

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора
Центра по науке
Ю.А. ДЬЯКОВА

« 08 » августа 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Карпушкина Николая Михайловича *«Методы анализа данных передних адронных калориметров ядро-ядерных экспериментов с фиксированной мишенью»*, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертации. В диссертации исследуются методы обработки и анализа данных, полученных с передних адронных калориметров, используемых в ядро-ядерных экспериментах с фиксированной мишенью. Эти детекторы имеют решающее значение для определения таких базовых характеристик ядерных столкновений, как центральность и плоскость реакции. Целью исследования является разработка практических методов анализа данных существующих и будущих экспериментов. Это включает в себя разработку метода цифровой обработки сигналов, создание программного обеспечения, калибровку передних адронных калориметров и определение центральности для экспериментов $BM@N$ и $CBM@FAIR$. Учитывая высокое внимание в последние годы к изучению свойств сильновзаимодействующей ядерной материи в условиях высокой барионной плотности, и важность определения глобальных геометрических характеристик взаимодействия, таких как центральность и ориентация плоскости реакции, диссертационная работа несомненно является важным и актуальным исследованием.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и библиографии. Полный объем диссертации составляет 113 страниц, включая 50 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 143 наименования.

Во Введении обосновывается актуальность разработки методов анализа данных передних адронных калориметров, формулируются цель и задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

Первая глава посвящена действующим, строящимся и планируемым экспериментам по изучению сильновзаимодействующей ядерной материи при высокой барионной плотности. Рассматриваются действующие эксперименты RHIC

FXT, NA61/SHINE, BM@N и HADES, готовящиеся эксперименты MPD@NICA и CBM@FAIR, планируемый проект JARC-НI. Обсуждаются детекторы для определения геометрии столкновений — передние адронные калориметры — экспериментов NA61/SHINE, BM@N и CBM@FAIR и их особенности.

Во второй главе рассматриваются методы цифровой обработки сигналов для передних адронных калориметров. Цель разработанных методов цифровой обработки сигналов — это улучшение соотношения сигнал/шум, которое особенно важно при проведении калибровки детектора, и снижение доли событий с наложением сигналов, которые возникают при работе с высокоинтенсивными пучками ядер.

Третья глава посвящена разработке программного обеспечения для декодирования и отслеживания в реальном времени качества данных, поступающих с передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM@FAIR. Обсуждается роль созданного программного обеспечения в цепочке анализа данных отмеченных экспериментов.

В четвертой главе дается описание метода амплитудной калибровки элементов передних адронных калориметров на космических мюонах. В методе используется трехмерная сегментация детектора, позволяющая реконструировать трек космического мюона в материале детектора.

В пятой главе обсуждаются методы определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием в экспериментах BM@N и CBM@FAIR. Идея методов сводится к использованию информации о пространственном распределении выделенной в адронном калориметре энергии.

В Заключении приведены основные результаты работы. Стоит отметить следующие результаты:

1. Разработаны метод и критерий оценки качества цифровой обработки сигналов передних адронных калориметров, позволяющие надежно отсеивать электронные шумы и наводки электроники.
2. Создано программное обеспечение для чтения-записи данных передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM.
3. Разработан метод амплитудной калибровки элементов передних адронных калориметров с использованием реконструкции треков космических мюонов в материале детектора.
4. Разработан метод цифровой обработки сигналов для адронного калориметра эксперимента CBM, необходимый для уменьшения доли событий с наложениями сигналов, возникающих при высоких частотах ядерных взаимодействий.
5. Разработаны методы определения центральности по данным передних адронных калориметров экспериментов BM@N и CBM с пучковым отверстием, использующие пространственное распределение выделенной энергии в детекторе.

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы применительно к

передним адронным калориметрам разработан ряд методов, направленных на анализ поступающих с детекторов данных. Впервые для обработки сигналов передних адронных калориметров применен метод наименьших квадратов Прони, дополненный критерием качества обработки сигналов, что позволяет надежно отсекаать шумовые срабатывания. Разработано программное обеспечение для адронных калориметров экспериментов VM@N и CBM@FAIR, разработан метод калибровки данных детекторов на космических мюонах. Для адронного калориметра эксперимента CBM разработан метод цифровой обработки сигналов, позволяющий значительно сократить долю событий с наложением сигналов. Разработаны методы определения центральности передними адронными калориметрами экспериментов VM@N и CBM с пучковым отверстием. Впервые к задаче применены методы машинного обучения по алгоритмам, схожим с анализом изображений.

Значимость результатов для науки и производства. Разработанные методы анализа данных адронных калориметров имеют важное значение для совершенствования подходов при проектировании, создании и эксплуатации существующих и будущих экспериментов в области релятивистской ядерной физики, особенно в условиях наиболее высоких нагрузок детекторов.

Разработанные методы анализа данных адронных калориметров имеют непосредственное практическое применение. Метод цифровой обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов Прони позволяет надежно выделять сигналы в зашумленных данных, что важно для проведения калибровки детектора. Метод цифровой обработки сигналов на основе полосового фильтра позволяет снизить долю срабатываний детектора с наложением сигналов, что важно для экспериментов с высокой интенсивностью ядерных взаимодействий, таких как CBM. Программные пакеты для чтения-записи данных и отслеживания качества набираемых данных позволяют обнаруживать и устранять возможные ошибки в реальном времени. Разработанные методы определения центральности в экспериментах VM@N и CBM@FAIR представляют практический инструмент анализа данных, позволяющий использовать пространственное распределение энергии в детекторе.

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 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.

Достоверность полученных в данной работе результатов подтверждается успешным использованием разработанного метода цифровой обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов Прони в эксперименте CBM@FAIR для передних адронных калориметров. Результаты предложенного метода амплитудной

калибровки секций калориметров на космических мюонах согласуются с калибровочными коэффициентами, полученными от мюонных пучков на тестовом канале транспортировки T10 ускорителя PS в ЦЕРНе. Демонстрация работы методов определения центральности передними адронными калориметрами с пучковым отверстием приводится с применением моделирования отклика передних калориметров на частицы из генератора DCM-QGSM-SMM, для которого характерны реалистичные выходы фрагментов спектров в исследуемом диапазоне энергий столкновения.

Замечания. По результатам рассмотрения текста диссертации Н.М. Карпушкина сформулированы следующие замечания:

1. В диссертации разработан метод обработки сигналов, получаемых с детектора, однако не проведено количественное сравнение результатов, получаемых данным методом, с существующими методами параметризации сигналов, применяемыми в работающих калориметрических системах, такие как аппроксимация гамма-функцией или «Новосибирской функцией». Критерии сравнения методов: точность восстановления амплитуды и времени, производительность, устойчивость к шумам и способность разделять одиночные и наложенные события.

2. Разработано программное обеспечение для адронных калориметров экспериментов CBM и BM@N, однако в диссертации указано об апробации его только в сеансах эксперимента mCBM. При этом зимой 2022-2023 гг. были также проведены сеансы эксперимента BM@N.

3. В главе 3.2 «Разработка программного обеспечения для адронного калориметра эксперимента CBM@FAIR» на рис. 3.2 продемонстрировано сравнение спектров из реальных данных и Монте-Карло моделирования. При этом наблюдается существенное отличие в линейности реального модуля калориметра и результата Монте-Карло моделирования (вплоть до 30% при 100 МэВ). Как такое отличие будет влиять на физические результаты? В чем причина такого расхождения?

4. Разработаны методы определения центральности для экспериментов BM@N и CBM, однако в диссертации представлены результаты моделирования только для эксперимента CBM при моделировании Au-Au столкновений с импульсом пучка 12A ГэВ/с. Таким образом, возникает вопрос, будет ли применим данный метод в случае изменения энергии столкновения, геометрии детектора, в случае столкновения других ядер?

5. Непонятно, в чем преимущество метода машинного обучения (ML) по сравнению с методом асимметрии? На рис. 5.7 показано, что разрешение обоих подходов практически не различается. Есть ли смысл использовать ML подход, подразумевающий трудоемкое обучение? Потребуется ли изменение калибровок калориметра проведения обучения с самого начала?

Заключение. Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное исследование. 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 достаточно полно и правильно отражают содержание диссертации. Таким образом, диссертация Карпушкина Николая Михайловича *«Методы анализа данных передних адронных калориметров ядро-ядерных экспериментов с фиксированной мишенью»* удовлетворяет п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842 (в действующей редакции), соответствует паспорту научной специальности, 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 семинаре «Фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики, физики элементарных частиц и квантовых систем» 6 июня 2023 г.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании ученого совета Курчатовского ядерно-физического комплекса НИЦ «Курчатовский институт». 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 № 9 от «29» июня 2023 г.

Отзыв подготовил к.ф.-м.н.,
рук. отделения НИЦ «Курчатовский институт»

Д.С. Блау

Председатель ученого совета КЯФК

А.А. Коршенинников

И.о. секретаря ученого совета КЯФК

С.С. Панкратов

Подписи Д.С. Блау, А.А. Коршенинникова и С.С. Панкратова подтверждаю

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Телефон: +7 (499) 196-95-39

e-mail: nrcki@nrcki.ru

Сведения о ведущей организации

по диссертации Карпушкина Николая Михайловича «Методы анализа данных передних адронных калориметров ядро-ядерных экспериментов с фиксированной мишенью», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"»
Ведомственная принадлежность	Правительство Российской Федерации
Сокращенное наименование	НИЦ «Курчатовский институт»
Подразделение	Курчатовский ядерно-физический комплекс (КЯФК)
Почтовый индекс, адрес организации	123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Веб-сайт	http://www.nrcki.ru
Телефон	+7 (499) 196-95-39 Факс: +7 (499) 196-17-04
Адрес электронной почты	nrcki@nrcki.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющих отзыв, за последние 5 лет по теме диссертации:

1. S. Acharya, D. Aleksandrov, D. Blau, et al. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment. // JINST, 2019, V. 14, P05025.
2. D. Blau, Performance of the ALICE electromagnetic calorimeters in LHC Runs 1 and 2 and upgrade projects. // JINST, 2020, V. 15, C03025.
3. D. Averyanov, D. Blau. New Inorganic Scintillators' Application in the Electromagnetic Calorimetry in High-Energy Physics. // Applied Sciences, 2023, № 13(10), с. 6189.
4. А.В. Акиндинов, К.А. Балыгин и др. Временное и энергетическое разрешения прототипов электромагнитного калориметра на основе кристаллов вольфрамата свинца. // Приборы и техника эксперимента, 2023, № 2, стр. 24-343.
5. O. Golosov, D. Blau et al. CBM Performance for Multi-Differential Measurements of Proton and Charged Kaon Directed Flow. // Phys. Part. Nucl, 2022, V. 53, p. 207–211.
6. D. Blau, D. Peresunko. Direct Photon Production in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies. // Phys. Part. Nucl. 2021, V. 52, p. 681–685.

Рук. отделения ядерной физики и пучковых технологий КЯФК

Д.С. Блау

Подпись Д.С. Блау подтверждаю

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов