

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физического института
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
д.ф.-м.н., профессор Рябов В.А.

« 12 » декабря 2023 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Волкова Вадима Вячеславовича «**Определение геометрии столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в эксперименте MPD/NICA**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы диссертации.

Релятивистские столкновения тяжелых ионов являются актуальной темой ядерной физики, поскольку в таких реакциях на короткое время образуется 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, включая разнообразные фазовые переходы, которые невозможно изучить с помощью традиционных лабораторных методов.

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 тяжело-ионного эксперимента, включая подготавливаемый эксперимент класса Мега-Сайенс MPD/NICA, в том числе в рамках рассматриваемой диссертационной работы. Геометрия столкновений определяется такими параметрами как центральность, плоскость реакции, прицельный параметр и пр. Центральность столкновений предоставляет информацию о степени перекрытия между двумя сталкивающимися ядрами. Величиной, используемой для оценки центральности, является прицельный параметр b – поперечное 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.

Диссертация посвящена экспериментальному определению геометрии столкновений тяжелых ионов при помощи передних адронных калориметров (FHCAL) в эксперименте MPD/NICA. Эти детекторы играют ключевую роль в задачах определения центральности столкновений и измерении ориентации плоскости реакции. Решение этих задач позволяет получить важнейшую базовую информацию о характеристиках столкновений тяжелых

ионов. Целью исследования является разработка методов для обеспечения работы передних калориметров в будущем эксперименте. Для достижения этой цели решен ряд важных методических задач, в частности, разработаны методы съема и обработки сигналов с модулей передних калориметров, метод энергетической калибровки модулей калориметра, представлен ряд методов для определения центральности столкновений, опирающийся на пространственное распределение энергии в калориметрах, а также методы измерения ориентации плоскости реакции. Указанные методы также сопровождаются их реализацией в виде программных пакетов на языке C++.

Учитывая большое внимание к изучению свойств сильновзаимодействующей ядерной материи в условиях высокой плотности барионов и температуре, интерес к изучению фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (КХД) и поиску критической точки на ней, а также важность определения глобальных геометрических характеристик столкновений, таких как центральность и ориентация плоскости реакции, представленную диссертационная работа безусловно следует признать актуальным исследованием.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 144 страницы, включая 79 рисунков и 1 таблицу. Библиография содержит 164 наименования.

Во Введении обосновывается актуальность исследований высокоэнергетических столкновений тяжелых ионов, в результате которых может образовываться чрезвычайно горячая и плотная материя. Дано описание фазовой диаграммы КХД и информация о целях эксперимента MPD в этом контексте. Кратко описываются особенности эксперимента MPD. Дается обзор научной литературы, указываются цели исследования и задачи, решение которых необходимо для достижения цели. Показывается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

Первая глава рассматривает методы определения геометрии столкновений тяжелых ионов, в частности, центральности. Вводятся основные понятия, такие как центральность, плоскость реакции, прицельный параметр и др. Дается описание модели Глаубера и двух ее вариантов (оптический и Монте-Карло). Приведен развернутый обзор ряда существующих экспериментов. В обзоре основное внимание уделено детекторам, ответственным за определение геометрии столкновений, и методам определения центральности при помощи этих детекторов. В завершении главы рассмотрены преимущества и недостатки описанных подходов.

Вторая глава развернуто описывает эксперимент MPD/NICA, рассматривается его физическая программа и детекторные системы. Каждая система рассмотрена по отдельности с описанием задач, стоящих перед каждой из них. Среди всех детекторов особенно выделены передние адронные калориметры, поскольку работа с ними является темой диссертационной работы.

Третья глава посвящена энергетической калибровке передних адронных калориметров и их параметрам. Дано детальное описание устройства калориметров, дан обзор адронных ливней, развивающихся в них, описаны принципы компенсации. В главе описаны разработанные автором методы обработки сигналов с передней электроники, а также методы энергетической калибровки. Показаны результаты применения данных методов на данных с прототипа детектора, собранного в ИЯИ РАН.

В четвертой главе рассматриваются методы определения центральности столкновений тяжелых ионов при помощи передних адронных калориметров. Дано обоснование выбора фрагментационной модели для проведения исследований на смоделированных данных. Приведены результаты работы разработанных методов и проведено сравнение этих подходов между собой и со способами, опирающимися на наблюдаемые из время-проекционной камеры.

В пятой главе обсуждаются методы измерения ориентации плоскости реакции передними адронными калориметрами. Описывается роль угла плоскости реакции для различных физических исследований. Дается краткий обзор подходов к определению угла плоскости реакции и описываются разработанные автором подходы. Проводится сравнение результатов работы этих методов.

В Заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработаны алгоритмы и методы считывания сигналов с передней электроники FNCal, включающие фильтрацию когерентных шумов, анализ формы сигналов, определение их амплитудных характеристик.
2. Разработана процедура энергетической калибровки модулей передних адронных калориметров путем регистрации космических мюонов с различной геометрией треков.
3. Разработан ряд методов (алгоритмов) определения центральности столкновений тяжелых ионов, которые опираются на пространственно-энергетические распределения в калориметрах. В рамках этих методов разработаны способы для определения классов центральности из корреляций полученных наблюдаемых.
4. Разработаны методы измерения угла ориентации плоскости реакции. Они позволяют восстановить угол с точностью около 20 градусов, которая является весьма высокой для подобных задач.
5. Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде программных пакетов на языке C++. Они могут использоваться коллаборацией MPD/NICA как стандартные пакеты в системе сбора и обработки данных.

Научная новизна.

В диссертационной работе описан ряд разработанных автором методов, общая цель которых заключается в обеспечении качественной работы передних адронных калориметров в будущем эксперименте MPD/NICA. Разработаны и применены новые методы считывания сигналов и их последующего анализа с модулей передних калориметров. Разработаны новые методы энергетической калибровки при помощи космических мюонов с различной геометрией треков. Такой подход является единственно возможным в рамках будущего эксперимента. Автором также разработан ряд оригинальных методов для определения геометрии столкновений тяжелых ионов, опирающихся на пространственно-энергетические распределения в модулях калориметра. Отдельно можно отметить новый метод определения центральности, использующий комбинацию наблюдаемых не только из калориметров, но и из время-проекционной камеры. Автором проведено сопутствующее оригинальное исследование, дающее обоснование для выбора фрагментационной модели. Также были разработаны программные пакеты, реализующие данные методы.

Значимость результатов для науки и производства.

Разработанные методы анализа данных с передних адронных калориметров важны для обеспечения выполнения задач коллаборации MPD/NICA, и также важны для развития существующих подходов к определению геометрии столкновений тяжелых ионов в области релятивистской ядерной физики.

Личный вклад автора диссертации в описанное исследование является определяющим. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, все — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается проверкой работы методов на смоделированных данных, которые были (насколько возможно) приближены к ожидаемым. В частности, модель DCM-SMM обеспечивает наиболее корректную генерацию фрагментов спектров в диапазоне энергий, характерных для эксперимента MPD. Кроме того, методы, связанные со считыванием сигналов, их обработкой и энергетической калибровкой модулей передних адронных калориметров, были проверены на экспериментальных данных, полученных на прототипе детектора в ИЯИ РАН. Описания методов изложены таким образом, что возможно их полное воспроизведение и проверка результатов. Полученные результаты работы докладывались на ряде крупных международных конференций, описаны в публикациях журналов, и многократно обсуждались внутри коллаборации MPD/NICA.

Замечания. По результатам рассмотрения текста диссертации можно сделать следующие небольшие замечания:

1. В главе 4, в разделе 1 проведено сравнение смоделированных данных с экспериментальными данными эксперимента NA61. На рис. 4.2 можно заметить, что различия между двумя модельными и реальными данными могут сильно отличаться в зависимости от энергетического диапазона. В частности, в областях 0-40 ГэВ и 40-60 ГэВ ближе к эксперименту оказываются различные модели. В связи с этим не вполне понятно, как корректно проводить сравнение в полном энергетическом спектре.
2. В разделе 3.5.2 описана процедура энергетической калибровки модулей калориметра. Среди прочего там описана процедура отбора полезных сигналов, которая опирается на получение информации о количестве смен знака в заданном диапазоне и указано, что отбор происходит в том случае, если знак менялся не более 2 раз. Чем именно обосновано именно такое число?
3. В диссертации не упомянут метод асимметрии, который применяется на схожем калориметре в других экспериментах. Было бы интересно показать, какую точность дает такой метод в условиях эксперимента MPD.
4. Различные методы определения центральности в главе 4 сосредоточены на поверхностном распределении энергии в калориметре, и нигде не указано, может ли

эффективно использоваться информация о продольном распространении энергии между секциями.

Эти замечания не снижают общей высокой оценки проделанной диссертационной работы.

Заключение.

Диссертация Волкова В.В. является законченным научным исследованием. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК, и представлены на российских и международных научных конференциях.

Автореферат и опубликованные работы полностью и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация Волкова Вадима Вячеславовича **«Определение геометрии столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в эксперименте MPD/NICA»** удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Результаты диссертации были рассмотрены и одобрены на объединенном заседании Ученого Совета Отделения ядерной физики и астрофизики (ОЯФА) ФИАН № 88 и семинара ОЯФА 12 декабря 2023 г. Присутствовало на заседании – 14 чел., из них докторов наук – 7 чел., кандидатов наук – 7 чел. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 88 от «12» декабря 2023 г

Отзыв подготовил ведущий научный сотрудник

отдела ядерных исследований ТОП ФИАН

кандидат физ.-мат. наук

_____ Басков В.А.

Председатель ученого совета ОЯФА

доктор физ-мат. наук

_____ Рябов В.А.

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

119991 Россия, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект. д.53

Тел. +7-499-135-14-29

E-mail office@sci.lebedev.ru