секций калориметров с восстановлением треков космических мюонов был опробован параллельно проведению работ по определению линейности отклика и энергетического разрешения сборки модулей адронного калориметра на тестовом канале транспортировки пучка T10 ускорителя PS (Proton Synchrotron) в ЦЕРНе. Расчетные калибровочные коэффициенты, полученные указанным методом и коэффициенты, полученные при прохождении модулей калориметра пучковыми мюонами, находятся в согласии.
- Разработанные методы определения центральности ядро-ядерных столкновений были применены к смоделированным данным отклика калориметра PSD эксперимента CBM. Используемая модель DCM-QGSM-SMM является основным модельным инструментом коллаборации CBM.

Апробация работы

Результаты диссертации представлены на следующих международных конференциях:

1. Karpushkin N. — Commissioning of the forward detectors of the BM@N experiment — ICPPA2022: 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics — (2022) — <https://indico.particle.mephi.ru/event/275/contributions/3139/>
2. Karpushkin N. — Study of the mPSD response in O+Ni collisions at 2 AGeV at the mCBM — Nucleus2022: Fundamental problems and applications — (2022) — <https://events.sinp.msu.ru/event/8/contributions/425/>
3. Karpushkin N. — Machine learning approach for centrality determination in heavy ion reactions with segmented forward hadron calorimeters — 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics — (2021) — https://lomcon.ru/?page_id=814#6
4. Karpushkin N. et al. — mPSD data monitoring at mCBM experiment — TIP2021 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics — (2021) — <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295600/>
5. Karpushkin N. et al. — Development of cosmic muon calibration methods for the segmented sampling lead/scintillator hadron calorimeters at the NA61/SHINE, CBM, BM@N and MPD experiments — TIP2021 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics — (2021) — <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295387/>

6. Karpushkin N. — New approach for centrality determination with forward hadron calorimeters in heavy ion reactions — NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies — (2020) — <https://indico.cern.ch/event/839985/contributions/3983692/>
7. Karpushkin N. — Application of Machine Learning methods for centrality determination in heavy ion reactions at the BM@N and MPD@NICA — ICPA2020 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics — (2020) — <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/contributions/2342/>
8. Karpushkin N. et al. — Energy calibration and signal waveform analysis of the CBM Projectile Spectator Detector — in Quark Matter 2019 the XXVIIIth International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions — (2019) — <https://indico.cern.ch/event/792436/contributions/3533787/>
9. Karpushkin N. et al. — The Projectile Spectator Detector for measuring of geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment at FAIR — PM2018 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors, Piza, Italy — (2018) — <https://agenda.infn.it/event/17834/contributions/83621/>

Личный вклад

В диссертации представлены положения и результаты, полученные при определяющем участии автора.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 2 — в тезисах докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований сильновзаимодействующей ядерной материи в условиях экстремальных плотностей и температур, которые создаются в лаборатории в столкновениях релятивистских ядер. Дается современное понимание фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи и ее фазовых переходов. Приводится обзор действующих и планируемых экспериментов в этой области физики, рассматриваются существующие теоретические подходы, дается обзор научной литературы. Перечисляются основные наблюдаемые для изучения кварк-глюонной материи, подчеркивается важность их зависимости от центральности столкновений. Обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель исследований, ставятся

основные задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость разработки методов анализа данных передних адронных калориметров.

В первой главе дается обзор действующих, строящихся и планируемых экспериментов по изучению сильновоздействующей ядерной материи при высокой барионной плотности. Рассматриваются действующие эксперименты RHIC FXT, NA61/SHINE, BM@N и HADES, строящиеся эксперименты MPD@NICA и CBM@FAIR, планируемый проект J-PARC-HI. Обсуждаются детекторы для определения геометрии столкновений — передние адронные калориметры — экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM@FAIR.

Передние адронные калориметры экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM имеют ряд схожих черт. Каждый из детекторов представляет собой модульный адронный калориметр с отверстием в центре для прохождения пучка, см. рис.1.

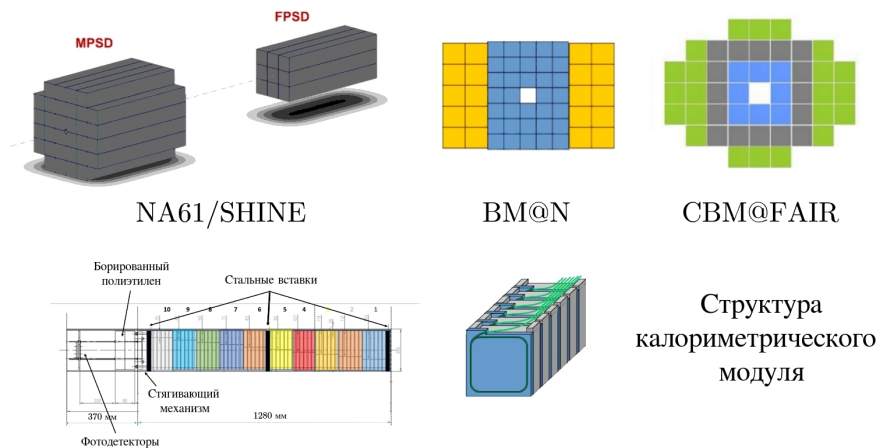


Рис. 1 — Сверху: Схемы адронных калориметров экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM@FAIR. Снизу: структура модуля адронного калориметра. На рисунке внизу слева цветом показана продольная сегментация калориметрического модуля на секции.

Каждый модуль адронного калориметра состоит из слоев чередующихся свинцовых пластин толщиной 16 мм и пластин пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. Свет от каждой сцинтилляционной пластины собирается с помощью спектросмещающего оптоволоконна. Калориметры спроектированы с продольной сегментацией модулей на секции, что обеспечивает однородность светосбора модуля, возможность индивидуальной калибровки продольных секций и контроль возможных изменений световых выходов секций калориметра из-за большой дозы радиации при работе на высокоинтенсивных ионных пучках, а также обеспечивает большой динамический диапазон детектируемой энергии.

Свет с каждой секции, сформированной шестью последовательно расположенными слоями свинцовых и сцинтилляционных пластин, считывается через отдельный оптический разъем собственным кремниевым фотоумножителем. Кремниевые фотоумножители (SiPM – Silicon PhotoMultiplier) располагаются на печатной плате, закрепленной на заднем торце каждого модуля, тем самым обеспечивается оптический контакт фотодетекторов с клееными в оптические разъемы спектросмещающими оптоволоконными. Наличие в центрах калориметров пучкового отверстия вызвано необходимостью оградить центральные модули от высоких доз ионизирующего излучения пучка ионов и высоких потоков нейтронов, которые приводят к радиационному повреждению сцинтилляционных пластин и кремниевых структур фотодетекторов.

Во второй главе рассматриваются разработанные автором методы ЦОС для анализа сигналов передних адронных калориметров. Приводится краткое изложение принципа МНК Прони для анализа формы сигналов, обсуждается критерий оценки качества ЦОС и его применение для фильтрации шумовых срабатываний электроники. Дается рассмотрение разработанного метода ЦОС на основе полосового фильтра для снижения доли событий с наложением сигналов на примере данных прототипа адронного калориметра эксперимента CBM.

Адронные калориметры экспериментов BM@N и CBM@FAIR спроектированы для работы в широком динамическом диапазоне регистрируемых энергий, начиная с минимально ионизирующих частиц. В задачи ЦОС входит выделение слабых сигналов на уровне шума и подавление электронных наводок, что играет большую роль при проведении мюонной калибровки секций адронных калориметров. Другой задачей ЦОС является выявление и разделение событий с наложением сигналов (пайлапов), которое возникает при работе в условиях высокой загрузки детекторов.

Метод Прони [19] используется для построения по эквидистантным экспериментальным данным аппроксимационной модели, состоящей из линейной композиции экспоненциальных функций (см. рис.2). Описанный в [20] метод удобен для анализа сигналов адронных калориметров, его реализация сводится к нахождению характерных временных параметров — времен затухания экспоненциальных компонент свертки сцинтилляционного канала и аппаратной функции кремниевого фотоумножителя, после чего определяются амплитуды экспоненциальных компонент.

Для определения качества процедуры используется коэффициент детерминации R^2 [21]. В разработанном подходе события, хорошо аппроксимированные моделью, сгруппированы вблизи нулевого значения критерия качества \widehat{R}_{adj}^2 . Шумы, сигналы с электрической наводкой и события с наложением сигналов плохо описываются моделью из двух экспонент, что позволяет надежно отделить их от истинных сигналов. На рис.3 представлена зависимость коэффициента детерминации от заряда сигнала. Под зарядом сигнала здесь понимается площадь под осциллограммой сигнала. События с электрическими наводками выделяются в отдельную группу и не участвуют в дальнейшем анализе.

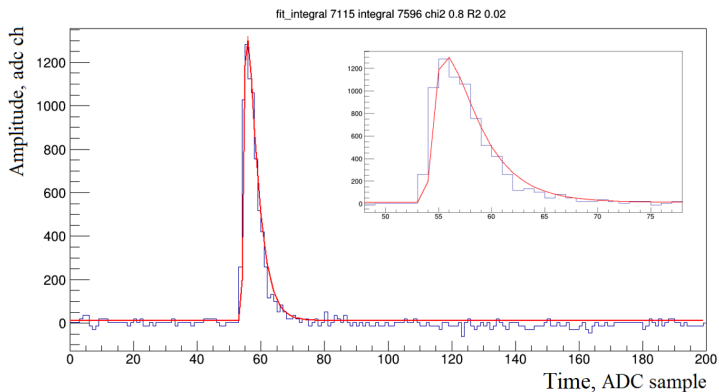


Рис. 2 — Синяя линия: пример осциллограммы, полученной в тесте на адронном пучке с использованием платы ADC64s2. Красная линия: модельная функция, рассчитанная по МНК Прони. Эта же осциллограмма в увеличенном масштабе показана на вставке справа.

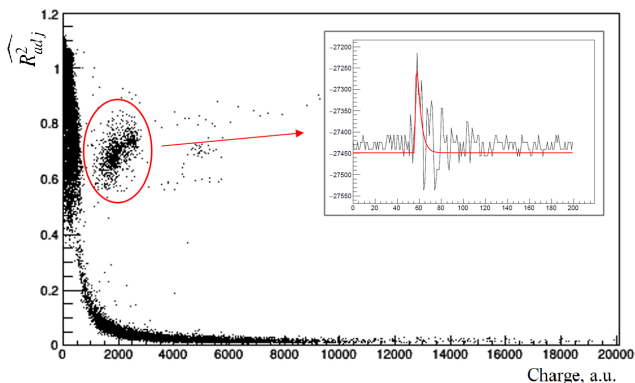


Рис. 3 — Зависимость коэффициента детерминации от заряда сигнала. Истинные события расположены вблизи нуля коэффициента детерминации, группа событий с небольшим значением заряда и большим значением коэффициента детерминации соответствует шумовым срабатываниям, красным выделена группа событий с электрической наводкой. Пример осциллограммы с электрической наводкой приведен на вставке.

Эксперимент CBM нацелен на работу при высокой частоте ядерных взаимодействий, что рождает ряд трудностей для детекторных систем. Максимальная плановая частота взаимодействий, при которой заявлено функционирование calorimetra PSD в эксперименте CBM, составляет $\nu = 1$ МГц. Принимая во внимание длительность импульсов calorimetra PSD, составляющих порядка

$\tau = 200$ нс, простая оценка [22] дает при такой частоте взаимодействий долю событий с наложениями сигналов $P = 1 - e^{-2\nu\tau} = 33\%$ событий. Такая оценка была подтверждена в экспериментальных данных, набранных прототипом адронного калориметра — mPSD (miniPSD) в эксперименте mCBM (miniCBM) в июле 2021 в столкновениях ядер кислорода в никелевой мишени при энергии налетающих ядер 2 АГэВ. Эксперимент mCBM [23] является предшественником эксперимента CBM, его цель состоит в испытаниях прототипов детекторных систем CBM и их электроники, а также их интеграция в общую систему сбора данных. При работе с прототипом калориметра PSD во время тестового сеанса mCBM по столкновениям O+Ni@2АГэВ наблюдался дрейф нулевого уровня (базовой линии) при высоких загрузках детектора. Кроме того, при частоте взаимодействий около 1 МГц наблюдалась большая доля событий с наложениями сигналов $\sim 36\%$ [A1]. Далее для события с наложением сигналов используется термин пайлап (pileup).

Для уменьшения доли пайлапов было предложено использовать цифровой полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой, см. рис.4.

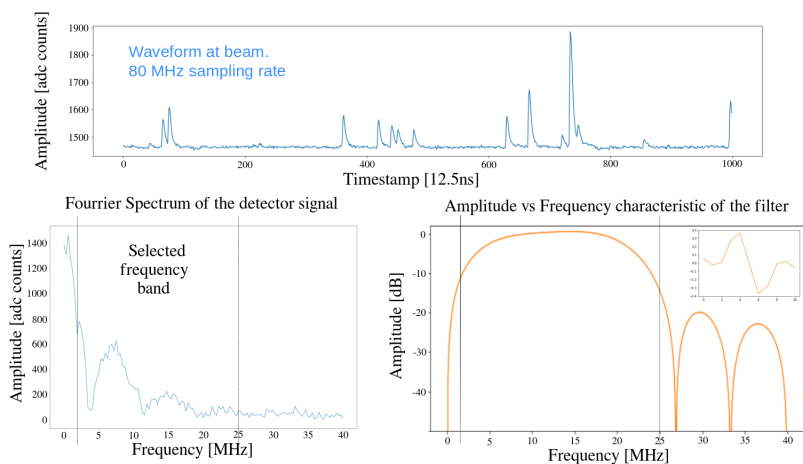


Рис. 4 — Сверху: осциллограмма одного канала mPSD, данные физического сеанса. Внизу слева: Фурье-спектр сигнала детектора и выбранная полоса частот. Внизу справа: амплитудно-частотная характеристика разработанного фильтра.

Полосовой фильтр предназначен для выделения рабочей полосы частот, которой очерчиваются границы спектра измеряемых сигналов. При разработке полосового фильтра экспериментально был выбран диапазон от 2 до 25 МГц. При таком выборе полосы пропускания удалось добиться сокращения характерной длительности сигнала (200 нс) до 60 нс за счет подавления наиболее низкочастотных составляющих. Срез частотного спектра ниже 2 МГц устраняет также низкочастотные колебания, включая дрейф базовой линии, а срез спектра

выше 25 МГц устраняет высокочастотные шумовые составляющие. На верхней части рис.4 показана осциллограмма сигнала mPSD, полученного на физическом сеансе с частотой дискретизации АЦП 80 МГц.

На нижнем левом изображении показан частотный спектр сигналов, полученный быстрым преобразованием Фурье (БПФ), а выбранная полоса частот выделена пунктирной линией. Коэффициенты ядра фильтра получены для выбранной полосы пропускания по алгоритму Паркса-МакКлеллана [24]. Частотная характеристика разработанного фильтра показана в правой нижней части рис.4, там же на вставке приведен сам цифровой фильтр. Ядро разработанного фильтра состоит всего из 11 компонентов, что делает возможным реализовать его на уровне ПЛИС. Применение разработанного фильтра к данным, полученным на mSVM, показало снижение доли пайлапов с 36% до 10% событий при частоте взаимодействий 1 МГц. Кроме того, он позволяет отфильтровать низкочастотные флуктуации, такие как дрейф базовой линии, и подавить высокочастотный шум.

В **третьей главе** обсуждается созданное программное обеспечение для чтения-записи и отслеживания в реальном времени качества данных передних адронных калориметров экспериментов VM@N и SVM.

Одними из ключевых этапов обработки данных в экспериментах VM@N и SVM@FAIR являются этапы оцифровки и реконструкции. На этапе оцифровки производится конвертация «сырых» бинарных файлов в промежуточный формат, в котором хранятся оцифрованные срабатывания элементарных компонент детекторов. Под элементарным компонентом детектора здесь понимается такой малый его элемент, который подключен к одному каналу считывающей электроники. Затем на этапе реконструкции производится восстановление треков частиц, вершин взаимодействия и т.д., после чего реконструированные данные используются в различных задачах физического анализа.

Для адронного калориметра FHCAL эксперимента VM@N во фреймворке BmnRoot [25] автором диссертации созданы:

1. Конфигурационный файл, необходимый для указания задействованных идентификаторов электронных плат считывания сигналов и организации связи каналов данных электронных плат с физическими элементами детектора. Такие конфигурационные файлы служат как карта каналов и направлены, в частности, на предоставление информации о геометрии детектора.
2. Калибровочный файл, содержащий в себе информацию, позволяющую выровнять отклики элементов детектора. В этих файлах приведены калибровочные параметры для каждого элементарного компонента детектора.
3. Абстрактный класс, служащий для описания срабатывания элементарного компонента детектора. Данный класс несет в себе информацию об адресе срабатывания и поля, характеризующие само срабатывание непосредственно (амплитуда, время и т.д.). Адрес срабатывания представляет собой 32 битное беззнаковое поле, в котором закодированы

- индекс детектора (в соответствии с идентификатором детектора в списке детекторов в VmnRoot) и информация о геометрическом положении срабатывания.
4. Программный модуль преобразования сырых срабатываний электроники в объекты описанного выше класса. Этот программный модуль отвечает за чтение конфигурационных и калибровочных файлов, а также за этап оцифровки, предоставляя для каждого события как выходную информацию массив объектов класса оцифрованных данных детектора FHCAL.
 5. Конфигурационный файл реконструкции, содержащий информацию для отсеивания шумовых срабатываний детектора на этапе реконструкции. Единый для смоделированных и экспериментальных данных.
 6. Класс для хранения данных детектора после этапа реконструкции. Данный класс содержит в себе срабатывания всех элементарных компонентов детектора, прошедших отбор на этапе реконструкции. Объект класса характеризует отклик детектора FHCAL в отдельно взятом событии.
 7. Программный модуль реконструкции данных в объекты описанного выше класса. Этот программный модуль отвечает за чтение конфигурационного файла реконструкции и компоновку срабатываний элементарных компонентов детектора в объект описанного выше класса с учетом параметров отбора. На этапе реконструкции экспериментальные и смоделированные данные сводятся к единому формату хранения данных.

Графическое представление созданного ПО показано на рис.5.

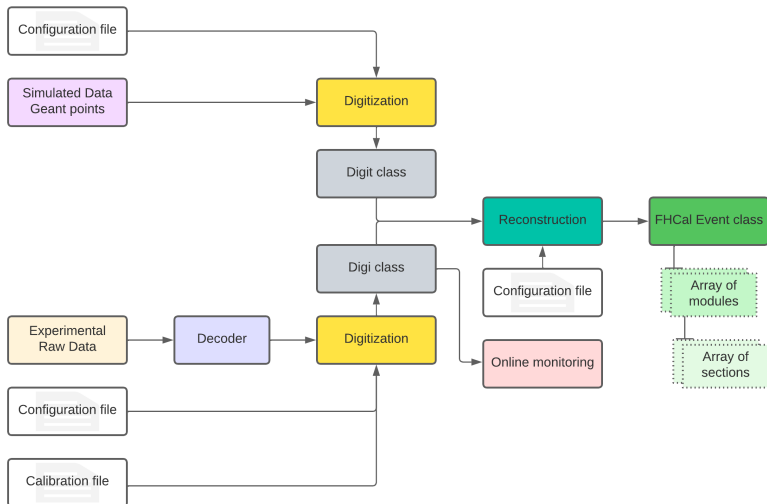


Рис. 5 — Блок-схема созданного программного обеспечения детектора FHCAL.

В схеме обработки данных эксперимента CBM можно выделить те же ключевые этапы. В ней предусмотрены онлайн-система гистограммирования, этапы оцифровки и реконструкции данных всех детекторных подсистем, при этом обработка экспериментальных и модельных данных также должна вестись на распределенных вычислительных системах. Однако, имеются и принципиальные различия, связанные в первую очередь с тем, что эксперимент CBM является бестриггерным экспериментом, что диктуется высокой частотой ядерных взаимодействий, достигающей 10 МГц.

Концепция бестриггерной системы сбора данных CBM была опробована в эксперименте mCBM — предшественнике эксперимента CBM, который включает в себя прототипы всех его детекторных подсистем с их считывающей электроникой. В экспериментальных сеансах mCBM принимал участие прототип mPSD, представляющий собой один модуль адронного калориметра PSD, снабженный считывающей электроникой. В рамках подготовки к экспериментальным сеансам mCBM автором данной диссертационной работы были разработаны и внедрены в фреймворк CbmRoot [26] программные модули, ответственные за считывание, хранение и отслеживание в реальном времени качества данных детектора mPSD.

Разработанное для эксперимента CBM ПО было задействовано при проведении экспериментальных сеансов эксперимента mCBM, в которых оно показало свою работоспособность. По итогам проведенного экспериментального сеанса была установлена синхронность данных mPSD и остальных подсистем mCBM [A1], было получено хорошее согласие с моделированными данными откликов секций mPSD. На рис. 6 показано отношение распределений выделенной энергии в первой секции mPSD в моделированных (GEANT4) и экспериментальных данных для соударений $O+Ni@2AГЭВ$, при этом из рассмотрения исключены события с наложением сигналов.

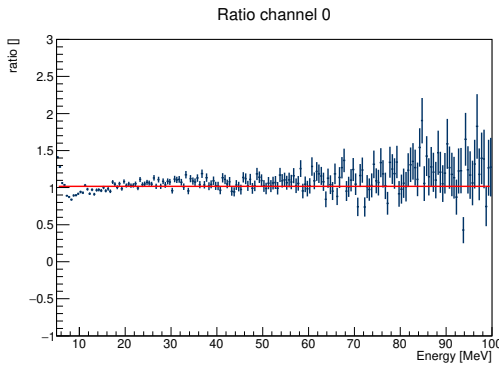


Рис. 6 — Отношение спектров выделенной энергии в первой секции mPSD в моделированных (GEANT4) и экспериментальных данных для соударений $O+Ni@2AГЭВ$.

Красной линией отмечена единица — идеальное совпадение спектров. Превышение единицы в области энергий меньших 5 МэВ вызвано тем, что в моделированных *minimum bias* данных отсутствует порог на выделенную энергию в секции. Эта область энергий, меньших 1 MIP (=5 МэВ), находится вне динамического диапазона калориметра PSD. Распределения выделенной энергии вне этой области находятся для моделированных и экспериментальных данных в хорошем согласии.

В четвертой главе рассматривается разработанный автором метод выравнивания откликов секций передних адронных калориметров с реконструкцией треков космических мюонов в материале детектора. Приводятся результаты сравнения расчетных калибровочных коэффициентов, полученных указанным способом, и коэффициентов, полученных по пучковым мюонам тестового канала транспортировки пучка T10 ускорителя PS в ЦЕРНе.

Разница в длине использованного оптоволокну, оптическом контакте плат FEE с оптическими коннекторами модулей и возможный разброс значений коэффициентов усиления кремниевых фотоумножителей приводит к необходимости выравнивания откликов секций адронных калориметров. Для проведения процедуры выравнивания удобно использовать пучки мюонов как минимально ионизирующие частицы (MIP — *minimum ionising particles*). Такая процедура используется в эксперименте NA61/SHINE, в котором доступны пучки вторичных протонов и заряженных пионов. Последние, распадаясь, образуют мюоны, проходящие материал адронного калориметра параллельно оси пучка. При этом детекторы MPSD и FPSD в эксперименте NA61/SHINE снабжены подвижными платформами, что позволяет провести серию наборов данных, последовательно подставляя под пучок все модули адронных калориметров. Однако, подобной возможности лишены эксперименты BM@N, MPD@NICA и CBM@FAIR, ввиду отсутствия вторичных мюонных пучков на их ускорительных комплексах. Это делает мюоны космического излучения единственным источником для проведения процедуры выравнивания откликов секций калориметров. Такая процедура сопряжена с рядом трудностей, поскольку сигналы от космических мюонов имеют сравнительно малую амплитуду, а значит необходимо иметь чувствительный триггер для таких наборов данных и надежно выделять мюонные срабатывания вблизи уровня шума. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что космические мюоны могут проходить сквозь материал детектора под всеми возможными углами, выделяя в нем сигналы, пропорциональные толщине пройденного сцинтиллятора. Автором данной диссертации разработан метод калибровки секций модулей калориметра [A2], в котором используется реконструкция треков мюонов и последующая коррекция выделенной в секции энергии с учетом толщины пройденного материала, см. рис.7.

Были проведены сравнения полученных положений мюонных пиков в секциях калориметра из данных космики и из данных, полученных на тестовом канале транспортировки пучка T9 ускорителя PS в ЦЕРНе [27]. Два полученных

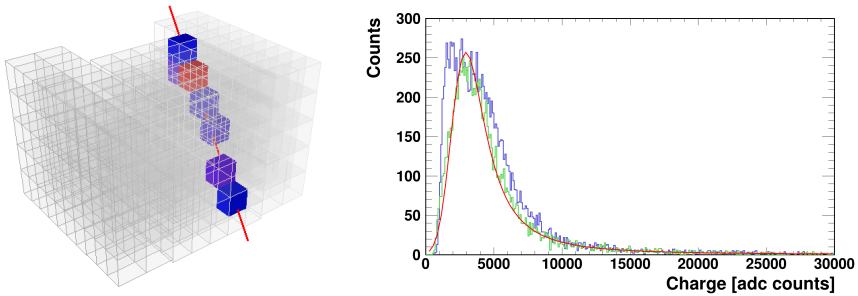


Рис. 7 — Слева: пример реконструированного трека космического мюона, пересекающего материал калориметра FHCaI эксперимента VM@N. Справа: Распределение выделенной энергии в секции адронного калориметра до (показано синим цветом) и после (зеленым цветом) коррекции на положение и угол пересекающих секцию треков. Красная линия: результат фита, полученного распределения композицией функций Ландау и Гаусса.

набора калибровочных коэффициентов — из данных космики и из пучковых данных — согласуются друг с другом, что подтверждает корректность процедуры.

В **пятой главе** обсуждаются разработанные автором методы определения центральности ядро-ядерных столкновений по данным передних адронных калориметров с использованием пространственного распределения выделенной энергии в детекторе. Это методы на основе средств машинного обучения и метод на основе расчета асимметрии выделенной энергии в калориметре.

В экспериментах VM@N и CBM для определения центральности используются передние адронные калориметры с пучковым отверстием, которые представляют собой модульные калориметры с продольной и поперечной сегментацией. Наличие в центре калориметров пучкового отверстия приводит к потере значительной доли энергии ядерных фрагментов, пролетающих через это отверстие. Это проявляется в немонотонной зависимости энергии, выделяемой в калориметре, от прицельного параметра столкновения (см. рис.8 слева), что делает невозможным определение центральности только по измерению суммарной выделяемой в детекторе энергии. Для анализа брались данные симуляции столкновения ядер золота из генератора событий DCMQGSMM-SMM с импульсом 12 АГэВ/с (на примере этих данных ведутся и дальнейшие рассуждения). Однако суммарная энергия, выделенная в калориметре, не является единственной экспериментальной наблюдаемой в каждом событии. На рис.8, справа, на примере переднего адронного калориметра в эксперименте CBM, показаны примеры пространственных распределений выделенной энергии в модулях калориметра (энергетическая поверхность калориметра) для центрального и периферического столкновений.

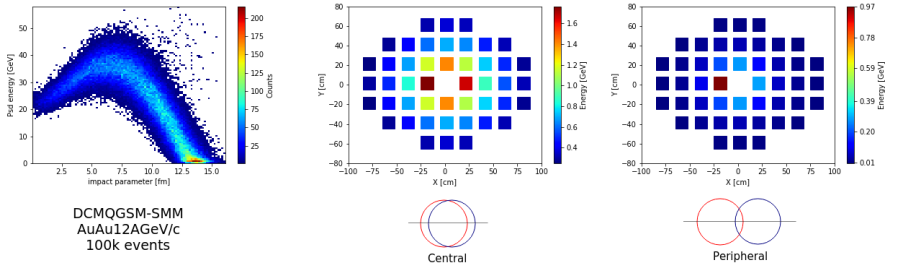


Рис. 8 — Слева: зависимость полной выделенной энергии в калориметре PSD@CBM от прицельного параметра для столкновения AuAu 12 АГэВ/с в модели DCM-QGSM-SMM. Справа: примеры энергетических поверхностей калориметра для центрального и периферического столкновений.

Определение классов центральности с использование передних адронных калориметров с пучковым отверстием становится возможным, если использовать дополнительную переменную — асимметрию выделенной энергии в калориметре [28] — $Assym = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{in} + E_{out}}$, здесь E_{in} и E_{out} — выделенная энергия во внутренней и внешней областях калориметра, соответственно. На рис.9, на примере калориметра PSD эксперимента CBM, показан выбор внутренних и внешних частей детектора для расчета асимметрии выделенной энергии. На этом же рисунке, справа, показана зависимость асимметрии от прицельного параметра для столкновения AuAu 12 АГэВ/с в модели DCM-QGSM-SMM. Видно, что асимметрия линейно зависит от прицельного параметра вплоть до самых периферических столкновений.

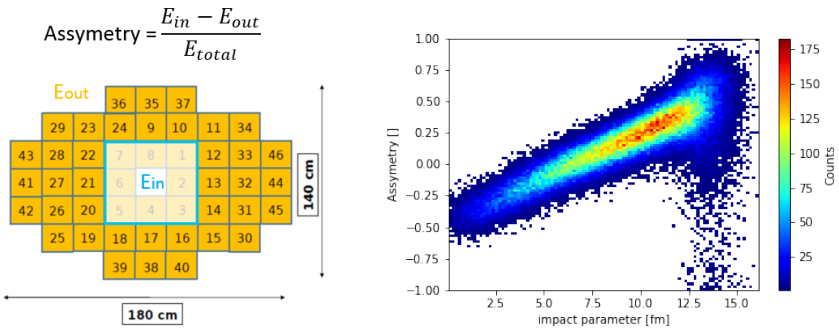


Рис. 9 — Слева: схема геометрии калориметра PSD@CBM. Цветом обозначен выбор внутренних и внешних областей детектора для определения асимметрии. Справа: зависимость асимметрии от прицельного параметра для столкновения AuAu 12AGeV/c DCM-QGSM-SMM.

На рис. 10 слева представлена двумерная зависимость полной нормированной выделенной энергии в калориметре от ее асимметрии. В данном подходе, по двумерному распределению строится профиль зависимости, который фитируется однозначной функцией. Двигаясь вдоль этого профиля и набирая необходимую долю от всех событий для заданного класса по центральности, можно определить границы классов центральности. Цветом на рис. 10 слева показаны области с разбиением по классам центральности в диапазоне 0-80% с шагом по 10%. Распределения прицельного параметра в полученных таким образом классах центральности приведены на рис. 10 справа. Этот подход во многом схож с методами, используемыми в экспериментах ALICE [29] и PHENIX [30].

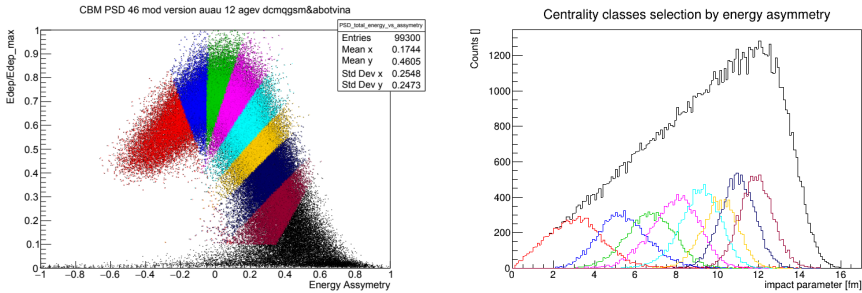


Рис. 10 — Слева: двумерное распределение зависимости выделенной энергии в калориметре от асимметрии выделенной энергии с разбиением по классам центральности. Справа: распределения прицельного параметра в выбранных классах центральности.

Модульная структура калориметров позволяет измерять пространственное распределение выделяемой энергии в отдельных модулях калориметра. Значения выделенных энергий в модулях адронных калориметров могут быть организованы в набор значений, что позволяет применять методы машинного обучения (machine learning — ML) для определения центральности. Методы машинного обучения хорошо зарекомендовали себя в области распознавания образов и классификации изображений. Два метода машинного обучения, с учителем и без учителя, были разработаны для определения центральности ядроядерных столкновений. В машинном обучении с учителем алгоритм обучается с использованием размеченных данных, полученных посредством моделирования отклика модулей калориметра. Стоит отметить, что этот подход существенным образом зависит от выбора физической симуляционной модели, используемой для разметки данных. Метод машинного обучения без учителя для определения центральности с помощью передних адронных калориметров основан на недавней работе по кластерному анализу [31]. Разработанный автором этой диссертационной работы метод использует автокодирование данных и метод глубокого встраивания, который позволяет разделить имеющиеся данные на

группы на основе сходства наблюдаемых энергетических поверхностей калориметра. Таким образом, машинное обучение без учителя можно использовать для классификации экспериментальных данных по классам центральности.

Средние значения прицельного параметра и разрешение по прицельному параметру как функция центральности приведены на рис. 11. Согласие в результатах между различными подходами наблюдается во всех классах центральности с небольшим ухудшением результатов ML-подхода без учителя в полуцентральной области.

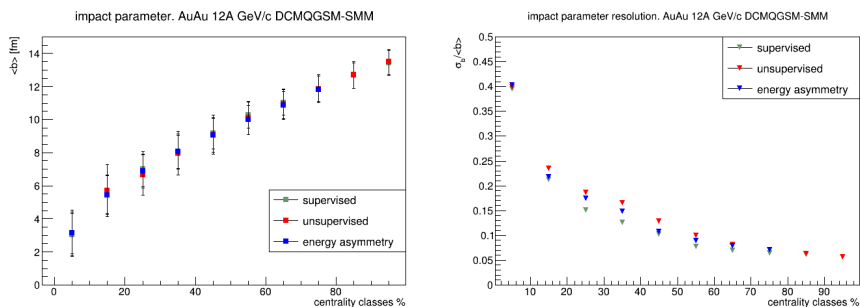


Рис. 11 — Слева: средние значения прицельного параметра в зависимости от класса центральности. Справа: разрешение по прицельному параметру в классах центральности.

В **заключении** приведены основные результаты работы: представлены разработанные автором методы анализа данных передних адронных калориметров, которые включают в себя цифровую обработку сырых сигналов, разработку программных пакетов хранения данных и отслеживания качества данных в экспериментальных сеансах, калибровку отклика детектора и методы определения центральности.

Основные достижения диссертационной работы:

1. Разработан метод цифровой обработки сигналов (ЦОС), основанный на методе наименьших квадратов Прони, позволяющий сопоставить набору эквидистантных зашумленных экспериментальных значений амплитуды сигнала модель, состоящую из композиции экспоненциальных функций. Разработан критерий оценки качества ЦОС, позволяющий надежно отсеивать электронные шумы и наводки электроники.
2. Создано программное обеспечение (ПО) для чтения-записи данных передних адронных калориметров экспериментов $BM@N$ и CBM . Разработанное ПО обеспечивает чтение сырых бинарных файлов, их конвертацию и хранение в формате данных эксперимента, а также отвечает за организацию к ним доступа для последующего анализа.
3. Разработан метод выравнивания откликов передних адронных калориметров с использованием реконструкции треков космических мюонов

в материале детектора. Метод использует наличие продольной и поперечной сегментации детекторов и особенно актуален для передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR ввиду отсутствия вторичных мюонных пучков на их ускорительных комплексах.

4. Для эксперимента CBM разработан метод ЦОС на основе полосового фильтра, необходимый для уменьшения доли событий с наложениями сигналов, возникающих при высоких частотах ядерных взаимодействий. Применение разработанного фильтра снижает долю событий с наложениями с 40% всех событий до 10% всех событий. Также он позволяет отфильтровать низкочастотные флуктуации, такие как дрейф нулевого уровня, и подавить высокочастотный шум. Малое ядро разработанного фильтра позволит в дальнейшем реализовать его на уровне ПЛИС.
5. Разработаны методы определения центральности по данным передних адронных калориметров, использующие пространственное распределение выделенной энергии в детекторе. Это метод, основанный на применении асимметрии выделенной энергии в передних адронных калориметрах, и методы, использующие техники машинного обучения по принципам, схожим с анализом изображений.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Commissioning of the readout chain of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR / D. Finogeev, ..., N. Karpushkin, [et al.] // JINST. — 2022. — Vol. 17, no. 11. — T11006. — DOI: [10.1088/1748-0221/17/11/T11006](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/11/T11006).
- A2. Calibration of FHCAL with cosmic muons at the BM@N experiment / A. Izvestnyy, ..., N. Karpushkin, [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by P. Teterin. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012060. — DOI: [10.1088/1742-6596/1690/1/012060](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012060).
- A3. ML Approaches for Centrality Determination with Forward Hadron Calorimeters in Heavy Ion Reactions / N. Karpushkin [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2022. — Vol. 53, no. 2. — P. 524—530. — DOI: [10.1134/S1063779622020381](https://doi.org/10.1134/S1063779622020381).
- A4. Study of the Spectator Matter in Heavy Ion Collisions at the BM@N Experiment / F. Guber, ..., N. Karpushkin, [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2022. — Vol. 53, no. 2. — P. 626—630. — DOI: [10.1134/S1063779622020332](https://doi.org/10.1134/S1063779622020332).
- A5. Measurements of Centrality in Nucleus–Nucleus Collisions at the BM@N Experiment / F. Guber, ..., N. Karpushkin, [et al.] // Phys. Part. Nucl. — 2021. — Vol. 52, no. 4. — P. 571—577. — DOI: [10.1134/S1063779621040262](https://doi.org/10.1134/S1063779621040262).

- A6. Application of Machine Learning methods for centrality determination in heavy ion reactions at the BM@N and MPD@NICA / N. Karpushkin [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by P. Teterin. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012121. — DOI: [10.1088/1742-6596/1690/1/012121](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012121).
- A7. Methods for centrality determination in nucleus-nucleus collisions with forward hadron calorimeters at the BM@N experiment / S. Morozov, ..., N. Karpushkin, [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 09. — P. C09028. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/09/C09028](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09028).
- A8. The readout system of the CBM Projectile Spectator Detector at FAIR / D. Finoeev, ..., N. Karpushkin, [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 09. — P. C09015. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/09/C09015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09015).
- A9. Methods of signal processing and cosmic muon calibration for the BM@N sampling lead/scintillator hadron calorimeter / S. Morozov, ..., N. Karpushkin, [et al.] // JINST. — 2020. — Vol. 15, no. 05. — P. C05050. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/05/C05050](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05050).
- A10. *Karpushkin, N.* Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC / N. Karpushkin, F. Guber, A. Ivashkin // AIP Conf. Proc. / ed. by A. Aparin [et al.]. — 2019. — Vol. 2163, no. 1. — P. 030006. — DOI: [10.1063/1.5130092](https://doi.org/10.1063/1.5130092).

Список литературы

1. ATLAS. — URL: <https://atlas.cern>.
2. CMS. — URL: <https://cms.cern>.
3. ALICE. — URL: <https://home.cern/science/experiments/alice>.
4. PHENIX. — URL: <https://www.phenix.bnl.gov>.
5. STAR. — URL: <https://www.star.bnl.gov>.
6. *Odyniec, G.* The RHIC Beam Energy Scan program in STAR and what's next ... / G. Odyniec // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by J. Cleymans. — 2013. — Vol. 455. — P. 012037. — DOI: [10.1088/1742-6596/455/1/012037](https://doi.org/10.1088/1742-6596/455/1/012037).
7. Review of the Fixed Target Operation at RHIC in 2020 / C. Liu [et al.] // 12th International Particle Accelerator Conference. — 08/2021. — DOI: [10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB009](https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB009).
8. NA61/SHINE. — URL: <https://shine.web.cern.ch>.
9. BM@N. — URL: <https://bmn.jinr.ru>.
10. HADES. — URL: <https://hades.gsi.de>.
11. MPD. — URL: <http://mpd.jinr.ru>.
12. CBM. — URL: <https://www.cbm.gsi.de>.

13. JPARC. — URL: <https://j-parc.jp/c/en/>.
14. Dynamical phase trajectories for relativistic nuclear collisions / I. C. Arsene [et al.] // Phys. Rev. C. — 2007. — Vol. 75. — P. 034902. — DOI: [10.1103/PhysRevC.75.034902](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.75.034902). — arXiv: [nucl-th/0609042](https://arxiv.org/abs/nucl-th/0609042).
15. *Senger, P.* QCD Matter Physics at the Future FAIR Facility in Germany / P. Senger // JPS Conf. Proc. — 2020. — Vol. 32. — P. 010092. — DOI: [10.7566/JPSCP.32.010092](https://doi.org/10.7566/JPSCP.32.010092).
16. *Senger, P.* Astrophysics in the Laboratory—The CBM Experiment at FAIR / P. Senger // Particles. — 2020. — Vol. 3, no. 2. — P. 320–335. — DOI: [10.3390/particles3020024](https://doi.org/10.3390/particles3020024). — arXiv: [2004.11214](https://arxiv.org/abs/2004.11214) [[nucl-ex](https://arxiv.org/abs/nucl-ex)].
17. Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM / M. Baznat [et al.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2020. — Vol. 17, no. 3. — P. 303–324. — DOI: [10.1134/S1547477120030024](https://doi.org/10.1134/S1547477120030024). — arXiv: [1912.09277](https://arxiv.org/abs/1912.09277) [[nucl-th](https://arxiv.org/abs/nucl-th)].
18. GEANT4—a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 506. — P. 250–303. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
19. *De Prony, B. G. R.* Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l’alkool, a différentes températures. / B. G. R. De Prony // Journal de l’École Polytechnique. — 1795. — Vol. 1, no. 22. — P. 24–76.
20. *Marple, J. S. L.* Digital Spectral Analysis: Second edition / J. S. L. Marple. — Dover Publications, 2019.
21. *Chicco, D.* The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. Warrens, G. Jurman // PeerJ Computer Science. — 2021. — July. — Vol. 7. — e623. — DOI: [10.7717/peerj-cs.623](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623).
22. *Pommé, S.* Dead Time, Pile-Up, and Counting Statistics / S. Pommé. — 11/2006. — DOI: [10.1021/bk-2007-0945.ch016](https://doi.org/10.1021/bk-2007-0945.ch016).
23. mCBM. — URL: <https://www.gsi.de/work/forschung/cbmqm/cbm/activities/mcbm>.
24. *McClellan, J.* A personal history of the Parks-McClellan algorithm / J. McClellan, T. Parks // IEEE Signal Processing Magazine. — 2005. — Vol. 22, no. 2. — P. 82–86. — DOI: [10.1109/MSP.2005.1406492](https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1406492).
25. The BmnRoot framework for experimental data processing in the BM@N experiment at NICA / P. Batyuk [et al.] // EPJ Web Conf. / ed. by A. Forti [et al.]. — 2019. — Vol. 214. — P. 05027. — DOI: [10.1051/epjconf/201921405027](https://doi.org/10.1051/epjconf/201921405027).
26. *Al-turany, M.* CbmRoot : Simulation and Analysis framework for CBM Experiment / M. Al-turany, D. Bertini //. — 2006.

27. The PSD CBM Supermodule Response Study for Hadrons in Momentum Range 2 – 6 GeV/c at CERN Test Beams / D. Finogeev, ..., N. Karpushkin, [et al.] // KnE Energ. Phys. — 2018. — Vol. 3. — P. 333–339. — DOI: [10.18502/ken.v3i1.1763](https://doi.org/10.18502/ken.v3i1.1763).
28. Forward hadron calorimeter at MPD/NICA / M. Golubeva [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by A. Galper [et al.]. — 2017. — Vol. 798, no. 1. — P. 012074. — DOI: [10.1088/1742-6596/798/1/012074](https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012074).
29. Centrality determination of Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with ALICE / B. Abelev [et al.] // Phys. Rev. C. — 2013. — Vol. 88, no. 4. — P. 044909. — DOI: [10.1103/PhysRevC.88.044909](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.044909). — arXiv: [1301.4361](https://arxiv.org/abs/1301.4361) [nucl-ex].
30. High p_T charged hadron suppression in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV / S. S. Adler [et al.] // Phys. Rev. C. — 2004. — Vol. 69. — P. 034910. — DOI: [10.1103/PhysRevC.69.034910](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.69.034910). — arXiv: [nucl-ex/0308006](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0308006).
31. *Xie, J.* Unsupervised Deep Embedding for Clustering Analysis / J. Xie, R. Girshick, A. Farhadi. — 2016. — arXiv: [1511.06335](https://arxiv.org/abs/1511.06335) [cs.LG].

Научное издание

Карпушкин Николай Михайлович

Методы анализа данных передних адронных калориметров
ядро-ядерных экспериментов с фиксированной мишенью

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 01.06.2023

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,0 Зак. № 22514 Тираж 70 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а