

*На правах рукописи*

Волков Вадим Вячеславович

Определение геометрии  
столкновений тяжелых ионов  
передними адронными калориметрами  
в эксперименте MPD/NICA

1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

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

**Научный руководитель:**

*Ивашкин Александр Павлович*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики, старший научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Салахутдинов Гаяр Харисович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Отделение ядерной физики и технологий офиса образовательных программ, профессор.

*Семенов Павел Александрович*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Отделение экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе 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 по адресу: <http://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.

Релятивистские столкновения тяжелых ионов являются актуальной темой ядерной физики, поскольку в таких реакциях образовывается чрезвычайно горячая и плотная ядерная материя. Предполагается, что такое состояние вещества существовало в ранней Вселенной вскоре после Большого взрыва. Изучение физики этих столкновений направлено на понимание свойств и поведения такой материи, которые невозможно изучить с помощью традиционных лабораторных методов.

Состояния вещества при различных значениях температуры и барионного химического потенциала могут быть представлены в виде фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (КХД) [1]. Данная диаграмма описывает состояния вещества при различных значениях температуры и барионного химического потенциала. Различные области диаграммы соответствуют разным фазам материи. При экстремально высоких температурах и низких барионных химических потенциалах предполагается, что материя находится в состоянии деконфайнмента, известного как кварк-глюонная плазма (КГП). В этом состоянии кварки и глюоны могут свободно перемещаться независимо друг от друга. При низких температурах и высоких барионных химических потенциалах ожидается, что материя находится в связанном состоянии адронной материи [1].

Исследование фазового перехода [2] является еще одним из важных аспектов в изучении фазовой диаграммы КХД. Этот фундаментальный процесс привлекает значительное внимание в последние годы. Фазовый переход характеризуется изменением свойств материи от адронного состояния к кварк-глюонному. Точка на фазовой диаграмме, в которой происходит фазовый переход первого порядка, называется критической конечной точкой (СЕР). Исследование фазовой диаграммы КХД представляют интерес для тяжелоионных экспериментов, проводимых на Большом адронном коллайдере (LHC), Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) [3], NA61 SHINE SPS [4], CBM FAIR GSI [5]. Будущий эксперимент MPD (Multi-Purpose Detector) NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) в ОИЯИ, Дубна [6] также посвящен этой проблеме. Он предоставляет уникальную возможность изучать ядерную материю в экстремальных условиях — при высокой плотности барионов и температуре. В рамках эксперимента будут изучаться фазовый переход и осуществляться поиск конечной критической точки.

В физике столкновений тяжелых ионов основные наблюдаемые, как правило, представляются в виде зависимостей от глобальных параметров, характеризующих геометрию столкновений. По этой причине измерение глобальных характеристик является важнейшей задачей любого тяжелоионного эксперимента. Геометрия столкновений определяется такими параметрами как центральность, плоскость реакции, прицельный параметр и пр. [7]. Центральность столкновений предоставляет информацию о степени перекрытия

между двумя сталкивающимися ядрами. Величину, использующуюся для оценки центральности называют прицельным параметром соударения  $b$ . Прицельный параметр — расстояние между центрами двух сталкивающихся ядер. Плоскость реакции определяется как плоскость, в которой находятся вектор  $b$  и ось пучка. Плоскость реакции используется, в частности, для измерения азимутальных коллективных потоков.

Данная диссертация выполнялась в рамках будущего эксперимента MPD и посвящена определению геометрии столкновений тяжелых ионов при помощи передних адронных калориметров FHCAL. В частности, в диссертации описаны разработанные методы съема и обработки сигналов с передних калориметров, энергетическая калибровка модулей калориметра, методы определения центральности столкновений тяжелых ионов, а также методы измерения плоскости реакции.

**Целью** диссертационной работы являются разработка методов определения геометрии столкновений тяжелых ионов при помощи передних адронных калориметров FHCAL.

Данные методы включают в себя анализ сигналов и энергетическую калибровку FHCAL калориметров, разработку алгоритмов обработки пространственно-энергетических распределений в модулях калориметра, получение на их основе параметров геометрии столкновений тяжелых ионов и разработку программных пакетов, реализующих данные методы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методы считывания и анализа сигналов с передних адронных калориметров, которые должны включать в себя анализ формы сигналов, определение их амплитудных характеристик.
2. Разработать метод энергетической калибровки адронных калориметров с помощью космических мюонов с различной геометрией треков.
3. Выбрать Монте-Карло модели тяжелоионных столкновений с фрагментацией. Провести их верификацию на существующих экспериментальных данных для использования в моделировании будущего эксперимента MPD.
4. Разработать методы определения центральности и ориентации плоскости реакции столкновений, опирающиеся на энерговыделение в передних адронных калориметрах. Для выполнения этой задачи необходимо найти наилучшие наблюдаемые для определения центральности, разработать метод анализа пространственного распределения энергии в калориметре, разработать подходы для выделения классов центральности событий.
5. Разработать метод определения центральности по выделенной в калориметре энергии в сочетании с множественностью треков в время-проекционной камере MPD. Провести сравнение различных подходов к определению центральности.

## Научная новизна:

1. Были разработаны и впервые применены методы считывания и анализа сигналов с модулей переднего адронного калориметра. Разработанные методы включают в себя анализ формы сигналов, определение их амплитудных характеристик. Был разработан критерий сепарации полезных сигналов от когерентных шумов, он заключается в анализе формы сигнала в заданном окне и оценке удовлетворения формы сигнала критериям отбора.
2. Был создан новый метод энергетической калибровки модулей передних адронных калориметров с помощью космических мюонов различной геометрии. Применение подхода с космическими мюонами различной геометрии необходимо, поскольку положение калориметра в экспериментальной установке MPD зафиксировано, и получение мюонных пучков для энергетической калибровки не представляется возможным.
3. Были разработаны оригинальные методы определения геометрии столкновений тяжелых ионов с использованием пространственно-энергетических распределений в передних адронных калориметрах. Метод включает в себя получение уникальных наблюдаемых для построения корреляций, которые используются для оценки классов центральности столкновений тяжелых ионов. Также в методе реализованы новые подходы к выделению классов центральности из данных корреляций.
4. Была проведена верификация некоторых фрагментационных Монте-Карло моделей на экспериментальных данных и впервые дана оценка применимости этих моделей к моделированию отклика адронного калориметра в эксперименте MPD/NICA.
5. Был разработан новый комбинированный метод определения центральности, основанный на трехмерной корреляции наблюдаемых из передних адронных калориметров и время-проекционной камеры. Данный метод обеспечивает значительное улучшение точности определения центральности столкновений для центральных и полужентральных событий.
6. Были разработаны оригинальные программные пакеты, реализующие указанные методы.

**Практическая значимость.** Работа имеет важное практическое значение, так как в ее рамках были разработаны инструменты для обработки сигналов с передних адронных калориметров и методы энергетической калибровки этих калориметров. Были разработаны оригинальные методы определения центральности и ориентации плоскости реакции с использованием передних адронных калориметров. Была осуществлена реализация этих методов в виде программных пакетов на языке C++, которые на данный момент применяются в коллаборации

MPD/NICA. Данная работа существенно способствует использованию адронного калориметра для выполнения физических задач в будущем эксперименте MPD.

**Методология и методы исследования.** Разработанные методы предоставляют ряд решений в анализе данных с передних адронных калориметров. При их разработке были использованы аналитические и численные методы исследования. Программное изложение разработанных методов реализовано на языке C++. Демонстрация результатов разработанных методов определения центральности в работе осуществлена посредством компьютерного моделирования и расчета ядро-ядерных столкновений в различных фрагментационных моделях.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработаны и впервые применены методы считывания и анализа сигналов с передних адронных калориметров эксперимента MPD/NICA. Разработанные методы включают в себя анализ формы сигналов и определение их амплитудных характеристик. Реализован критерий сепарации полезных сигналов от когерентных шумов, обеспечивающий качественную фильтрацию электронных шумов и помех.
2. Разработаны методы энергетической калибровки модулей передних адронных калориметров с помощью космических мюонов с различной геометрией треков. Использование подхода с космическими мюонами для передних адронных калориметров в эксперименте MPD/NICA необходимо из-за фиксации калориметра в рабочем положении и отсутствия мюонных пучков на ускорительном комплексе.
3. Разработаны методы определения центральности передними адронными калориметрами в эксперименте MPD/NICA. Методы используют пространственно-энергетические распределения в передних адронных калориметрах. В рамках методов конструируются уникальные экспериментальные наблюдаемые, которые используются для оценки центральности события. Эти наблюдаемые применяются для получения двумерных и трехмерных корреляций, которые используются для определения классов центральности. Для выделения классов центральности из полученных корреляций разработаны специальные подходы.
4. Разработаны методы измерения ориентации плоскости реакции (плоскости событий) по распределению энергии спектаторов в модулях передних адронных калориметров эксперимента MPD/NICA. Одновременная регистрация протонов- и нейтронов-спектаторов, регистрация спектаторов обоих сталкивающихся ядер и высокая поперечная сегментация калориметров обеспечивают получение уникально-высокой точности восстановления угла плоскости событий около  $20^\circ$ .
5. Созданы программные пакеты на языке C++, реализующие методы определения геометрии столкновений тяжелых ионов в эксперименте MPD/NICA.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата; экспериментальной проверкой предложенных методов на ряде задач и реальных наборах данных с экспериментов; описаниями методов и результатов, допускающими их воспроизводимость; публикациями в журналах и трудах конференций по тематике исследования.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях:

1. Volkov V. — Approaches in centrality measurements of heavy ion collisions with forward calorimeters at MPD/NICA facility — ICPPA2020 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics — (2020) — <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/contributions/2329/>
2. Volkov V. et al. — Physics with spectators in MPD/NICA experiment — NUCLEUS – 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies — (2020) — <https://indico.cern.ch/event/839985/contributions/3983595/>
3. Volkov V. — Centrality and spectators properties measurements with hadron calorimeter in MPD/NICA experiment — The XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020) — (2020) — <https://indico.jinr.ru/event/1119/contributions/10690/>
4. Volkov V. et al. — Forward hadron calorimeter (FHCAL) at MPD NICA — TIPP2021 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics — (2021) — <https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295382/>
5. Volkov V. — Centrality determination in MPD at NICA: Application of hadron calorimeters — International workshop “Analysis techniques for centrality determination and flow measurements at FAIR and NICA” — (2020) — <http://indico.oris.mephi.ru/event/181/session/0/contribution/18>
6. Волков В. — Определение плоскости реакции столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в эксперименте MPD NICA — 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ — (2021)
7. Волков В. — Определение центральности столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в эксперименте MPD на ускорительном комплексе NICA — 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ — (2020)
8. Волков В. — Определение центральности в эксперименте MPD на ускорительном комплексе NICA — Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020» — (2020) — <https://lomonosov-msu.ru/rus/event/schedule/781?date=2020-11-18#7018>

9. Volkov V. — Development of procedure for MPD FHCAL centrality determination — CREMLINplus WP2 kick-off meeting — (2020) — <https://indico.gsi.de/event/10807/contributions/45444/>

Результаты работы также были представлены на ряде международных совещаний коллаборации MPD/NICA.

**Личный вклад.** Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, из которых 6 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований высокоэнергетических столкновений тяжелых ионов, в результате которых может образовываться чрезвычайно горячая и плотная материя. Приводится фазовая диаграмма КХД, которая описывает состояния вещества при различных значениях температуры и барионного химического потенциала. Описываются различные области этой диаграммы, включая представляющую особый интерес область КГП, фазовые переходы и критические точки. Объясняется, какую область фазовой диаграммы будет изучать эксперимент MPD/NICA. Рассказывается об особенностях этого эксперимента. Дается обзор научной литературы, обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Формулируются цели исследования, ставятся основные задачи, необходимые для выполнения цели, излагаются научная новизна и практическая значимость определения геометрии столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в эксперименте MPD/NICA.

**Первая глава** посвящена методам определения геометрии столкновений тяжелых ионов. Вводятся глобальные характеристики столкновений тяжелых ионов, в частности, понятия центральности, прицельного параметра, плоскости реакции, частиц-участников (партиципантов) и частиц-спектаторов. Приводятся их основные характеристики и способы измерения в экспериментах. Дается описание модели Глаубера, ее основные предположения и формальное математическое изложение. Указывается на различия между оптическим и Монте-Карло подходами этой модели. Показана ее важная роль в современных исследованиях центральности столкновений тяжелых ионов. Дается обзор ряда действующих экспериментов, направленных на изучение фазовой диаграммы КХД, а также применяемых в этих экспериментах методов определения геометрии столкновений тяжелых ионов, особенно центральности. Описаны эксперименты на LHC — ALICE, ATLAS, LHCb, на RHIC — PHENIX, STAR, а также HADES (GSI) и NA61 (CERN). Для каждого из этих экспериментов кратко описаны детекторные системы, использующиеся для определения центральности, и наблюдаемые, которые можно получить при помощи этих детекторов. Рассмотрены методы

определения центральности в каждом эксперименте с использованием данных наблюдаемых. В последнем разделе главы дан краткий обзор преимуществ и недостатков перечисленных методов.

В качестве определения центральности чаще всего принимается перцентиль от полного сечения ядерного взаимодействия. Большая часть из рассмотренных экспериментов (ALICE, STAR, ATLAS, LHCb, NA61) для определения классов центральности в столкновениях тяжелых ионов использует Монте-Карло модель Глаубера [8], опираясь на наблюдаемые разных типов, главным образом множественность рожденных частиц [9–13]. Эта модель широко распространена в силу простоты ее предположений и универсальности, что дает возможность использовать ее для сравнения результатов различных экспериментов. Монте-Карло модель Глаубера определяет число частиц-участников и столкновений, обозначаемых  $N_{part}$  и  $N_{coll}$  соответственно, соответствующих заданному  $b$ . Широко используется двухкомпонентная модель Глаубера [14] с параметром  $f$ , который отражает доли жестких и мягких процессов в ядро-ядерных столкновениях. Вводится понятие анцесторов — независимо распадающихся частиц-предшественников. Их число параметризуется как:

$$N_{ancestors} = fN_{part} + (1 - f)N_{coll}.$$

Число частиц, рожденных в одном столкновении, возможно получить применяя отрицательное биномиальное распределение (NBD) [15]:

$$P_{\mu,k}(n) = \frac{\Gamma(n+k)}{\Gamma(n+1)\Gamma(k)} \cdot \frac{(\mu/k)^n}{(\mu/k+1)^{n+k}}.$$

Данное выражение оценивает вероятность измерения  $n$  отсчетов на анcestor, где  $\mu$  — средняя множественность на анcestor, а  $k$  определяет ширину распределения. Для каждого события NBD разыгрывается  $N_{ancestors}$  раз, чтобы получить усредненную величину исследуемой наблюдаемой. Полученное распределение сравнивается с экспериментальным. После этого становится возможным разделять события по классам центральности в соответствии с полученными характеристиками распределения.

Некоторые эксперименты (ALICE, PHENIX, NA61) используют величину энерговыделения или суммарного заряда, зарегистрированную в калориметрах [9; 16; 17]. Эти наблюдаемые используются как сами по себе (NA61), так и совместно с другими наблюдаемыми (ALICE, PHENIX) для построения корреляций, дающих возможность определить классы центральности. В главе рассмотрены подходы к определению центральности из некоторых таких корреляций. Особое внимание к этой теме объясняется схожестью проблем в описанных экспериментах с интересующим нас экспериментом MPD/NICA.

**Вторая глава** посвящена описанию эксперимента MPD/NICA, его физической программе и детекторным системам. Представлена общая схема эксперимента, дано развернутое описание всех подсистем, которые будут работать на

первом этапе исследований. Особое внимание уделено роли передних адронных калориметров.

MPD — основной детектор для исследований в области КХД в ускорительном комплексе NICA. Он продолжит исследовательские программы в этой области физики вслед за суперсинхротроном SPS в ЦЕРН и экспериментами на RHIC и LHC [18]. Одной из основных задач эксперимента будет исследование фазы деконфайнмента (КГП). Среди основных интересов MPD можно отметить поиск критической точки, в которой осуществляется переход первого порядка от адронной материи к КГП, изучение уравнения состояния ядерной материи (EOS) в области высоких плотностей барионной материи, восстановление хиральной симметрии и улучшение понимания процессов образования нейтронных звезд [6].

Детектор MPD представляет собой  $4\pi$  спектрометр, который может детектировать заряженные адроны, электроны и фотоны в столкновениях тяжелых ионов в энергетическом диапазоне от 4 до 11 ГэВ. Общий вид детекторных систем в эксперименте показан на рис. 1. Базовым компонентом детекторной системы является сверхпроводящий соленоидный магнит, который должен обеспечить однородное, направленное вдоль оси пучка магнитное поле величиной до 0.5 Тл. Основным трековым детектором эксперимента являются время-проекционная камера TPC, отвечающая за точные измерения импульсов частиц, а также за их идентификацию. Времяпролетный детектор TOF также отвечает за идентификацию частиц совместно с время-проекционной камерой. Электромагнитный калориметр ECal регистрирует электромагнитные ливни от фотонов и электронов. В области передних быстрот расположен быстрый передний детектор FFD, который будет использоваться как триггер. Передние адронные калориметры FHCAL, расположенные внутри полюсов сверхпроводящего соленоида должны обеспечить определение геометрии столкновений (центральность и плоскость реакции) путем измерения энергии спектаторов. Кроме того, они могут быть использованы в качестве триггера. Высокая точность измерения геометрии столкновений является базовым требованием для значительной части физических задач, стоящих перед экспериментом MPD, что предъявляет высокие требования к калориметрам. FHCAL состоит из двух одинаковых калориметров, расположенных симметрично относительно точки взаимодействия. Это компенсированный калориметр, состоящий из 44 модулей со структурой свинец/сцинтиллятор. Высокая поперечная сегментация обеспечивает достаточное пространственное разрешение для решения поставленных задач.

**Третья глава** посвящена параметрам и энергетической калибровке передних адронных калориметров. В ней детально рассмотрено устройство калориметров, описано считывание сигналов с модулей. Описаны физические процессы, связанные с распространением адронных ливней в калориметре. Большое внимание уделено принципам компенсации и компенсационному соотношению для адронных калориметров. Отдельный раздел посвящен

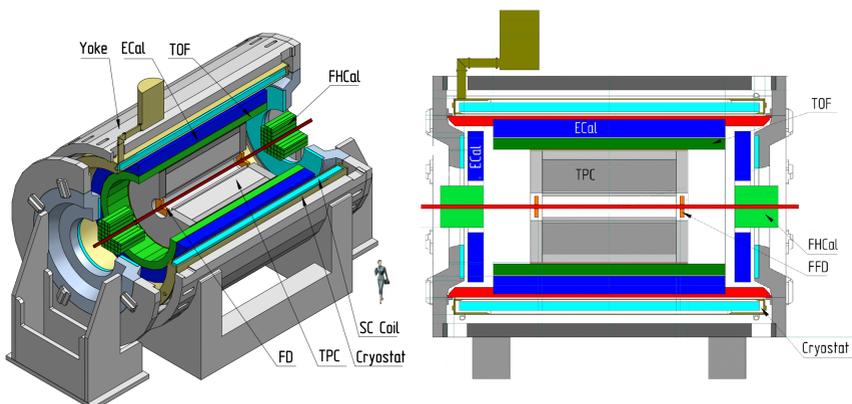


Рис. 1 — Слева — общий вид детектора MPD на первом этапе эксперимента. Справа — поперечная схема MPD.

энергетическому разрешению FHCAL. В главе описана созданная в ИЯИ РАН экспериментальная установка для регистрации космических мюонов. Она используется для разработки методов энергетической калибровки модулей передних адронных калориметров с помощью космических мюонов, имеющих различную геометрию треков. Представлен разработанный автором метод обработки сигналов с передней электроники, установленной на модулях калориметра.

Калориметры FHCAL созданы для измерения пространственно-энергетических распределений спектров. Используя эти распределения возможно измерение центральности столкновений и ориентации плоскости реакции. Калориметры должны обладать хорошим энергетическим разрешением, иметь высокую поперечную сегментацию, а также иметь продольную сегментацию и достаточную длину, чтобы компенсировать неоднородность светосбора и уменьшить влияние утечек ливня. Диапазон энергий, в котором FHCAL должен регистрировать спектры составляет 1 – 6 ГэВ. Выполнение этих условий обеспечивает точность определения центральности до 10% в области полусредних событий, и угловое разрешение плоскости реакции до 20°.

FHCAL состоит из двух идентичных адронных калориметров, расположенных на расстоянии 3.2 метра от точки взаимодействия. Каждый из калориметров состоит из 44 модулей, которые состоят из 42 слоев свинец/сцинтиллятор, образующих 7 продольных секций с индивидуальным считыванием сигналов. В центре каждого калориметра находится отверстие для размещения пучковой трубы. Поперечный размер модуля составляет 15 × 15 см<sup>2</sup>. Передача света со сцинтилляционных пластин осуществляется спектросмещающими (WLS) волокнами, обеспечивающими высокую эффективность и однородность светосбора. Считывание света с волокон производится кремниевыми фотоумножителями (SiPM).

Фотодетекторы расположены на печатной плате передней электроники, установленной на задней части каждого модуля. Напряжение на SiPM корректируется в соответствии с температурой окружающей среды.

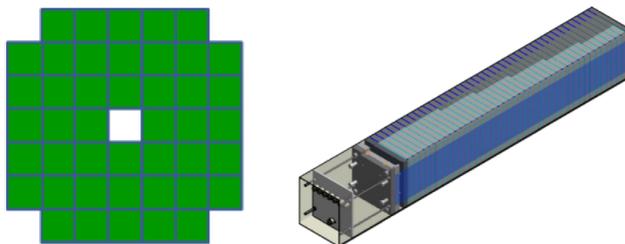


Рис. 2 — Слева — поперечный профиль FHCAL с модульной структурой. Справа — продольная структура отдельного модуля.

Для компенсации отклика калориметра на электромагнитную и адронную компоненты адронного ливня [19] соотношение толщин слоев свинец/сцинтиллятор в калориметре составляет 4:1 (16 мм и 4 мм соответственно).

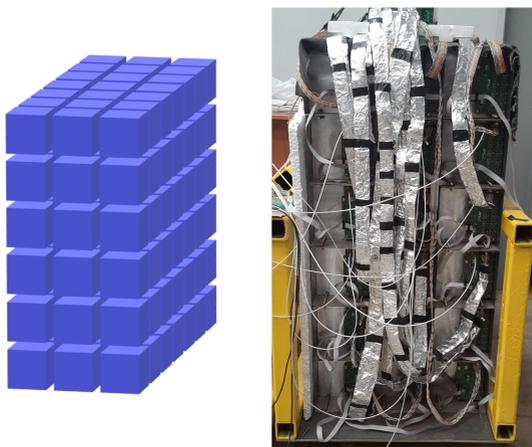


Рис. 3 — Слева — схематическое изображение конфигурации модулей для тестового набора калибровочных космических мюонов. Справа — фотография тестовой установки с передней электроникой.

Энергетическая калибровка калориметра возможна только при использовании процесса, с заранее известным энерговыделением в секциях модулей FHCAL.

Поскольку в эксперименте MPD отсутствует возможность сканирования модулей пучком с фиксированной энергией, то для калибровки модулей используются космические мюоны с различной геометрией треков. Исследования с мюонными пучками [20] показали, что спектр мюонов, входящих в калориметр горизонтально, имеет ярко выраженный пик, который соответствует энергии около 5 МэВ.

На рис. 3 представлена экспериментальная установка в ИЯИ РАН, состоящая из 18 модулей. Она является прототипом будущего детектора и использовалась для разработки методов энергетической калибровки. Отметим, что модули, передняя аналоговая электроника и считывающая электроника такие же, как и в реальном эксперименте MPD.

Считывающая электроника на основе АЦП платы ADC64 позволяет оцифровывать форму сигнала во временном окне до 30 мкс. Пример типичной формы сигнала приведен на рис. 4. Процедура обработки сигналов с передней электроники состоит из нескольких этапов. На первом этапе определяется максимальная величина сигнала в заданном временном окне. На втором этапе измеряется базовый уровень сигнала во временном диапазоне до границы окна поиска сигнала, поскольку этот уровень после сигнала может быть искажен послеимпульсами. Разность базового уровня и максимального числа отсчетов в окне принимается за амплитуду сигнала и записывается в распределение, соответствующее номеру секции, в которой было получено.

Часть сигналов имеет когерентные электронные шумы (наводки). Для отбора полезных сигналов была разработана процедура анализа формы сигнала в заданном окне, оценивающая количество перемен знака сигналом и отбрасывающая сигналы, которые не удовлетворяют заданным условиям отбора.

После обработки всех сигналов в наборе становится возможным провести процедуру калибровки по полученным амплитудным распределениям в каждой секции модулей калориметра. Получение коэффициентов для выравнивания пиков амплитудных спектров производится путем аппроксимации амплитудного распределения, его средняя величина используется для вычисления коэффициента перехода от отсчетов ADC к энергии в МэВ.

В отличие от пучка, космические мюоны имеют широкий диапазон углов входа в калориметр, длина их треков в сцинтилляторах сильно зависит от геометрии прохождения. Поскольку космические мюоны выделяют в сцинтилляторах различную энергию в зависимости от длины трека, то были выбраны два типа мюонных треков — горизонтальные и наклонные. Наиболее простыми для анализа являются события с горизонтальными треками, в нашем случае отбирались только такие события, где мюон пересекал не менее 5 секций одного модуля. Пример амплитудного спектра энерговыделений от горизонтальных мюонов в одной секции представлен на рис. 5.

В случае наклонных треков использовались мюоны, которые пересекали одну колонну модулей в вертикальной плоскости. При этом требовалось, чтобы срабатывали только находящиеся на одной прямой соседние секции в разных модулях. Использование наклонных треков мюонов позволяет получить статистику

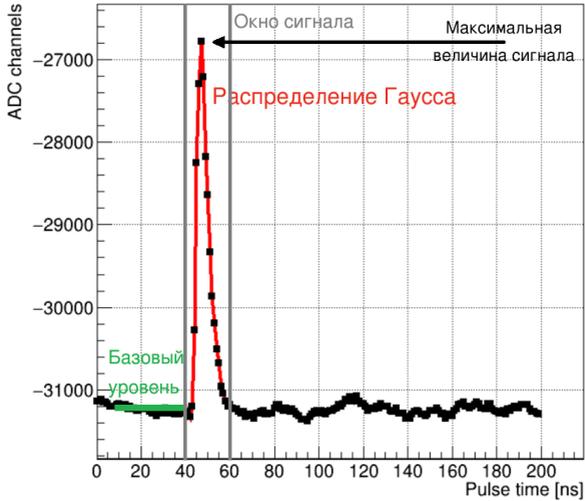


Рис. 4 — Типичная форма сигнала и шума от космического мюона в одной секции модуля калориметра. Зеленая линия отражает аппроксимированный базовый уровень сигнала. Красным показана аппроксимация сигнала распределением Гаусса.

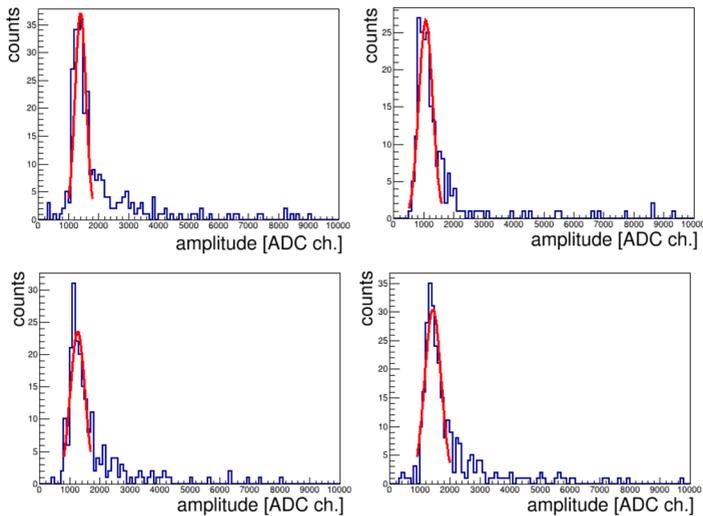


Рис. 5 — Амплитудные спектры от космических мюонов в продольных секциях одного модуля (горизонтальные мюоны), аппроксимированный распределением Гаусса.

событий на два порядка больше за единицу времени. Пример амплитудного спектра энергосвыделений от наклонных мюонов в некоторых секциях модулей FHCAL представлен на рис. 6.

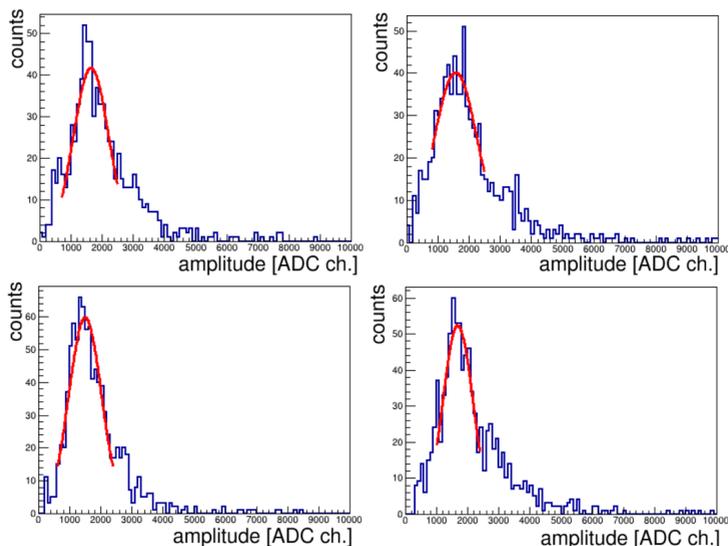


Рис. 6 — Амплитудный спектр наклонных космических мюонов в одной секции модуля FHCAL, аппроксимированный распределением Гаусса.

Поскольку в таком случае мюоны имеют неопределенные величины длины треков в сцинтиляторах, то для абсолютной энергетической калибровки с их помощью необходимо найти положение пиков амплитудных распределений в этой же секции для горизонтальных и наклонных мюонов в распределениях по сырым данным. После чего, при помощи отношения средних значений пиков горизонтальных и наклонных мюонов, отклики секций могут быть выравнены, чтобы соответствовать энергии 5 МэВ.

Оба метода имеют недостатки. Первый метод требует длительного набора данных, но дает узкие спектры. Второй метод дает более размытые спектры, но работает значительно быстрее и может быть использован для мониторинга каналов считывания.

**Четвертая глава** посвящена определению центральности столкновений тяжелых ионов при помощи передних адронных калориметров. В ней объясняется выбор оптимальной фрагментационной модели, основывающийся на сравнении модельных данных с экспериментальными. Приводятся три подхода к определению центральности при помощи пространственно-энергетических распределений в FHCAL. Делается сравнение результатов определения центральности по наблюдаемым из FHCAL и TPC. Описывается метод комбинирования

наблюдаемых из FHCAL и TPC для определения центральности. В конце главы уделяется внимание различным деталям описанных процедур, а также показывается способ их программной реализации.

Центральность столкновений в эксперименте MPD может быть определена или путем использования информации о числе треков в TPC, или путем измерения энергии, выделяемой спектаторами в FHCAL. В общем случае, множественность рожденных частиц и число спектаторов (и их суммарная энергия) монотонно зависят от прицельного параметра [21—23]. В случае FHCAL монотонная зависимость энерговыделения в калориметре от прицельного параметра не может быть получена, поскольку в центре калориметра находится пучковое отверстие, куда улетает значительная доля тяжелых фрагментов. В результате одной величине энерговыделения могут соответствовать как периферические, так и центральные события (рис. 7).

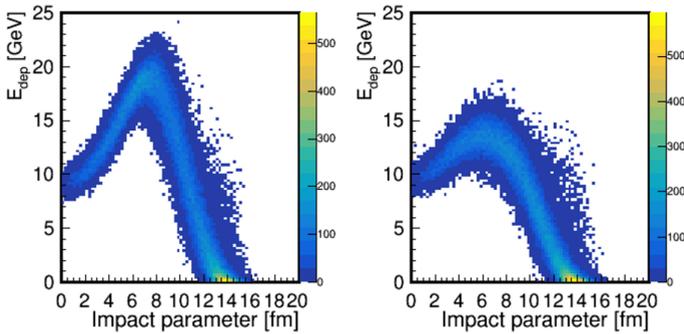


Рис. 7 — Зависимость энерговыделения в FHCAL от прицельного параметра для моделей LAQSM (слева) и DCM-SMM (справа).

Чтобы разрешить эту неоднозначность автором был разработан ряд оригинальных методов, которые были опробованы на данных из моделей DCM-SMM [24] и LAQSM [25] для реакции Au-Au с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ. Каждый метод работает с пространственным распределением энергии по поверхности калориметра, но опирается на уникальные наблюдаемые.

Первый метод использует корреляции продольной и поперечной компонент энерговыделения в калориметре:

$$E_T = \sum E_i \sin \theta_i, E_L = \sum E_i \cos \theta_i,$$

где  $E_i$  и  $\theta_i$  — энерговыделение и полярный угол  $i$ -го модуля FHCAL относительно центральной оси калориметра (совпадает с осью пучка). Полученные корреляции поперечной и продольной компонент энергии были аппроксимированы

кривой второго порядка и разделены на классы центральности перпендикулярами к кривой таким образом, что в каждом классе содержится около 10% от общего числа событий. Распределения прицельных параметров для каждого такого класса были затем аппроксимированы распределением Гаусса. Разрешение прицельного параметра для самых центральных событий составляет около 40%, отражая физические флуктуации числа зрителей в центральных столкновениях для одного и того же значения  $b$ . Разрешение же для полужентральных и периферических событий составляет менее 10% для модели LAQGSM и значительно хуже в случае модели DCM–SMM вследствие худшего разделения центральных и периферических событий для этой модели.

Второй метод опирается на двумерную линейную аппроксимацию пространственно-энергетического распределения в модулях FHCAL. Метод использует двумерное распределение энергии в модулях FHCAL и аппроксимирует его симметричным конусом, заданным уравнением  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$ . Распределение энергий по модулям FHCAL показано на рис. 8 (а) для одного смоделированного события. Эта аппроксимация дает три дополнительных наблюдаемых, которые являются геометрическими характеристиками полученного конуса, — высота, радиус и объем. Высота соответствует максимальной энергии в калориметре  $E_{max}$  и оценке энергии, которая не была зарегистрирована в калориметре ввиду пучкового отверстия. Радиус конуса отражает угол разлета свободных зрителей. Объем же является еще одной оценкой общей энергии частиц-зрителей. На рис. 8 (b) показан результат аппроксимации конусом.

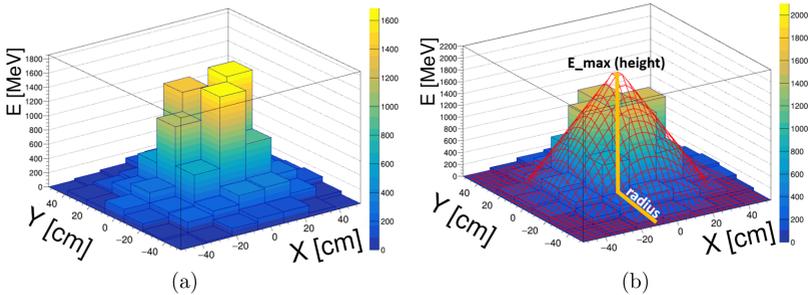


Рис. 8 — (а) Распределение энергии в модулях калориметра FHCAL для одного события смоделированного в DCM–SMM модели. (b) Двумерная линейная аппроксимация энерговыделения в FHCAL для того же самого события.

Корреляция полной выделенной энергии в калориметре  $E_{dep}$  с максимальной энергией  $E_{max}$  была выбрана в качестве основной для определения центральности. Процедура разделения данной зависимости на классы аналогична описанной в первом методе. Используется построение перпендикуляров к кривой второго порядка, описывающей распределение. Результаты, полученные

в такой процедуре для Au-Au столкновений при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 11$  ГэВ представлены на рис. 9.

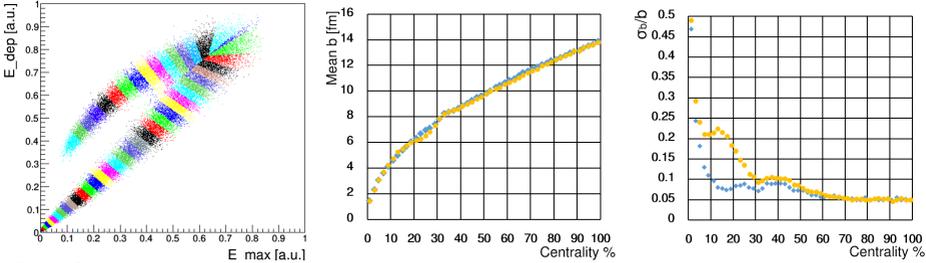


Рис. 9 — (а) — корреляция между максимальной энергией и полным энерговыделением для модели LAQGSМ, (b) и (с) — зависимости средних величин и ширины распределений Гаусса прицельного параметра  $b$  от центральности, определяемой 2% группами событий, для моделей LAQGSМ (синий цвет) и DCM–SMM (оранжевый цвет) соответственно.

Было проведено сравнение данного метода определения центральности с методом, основанным на множественности треков в TPC. Показано, что оба подхода практически эквивалентны как инструменты определения центральности. Также было установлено, что при оценке центральности различными детекторами в один и тот же класс центральности (0–X%) могут попадать разные события. Различные эксперименты и детекторы оперируют уникальными наблюдаемыми для определения центральности, что приводит к сложностям в сравнении величин центральности между ними. Наиболее распространенная практика заключается в сведении результатов работы этих методов к универсальной величине  $N_{part}$ , получаемой из модели Глаубера [26]. Другим способом получения числа участников является его извлечение из Монте-Карло моделей. Были проведены сравнения обоими способами, в результате этого исследования сделано заключение, что для корректного сравнения требуется разработка дополнительных подходов.

С этой целью был разработан комбинированный метод определения центральности столкновений, который включает в себя как наблюдаемые из FHCAL, так и из TPC. Для определения классов центральности была выбрана корреляция наблюдаемых  $(E_{dep}, E_{max}, n_{tracks})$ . Для получения кривой, которая бы описывала данное трехмерное распределение, были совмещены кривая второго порядка, описанная ранее для корреляции  $(E_{dep}, E_{max})$ , и полином четвертой степени, описывающий корреляцию  $(E_{dep}, n_{tracks})$ . Идея разделения трехмерной корреляции на классы, после получения описывающей данное распределение кривой, аналогична двумерным методам. Отличие заключается в том, что для разделения на классы используются плоскости, перпендикулярные кривой.

Результаты реализации трехмерной аппроксимации представлены на рис. 10. Здесь каждый класс центральности содержит 10% от общего числа события. Сравнение точности определения классов центральности этим методом с классами по множественности треков, и классами из метода двумерной аппроксимации пространственного распределения энергии в модулях FHCAL представлено на рис. 11. Классы центральности с использованием множественности были получены разделением распределения количества треков TPC на 10 частей по 10% событий в каждом классе.

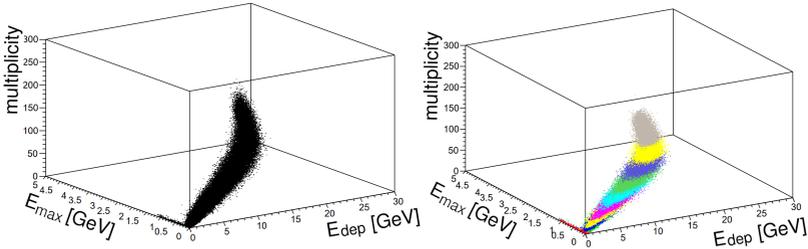


Рис. 10 — Слева — корреляция  $(E_{dep}, E_{max}, n_{tracks})$  в изначальном виде, справа — разделенная на 10% классы центральности (выделены цветом).

Отметим значительное улучшение разрешения для центральных и полуженных событий, наиболее важных с точки зрения физических процессов. Улучшение точности обеспечено добавлением множественности треков из TPC. Кроме того, прямое использование множественности треков в данном подходе позволяет перейти к модели Глаубера и производить сравнения результатов определения центральности в разных детекторах и экспериментах.

**Пятая глава** рассматривает методы определения плоскости реакции передними адронными калориметрами. В начале главы дается краткое обоснование важности измерения угла плоскости реакции, а также указывается на невозможность прямого измерения этой величины. Рассматривается роль плоскости реакции в исследовании азимутальной анизотропии и коллективных потоков, описывается Фурье-разложение, из которого происходят коэффициенты, соотносимые с направленным, эллиптическим и другими коллективными потоками. Дается краткий обзор метода плоскости события и его применения в экспериментах ALICE, PHENIX и STAR. Затем описывается разработанный автором метод измерения ориентации плоскости реакции и приводится два дополнительных метода в качестве сравнения.

В качестве оценки плоскости реакции в данной работе бралась плоскость, заданная направлением пучка и вектором, определяющим центр тяжести распределения спектров, регистрируемых в передних адронных калориметрах.

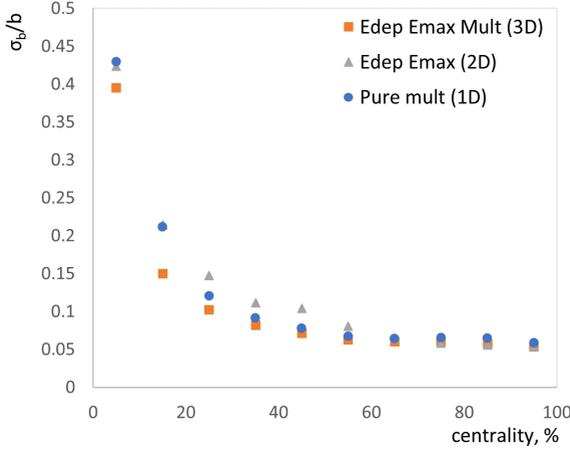


Рис. 11 — Точность определения классов центральности по прицельному параметру  $b$ , полученному из Монте-Карло расчетов с моделью фрагментации DCM–SMM. Представлены результаты для трех методов: комбинированный метод с наблюдаемыми из TPC и FHCAL (оранжевый цвет), метод двумерной аппроксимации пространственно-энергетического распределения в модулях FHCAL (серый цвет) и метод простого разделения множественности треков TPC на классы центральности (синий цвет)

Определение угла плоскости события опиралось на метод так называемого Q-вектора [27]:

$$Q = (Q_x, Q_y) \quad Q_x = \sum_i \omega_i \sin(\varphi_i) \quad Q_y = \sum_i \omega_i \cos(\varphi_i).$$

Здесь  $\varphi_i$  — азимутальный угол  $i$ -го модуля калориметра в поперечной плоскости, с координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $\omega_i$  — вес, улучшающий точность определения плоскости события. В случае FHCAL в качестве веса используется энергия, выделенная в  $i$ -ом модуле,  $\omega_i = E_i$ . Угол плоскости события в таком случае может быть рассчитан как:

$$\Psi_{EP}^{L(R)} = \arctan \left( \frac{\sum_i E_i \sin(\varphi_i)}{\sum_i E_i \cos(\varphi_i)} \right),$$

$$\sin(\varphi_i) = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad \cos(\varphi_i) = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}},$$

где  $L(R)$  обозначает левые и правые части калориметра. Результирующая величина оценки плоскости события, с учетом наличия двух симметрично расположенных относительно точки взаимодействия калориметров, определяется

формулой

$$\Psi_{EP} = \Psi_{1,EP} + (\Psi_{2,EP} + \pi).$$

Угловое разрешение в зависимости от прицельного параметра для модели LAQGSМ и реакции Au-Au при энергиях 5 ГэВ и 11 ГэВ показано на рис. 12. В качестве оценки используется разница между углом полученной плоскости и углом истинной плоскости реакции. Наилучшее разрешение составляет порядка  $20^\circ$ , что является уникально хорошим результатом. Причинами такого хорошего разрешения являются, во-первых, одновременная регистрация протонов- и нейтронов-спектаторов, во-вторых, регистрация спектаторов обоих сталкивающихся ядер, в-третьих, высокая поперечная сегментация калориметра. Наличие двух калориметров позволяет произвести независимую экспериментальную оценку точности определения плоскости события по разнице восстановленных углов плоскостей в левом и правом калориметрах, см. рис. 13 (слева).

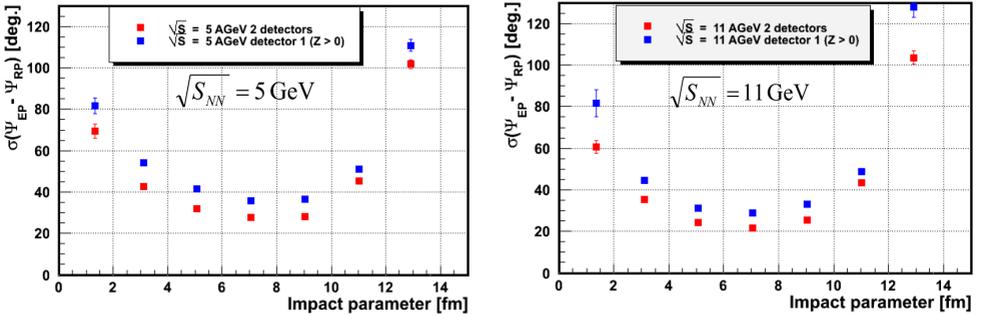


Рис. 12 — Разница между реконструированной и истинной плоскостью реакции в зависимости от прицельного параметра для энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5$  ГэВ и  $\sqrt{S_{NN}} = 11$  ГэВ, слева и справа соответственно. Синими точками отмечены расчеты с учетом одного калориметра, красными — с двумя.

С целью сравнения точности определения плоскости реакции были разработаны еще два подхода к измерению угла плоскости события. Один метод опирается на описанный метод пособытийной двумерной аппроксимации пространственно-энергетических распределений в калориметрах. Метод был модифицирован, чтобы лучше описывать асимметрию энерговыделения в калориметре. Аппроксимация двумерного распределения в таком подходе дает возможность использовать координаты вершины полученного конуса для измерения угла плоскости реакции:

$$\Psi_{EP}^{L(R)} = \arctan_2(x_{cone}, y_{cone}).$$

Веса  $\omega_i = E_i$  уже учтены во время двумерной линейной аппроксимации. После ряда тригонометрических преобразований углы, полученные независимо в двух калориметрах, могут быть усреднены, аналогично ранее описанной процедуре.

Другой метод в отношении процедуры и получения результата полностью идентичен первому. Отличие лишь в том, что в качестве координат центра распределения спектров берутся координаты “центра тяжести” энергии на поверхности калориметра:

$$x_{e.c.m}^{L(R)} = \frac{\sum_i x_i E_i}{\sum_i E_i}, \quad y_{e.c.m}^{L(R)} = \frac{\sum_i y_i E_i}{\sum_i E_i}.$$

Угловое разрешение, полученное этими методами в зависимости от прицельного параметра для моделей LAQGSM и DCM-SMM и реакции Au-Au при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 11$  ГэВ показаны на рис. 13 справа.

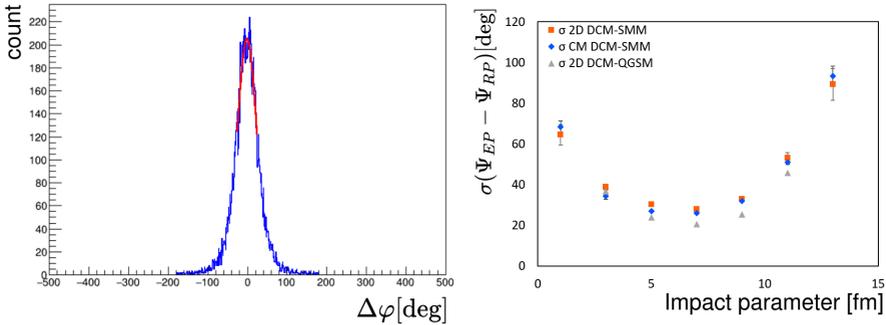


Рис. 13 — Слева — распределение угловой разницы между правым и левым калориметрами для модели DCM-SMM. Справа — зависимость разрешения плоскости события от прицельного параметра для энергии 11 ГэВ в реакции AuAu для моделей DCM-SMM, LAQGSM, и для метода центра масс.

Все три описанных метода дают сравнимые по точности определения плоскости события результаты.

В **заключении** приведены основные результаты работы. Представлены разработанные автором методы считывания и обработки цифровых сигналов с передних адронных калориметров, методы энергетической калибровки модулей FHCAL, методы определения центральности и ориентации плоскости реакции по энерговыделению в модулях калориметра. Разработаны программные пакеты, реализующие данные методы. Основные результаты диссертационной работы:

1. Были разработаны методы считывания и анализа сигналов с передних адронных калориметров FHCAL установки MPD/NICA. Эти методы включают в себя фильтрацию и подавление электронных шумов, анализ формы сигналов, определение их амплитудных характеристик, а также сепарацию полезных сигналов от когерентных шумов.

2. Разработана процедура энергетической калибровки модулей передних адронных калориметров с помощью космических мюонов с различной геометрией треков. Представлены результаты энергетической калибровки в случае горизонтальных и наклонных треков космических мюонов.
3. Разработаны несколько методов определения центральности столкновений тяжелых ионов с использованием пространственно-энергетических распределений в модулях адронных калориметров. Сконструированы экспериментальные наблюдаемые для оценки центральности событий. На их основании получены двумерные и трехмерные корреляции, которые используются для определения классов центральности. Разработаны подходы для выделения классов центральности из этих корреляций.
4. Разработаны несколько методов измерения ориентации плоскости реакции (плоскости событий) по распределению энергии спектаторов в модулях калориметра. Благодаря одновременной регистрации протонов и нейтронов-спектаторов, регистрации спектаторов обоих сталкивающихся ядер и высокой поперечной сегментации калориметров получена уникальная точность восстановления угла плоскости событий около  $20^\circ$ .
5. Для реализации описанных методов были созданы программные пакеты на языке C++. Данные пакеты интегрированы в программную среду MPDRoot и используется коллаборацией MPD/NICA .

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Approaches in centrality measurements of heavy-ion collisions with forward calorimeters at MPD/NICA facility / V. Volkov, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, N. Karpushkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. P. Teterin. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012103. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012103>.
- A2. Measurements of Spectators with Forward Hadron Calorimeter in MPD/NICA Experiment / A. Ivashkin, M. Golubeva, F. Guber, N. Karpushkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, V. Volkov // Phys. Part. Nucl. — 2021. — Т. 52, № 4. — С. 578—583. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779621040298>.
- A3. Amplitude parameters of modules for hadron calorimeter at MPD/NICA / A. Ivashkin, M. Golubeva, F. Guber, N. Karpushkin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Strizhak, V. Volkov // JINST. — 2020. — Т. 15, № 06. — С. C06044. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06044>.
- A4. Application of FHCAL for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment / V. Volkov, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, N. Karpushkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak // Particles. — 2021. — Т. 4, № 2. — С. 236—240. — URL: <https://doi.org/10.3390/particles4020022>.

- A5. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA / MPD collaboration, V. Abgaryan, ..., V. Volkov [и др.] // Eur. Phys. J. A. — 2022. — Т. 58, № 7. — С. 140. — arXiv: [2202.08970](https://arxiv.org/abs/2202.08970) [physics.ins-det]. — URL: <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6>.
- A6. Forward Detectors of the BM@N Facility and Response Study at a Carbon Ion Beam in the SRC Experiment / V. V. Volkov, M. B. Golubeva, F. F. Guber, A. A. Zubankov, A. P. Ivashkin, A. V. Izvestnyy, N. M. Karpushkin, A. I. Makhnev, S. V. Morozov, O. A. Petukhov // Instrum. Exp. Tech. — 2023. — Т. 66, № 2. — С. 218–227. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441223010232>.

## Список литературы

1. *Guenther, J. N.* An overview of the QCD phase diagram at finite  $T$  and  $\mu$  / J. N. Guenther // PoS. — 2022. — Т. LATTICE2021. — С. 013. — arXiv: [2201.02072](https://arxiv.org/abs/2201.02072) [hep-lat].
2. The QCD equation of state with dynamical quarks / S. Borsanyi [и др.] // JHEP. — 2010. — Т. 11. — С. 077. — arXiv: [1007.2580](https://arxiv.org/abs/1007.2580) [hep-lat].
3. *Niida, T.* Signatures of QGP at RHIC and the LHC / T. Niida, Y. Miake // AAPPS Bull. — 2021. — Т. 31, № 1. — С. 12. — arXiv: [2104.11406](https://arxiv.org/abs/2104.11406) [nucl-ex].
4. *Gazdzicki, M.* Overview of Results from NA61/SHINE: Uncovering Critical Structures / M. Gazdzicki, A. Rybicki // Acta Phys. Polon. B. — 2019. — Т. 50. — С. 1057–1070. — URL: <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.50.1057>.
5. QCD Phase Structure and Interactions at High Baryon Density: Continuation of BES Physics Program with CBM at FAIR / D. Almaalol [и др.]. — 2022. — Сент. — arXiv: [2209.05009](https://arxiv.org/abs/2209.05009) [nucl-ex].
6. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA / V. Abgaryan [и др.] // Eur. Phys. J. A. — 2022. — Т. 58, № 7. — С. 140. — arXiv: [2202.08970](https://arxiv.org/abs/2202.08970) [physics.ins-det].
7. *Florkowski, W.* Basic phenomenology for relativistic heavy-ion collisions / W. Florkowski // Acta Phys. Polon. B / под ред. М. Praszalowicz. — 2014. — Т. 45, № 12. — С. 2329–2354. — arXiv: [1410.7904](https://arxiv.org/abs/1410.7904) [nucl-th].
8. *Chaudhuri, A. K.* The Glauber model / A. K. Chaudhuri // A Short Course on Relativistic Heavy Ion Collisions. — IOP Publishing, 2014. — 3-1 to 3–19. — (2053-2563). — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/bk978-0-750-31060-4ch3>.
9. Centrality determination of Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with ALICE / B. Abelev [и др.] // Phys. Rev. C. — 2013. — Т. 88, № 4. — С. 044909. — arXiv: [1301.4361](https://arxiv.org/abs/1301.4361) [nucl-ex].

10. Systematic Measurements of Identified Particle Spectra in  $pp, d^+$  Au and Au+Au Collisions from STAR / B. I. Abelev [и др.] // Phys. Rev. C. — 2009. — Т. 79. — С. 034909. — arXiv: [0808.2041](https://arxiv.org/abs/0808.2041) [nucl-ex].
11. Measurement of the pseudorapidity and transverse momentum dependence of the elliptic flow of charged particles in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad [и др.] // Phys. Lett. B. — 2012. — Т. 707. — С. 330–348. — arXiv: [1108.6018](https://arxiv.org/abs/1108.6018) [hep-ex].
12. Centrality determination in heavy-ion collisions with the LHCb detector / R. Aaij [и др.] // JINST. — 2022. — Т. 17, № 05. — P05009. — arXiv: [2111.01607](https://arxiv.org/abs/2111.01607) [nucl-ex].
13. Centrality determination of Au + Au collisions at 1.23A GeV with HADES / J. Adamczewski-Musch [и др.] // Eur. Phys. J. A. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 85. — arXiv: [1712.07993](https://arxiv.org/abs/1712.07993) [nucl-ex].
14. *Kharzeev, D.* Hadron production in nuclear collisions at RHIC and high density QCD / D. Kharzeev, M. Nardi // Phys. Lett. B. — 2001. — Т. 507. — С. 121–128. — arXiv: [nuc1-th/0012025](https://arxiv.org/abs/nuc1-th/0012025).
15. Model dependence of the number of participant nucleons and observable consequences in heavy-ion collisions / M. Omana Kuttan [и др.]. — 2023. — Март. — arXiv: [2303.07919](https://arxiv.org/abs/2303.07919) [hep-ph].
16. Transverse energy production and charged-particle multiplicity at midrapidity in various systems from  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  to 200 GeV / A. Adare [и др.] // Phys. Rev. C. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 024901. — arXiv: [1509.06727](https://arxiv.org/abs/1509.06727) [nucl-ex].
17. Spectra and mean multiplicities of  $\pi^-$  in central $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  collisions at 13A, 19A, 30A, 40A, 75A and 150A Ge V/c beam momenta measured by the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS / A. Acharya [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Т. 81, № 5. — С. 397. — arXiv: [2101.08494](https://arxiv.org/abs/2101.08494) [hep-ex].
18. *Senger, P.* Heavy-Ion Collisions at FAIR-NICA Energies / P. Senger // Particles. — 2021. — Т. 4, № 2. — С. 214–226. — URL: <https://doi.org/10.3390/particles4020020>.
19. A systematic measurement of energy resolution and e/pi ratio of a lead/plastic-scintillator sampling calorimeter / T. Suzuki [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1999. — Т. 432. — С. 48–65. — URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00394-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00394-0).
20. Compact segmented hadron calorimeter for detection of low energy spectators at MPD/NICA facility / A. Ivashkin [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A / под ред. М. Krammer [и др.]. — 2020. — Т. 958. — С. 162240. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.081>.
21. *Broniowski, W.* Geometric relation between centrality and the impact parameter in relativistic heavy ion collisions / W. Broniowski, W. Florkowski // Phys. Rev. C. — 2002. — Т. 65. — С. 024905. — arXiv: [nuc1-th/0110020](https://arxiv.org/abs/nuc1-th/0110020).

22. *Svetlichnyi, A.* Using Spectator Matter for Centrality Determination in Nucleus-Nucleus Collisions / A. Svetlichnyi, R. Nepeyvoda, I. Pshenichnov // *Particles*. — 2021. — Т. 4, № 2. — С. 227–235. — URL: <https://doi.org/10.3390/particles4020021>.
23. *Segal, I.* Centrality Determination in Heavy-Ion Collisions Based on Monte-Carlo Sampling of Spectator Fragments / I. Segal // *Particles*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 568–579. — URL: <https://doi.org/10.3390/particles6020032>.
24. Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM / M. Baznat [и др.] // *Phys. Part. Nucl. Lett.* — 2020. — Т. 17, № 3. — С. 303–324. — arXiv: [1912.09277](https://arxiv.org/abs/1912.09277) [[nucl-th](#)].
25. CEM03.03 and LAQGSM03.03 Event Generators for the MCNP6, MCNPX, and MARS15 Transport Codes / S. G. Mashnik [и др.] // — 05.2008. — arXiv: [0805.0751](https://arxiv.org/abs/0805.0751) [[nucl-th](#)].
26. Glauber modeling in high energy nuclear collisions / M. L. Miller [и др.] // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 2007. — Т. 57. — С. 205–243. — arXiv: [nucl-ex/0701025](https://arxiv.org/abs/nuclex/0701025).
27. *Poskanzer, A. M.* Methods for analyzing anisotropic flow in relativistic nuclear collisions / A. M. Poskanzer, S. A. Voloshin // *Phys. Rev. C*. — 1998. — Т. 58. — С. 1671–1678. — arXiv: [nucl-ex/9805001](https://arxiv.org/abs/nuclex/9805001).

Научное издание  
Волков Вадим Вячеславович  
Определение геометрии столкновений тяжелых ионов  
передними адронными калориметрами  
в эксперименте MPD/NICA

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,3 Зак. № 22529 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Издательский отдел  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а