

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ)
мкр. Орлова роща, д. 1, г. Гатчина, Ленинградская область, 188300
Телефон: (81371) 4-60-25, факс: (81371) 3-60-25. E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru
ОКПО 02698654, ОГРН 1034701242443, ИНН 4705001850, КПП 470501001

N 58
25 августа 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора по научной
работе НИЦ «Курчатовский институт» -
ПИЯФ

_____ д.ф-м.н. В.В. Воронин

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на
диссертационную работу Мамаева Михаила Валерьевича на тему:
«Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных
столкновениях при энергиях E_{kin} 1.2-4 АГэВ», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
научной специальности 1.3.15 - Физика атомного ядра и элементарных
частиц, физика высоких энергий

Актуальность темы диссертации

Работа посвящена изучению азимутальной анизотропии протонов, рожденных в столкновениях релятивистских тяжелых ядер в экспериментах с фиксированной мишенью при кинетических энергиях пучка в несколько ГэВ на нуклон. В этой области энергий теоретические расчеты предсказывают образование сильновзаимодействующей адронной материи с барионной плотностью, значительно превышающей нормальную ядерную. Сравнительно большое время прохождения ядер друг через друга приводит к взаимодействию среды, образующейся в области перекрытия, с осколками сталкивающихся ионов (спектаторами). Пространственная асимметрия системы, состоящей из спектаторов и материи в области перекрытия, вызывает анизотропию импульсного распределения рожденных частиц. Экспериментальное измерение коэффициентов Фурье-разложения азимутального распределения рожденных в столкновении частиц относительно плоскости реакции (анизотропные потоки), позволяет изучать

динамику ядерных реакций и определять свойства образующейся в столкновениях материи. Первые два коэффициента разложения: направленный (v_1) и эллиптический (v_2) потоки чувствительны к уравнению состояния созданной материи.

Сравнивая экспериментально измеренные значения направленного и эллиптического потоков с теоретическими предсказаниями, возможно получить ограничения для уравнения состояния плотной барионной материи. Измерения анизотропных потоков первой и второй гармоник в этой области энергий уже проводились экспериментами FOPI (SIS-18), E895 (AGS) и STAR (RHIC). Однако данные E895 по направленному потоку протонов расходятся с результатами FOPI и STAR. Это может быть связано с корреляциями, не связанными с коллективным движением частиц (непотоквые корреляции), которые искажают измерения анизотропных потоков.

Для устранения неоднозначности между существующими экспериментальными данными необходимы новые измерения направленного потока, выполненные с учетом вклада непотковых корреляций. Работа посвящена разработке методики измерения анизотропных потоков рожденных частиц, учету и минимизации вклада непотковых корреляций при измерении потоков в столкновениях тяжелых ионов. С ее помощью был измерен направленный поток протонов в столкновениях ядер Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}}=1.23\text{A}$ и 1.58A ГЭВ в эксперименте NADES (GSI). Получена оценка эффективности измерения направленного и эллиптического потоков протонов на установке BM@N (NICA) с использованием результатов анализа полностью реконструированных модельных данных для Xe+Cs(1) столкновений при кинетических энергиях пучка ксенона $E = 2, 3$ и 4A ГЭВ. Получены значения направленного потока протонов в столкновениях Xe+Cs(1) при энергии $E=3.8\text{A}$ ГЭВ на основе анализа экспериментальных данных с первого физического сеанса работы на установке BM@N(NICA). Измеренные значения направленного потока протонов в ядроядерных столкновениях в этой области энергий позволяют уточнить существующие ограничения на уравнение состояния плотной барионной материи. Сравнение коллективной анизотропии в столкновениях ядер с различными массовыми числами дают возможность оценить влияние нуклонов-спектаторов на полученные значения уу. Поэтому тема работы, безусловно, является актуальной.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 124 страницы с 63 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 86 наименований.

В первой главе представлен обзор современных экспериментальных и теоретических представлений о механизмах формирования азимутальной анизотропии частиц в ядро-ядерных столкновениях. Особое внимание уделяется интерпретации коэффициентов Фурье-разложения азимутального распределения рожденных частиц как характеристик коллективного движения и их связи с уравнением состояния сильновзаимодействующей материи. Рассмотрены ключевые экспериментальные эффекты, затрудняющие точное измерение

анизотропных потоков: азимутальная неоднородность аксептанса детекторной установки и вклад непотоковых корреляций. Детально проанализированы существующие методы учета этих эффектов, отмечены их ограничения недостатки.

С целью минимизации вклада указанных факторов в измеряемые величины потоков автором была предложена и обоснована новая методика измерения анизотропных потоков в экспериментах с фиксированной мишенью. Представлены результаты детального сравнения разработанного подхода с традиционными методами, продемонстрированы его преимущества в условиях неоднородного аксептанса экспериментальной установки и значительного вклада непотоковых корреляций.

Во второй главе приводится детальное описание экспериментальных установок HADES на ускорителе SIS-18 в Центре тяжелых ионов имени Гельмгольца (GSI) и BM@N на ускорителе Нуклотрон в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ). Описано устройство и принципы работы ключевых детекторных систем, критически важных для проведения измерений: трековой системы, обеспечивающей реконструкцию траекторий заряженных частиц и измерение их импульсов; времяпролетной системы, используемой для идентификации частиц; а также передних детекторов, предназначенных для регистрации фрагментов сталкивающихся ядер (спектаторов). Обе установки работают в режиме регистрации столкновений ядер пучка с фиксированной мишенью, однако обладают рядом отличий. В эксперименте HADES тороидальное магнитное поле отклоняет заряженные частицы, не меняя их азимутального угла, в то время как в BM@N магнитное поле значительно искажает x-компоненту импульса. Азимутальный аксептанс HADES является более изотропным, поскольку установка состоит из шести идентичных аксиально-симметричных модулей, а трековая система BM@N имеет прямоугольную форму в плоскости, поперечной направлению пучка. Трековая система HADES обеспечивает импульсное разрешение для протонов $\sim 2\%$. Импульсное разрешение центрального трекера BM@N зависит от энергии столкновения, поскольку с изменением энергии пучка необходимо варьировать магнитное поле анализирующего магнита, и составляет 1.5%, 2% и 3% для энергий пучка 2, 3 и 4 АГЭВ соответственно. Установки позволяют реконструировать траектории, импульс и измерять время пролета протонов для последующей идентификации в диапазонах псевдобыстрот в лабораторной системе отсчета: от 0.1 до 1.8 для HADES и от 1 до 5 для BM@N. Передняя сцинтилляционная стенка (Forward Wall) в эксперименте HADES способна регистрировать лишь заряженные фрагменты, тогда как в переднем адронном калориметре (FHCAL) в эксперименте BM@N возможна также регистрация нейтронов. Разрабатываемая методика измерения потоков должна обеспечивать надежные измерения для различных конфигураций детекторных установок и корректно учитывать вклады возможных детекторных эффектов в измеряемые величины.

Третья глава посвящена описанию разработанных методик анализа экспериментальных данных. В первой части главы рассмотрены методы отбора событий столкновения ядер, реконструкции траекторий и идентификации протонов

по данным времяпролетных детекторов применительно к экспериментальной установке HADES. Центральность столкновений определялась по множественности зарегистрированных сигналов во времяпролетной системе. Описаны методы восстановления плоскости симметрии события и измерения направленного потока протонов. Проведена оценка систематических погрешностей измерений для направленного потока протонов, учитывающих остаточные эффекты неоднородности аксептанса детекторной установки и непотоковые корреляции. Показано, что, используя предложенный автором метод для измерения азимутальных потоков, возможно уменьшить вклад непотоковых корреляций в полученные значения направленного потока протонов на 25%.

Вторая часть главы посвящена применению разработанных методик измерения азимутальной анизотропии для установки BM@N. В ходе подготовки к первому физическому сеансу была изучена возможность измерения анизотропных потоков с использованием данных, смоделированных для установки BM@N методом Монте-Карло для столкновений Xe+Cs(I) при энергиях 2, 3 и 4 АГЭВ. В 2023 году был проведен первый цикл набора физических данных для Xe+Cs(1) столкновений при энергии 3.8 АГЭВ. В главе описаны процедуры отбора экспериментальных данных, условий отбора треков заряженных частиц и их идентификации. Детально описано применение разработанного автором метода для определения плоскости симметрии и измерения коллективной анизотропии частиц. Показано, что использование для анализа анизотропных потоков только данных адронного калориметра приводит к высоким систематическим ошибкам (порядка 50%) из-за большого размера адронных ливней по сравнению с поперечной сегментацией калориметра. Автором показано, что вклад данного эффекта возможно уменьшить до 5%, если использовать дополнительную информацию из трековой системы.

В четвертой главе представлены результаты применения разработанной методики для измерения направленного потока протонов. В первой части представлены результаты измерения направленного потока в зависимости от быстроты и поперечного импульса, а также зависимость наклона потока в области средних быстрот от центральности в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях 1.23 и 1.58 АГЭВ на установке HADES. Показано, что экспериментальные данные согласуются с предсказаниями модели JAM и результатами измерений на установке FOPI в столкновениях ядер Au+Au при энергиях от 0.6 до 1.5 АГЭВ, опубликованных в 2011 году. Автором обнаружено масштабирование направленного потока протонов с временем пролета ядер и геометрией столкновения.

Во второй части главы представлены результаты анализа данных, смоделированных методом Монте-Карло для установки BM@N. Получены зависимости v_1 и v_2 протонов от быстроты и поперечного импульса в столкновениях Xe+Cs(1) при энергиях 2, 3 и 4 АГЭВ. Зависимости были получены из физической модели ядро-ядерных столкновений JAM без реконструкции, и после полного цикла моделирования установки с последующей реалистичной реконструкцией событий с учетом всех известных детекторных эффектов. Направленный и эллиптический потоки из данных без реконструкции и после

реконструкции согласуются в пределах нескольких процентов. Это позволяет сделать вывод, что разработанная методика измерения анизотропных потоков позволяет минимизировать искажения, обусловленные особенностями работы экспериментальной установки.

В главе также представлены результаты экспериментального измерения направленного потока протонов u в зависимости от быстроты, полученные из анализа данных столкновений $\text{Xe}+\text{Cs}(1)$ при энергии 3.8 АГЭВ на установке BM@N. Автор показывает, что извлеченное значение наклона направленного потока протонов в средних быстротах согласуется с ранее полученными экспериментальными измерениями установки STAR на ускорителе RHIC (БНЛ).

В заключении приведены результаты диссертационной работы.

Положения выносимые на защиту

1. На установке HADES измерены зависимости коэффициента направленного потока v_1 протонов от центральности столкновения, поперечного импульса (p_T) и быстроты (y_{cm}) для столкновений $\text{Au}+\text{Au}$ и $\text{Ag}+\text{Ag}$ при энергиях $E_{kin} = 1,23\text{--}1,58$ АГЭВ
2. Разработан метод учета вклада непотоковых корреляций и изучения их влияния на измеренные значения коэффициентов потоков v_n для экспериментов с фиксированной мишенью в условиях сильной неоднородности азимутального аксептанса установки.
3. Получены результаты сравнения измеренных значений направленного потока (v_1) с расчетами в рамках современных моделей ядро-ядерных столкновений, проверен эффект масштабирования v_1 с энергией столкновения и геометрией области перекрытия.
4. Получены оценки эффективности измерения коллективных потоков на экспериментальной установке BM@N.

Достоверность разработанной автором методики подтверждается полученными экспериментальными результатами, которые согласуются с аналогичными результатами, ранее полученными в других экспериментах в той же области энергий. Анализ сгенерированных и реконструированных данных установки BMN для столкновений $\text{Xe}+\text{Cs}(1)$ при энергиях 2, 3 и 4 АГЭВ подтверждает применимость разработанной методики измерения азимутальных потоков, позволяющей учесть и минимизировать вклад детекторных эффектов и непотоковых корреляций в измерения.

Результаты, полученные в диссертационной работе, были доложены на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы.

Практическая значимость

Разработанная в работе методика измерения анизотропных потоков в релятивистских столкновениях ядер имеет универсальный характер и может быть использована для оценки азимутальной анизотропии независимо от экспериментальной установки. Методика проверена на экспериментальных данных установок HADES и BM@N и данных моделирования установки BM@N методом Монте-Карло. Разработанные методы могут быть использованы для последующего

анализа азимутальной анизотропии других частиц, таких как легкие адроны (пионы, каоны), легкие ядра (дейтерия и трития) и гипероны (Λ -гипероны), в эксперименте BM@N. Методика может быть адаптирована для проведения подобных измерений на установке MPD (NICA), которая также может работать с фиксированной мишенью.

Полученные экспериментальные данные для направленного потока в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях 1.23 и 1.58 АГЭВ в эксперименте HADES, а также Xe+Cs(I) при энергии 3.8 АГЭВ в BM@N позволяют уточнить теоретические модели ядро-ядерных столкновений. В частности, в работе показано, что физическая модель JAM описывает зависимость направленного потока от быстроты, однако не способна воспроизвести зависимость направленного потока протонов от поперечного импульса.

Личный вклад

Основные результаты работы были получены автором в рамках его участия в международных коллаборациях: HADES (GSI) в 2019–2022 гг. и BM@N (ОИЯИ) в 2022–2024 гг. Автор являлся членом коллаборации HADES в 2019–2022 гг. и с 2022 года состоит в коллаборации BM@N. Мамаев М.В. участвовал в наборе данных столкновений Ag+Ag при энергиях 1.23 и 1.58 А ГЭВ на установке HADES и экспериментальных данных Xe+Cs(I) при энергии 3.8 А ГЭВ на установке BM@N. Результаты анализа направленного потока протонов на установке HADES были получены при определяющем вкладе автора диссертации. Результаты докладывались от имени коллаборации на международных конференциях и были опубликованы в соавторстве Мамаева М.В. в коллаборационной статье. Результаты исследования направленного потока протонов в данных моделирования методом Монте-Карло и в экспериментальных данных установки BM@N также были представлены на международных конференциях от имени коллаборации и опубликованы в статьях в рецензируемых научных журналах. В 5 из 9 публикаций Мамаев М.В. является единственным автором.

Замечания по работе

Существенных недостатков диссертация не содержит, однако имеется ряд замечаний и пожеланий:

1. Надписи на графиках, подписи к осям не переведены на русский язык.
2. Пропущены символы комплексного сопряжения в формулах 3.6-3.11, хотя ранее в главе 1 обобщенные выражения приводятся с комплексным сопряжением (формулы 1.10-1.15).
3. В своем исследовании автор применяет разработанные методики измерения коллективной анизотропии для исследования возможности проведения подобных измерений на установке BM@N. На данных Монте-Карло моделирования установки показано, что возможно, как измерение направленного (v_1), так и эллиптического (v_2) потоков. Однако из экспериментальных данных столкновений Xe+Cs(I) при 3.8 АГЭВ извлечена лишь зависимость v_1 от быстроты. В связи с этим возникает вопрос, планируется ли измерение эллиптического потока в экспериментальных данных на установке BM@N?

Отмеченные недостатки не снижают общую высокую оценку работы.

Заключение

Диссертация М.В. Мамаева является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для области релятивистских столкновений тяжелых ионов. По материалам диссертации Мамаевым М.В. опубликовано 9 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации Мамаева М.В. были представлены, обсуждены и одобрены на научном семинаре и заседании Ученого совета отделения физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 10 июня 2025 года. Диссертация Мамаева Михаила Валерьевича "Исследование направленного потока протонов в ядро-ядерных столкновениях при энергиях $E_{kin}=1.2-4$ АГЭВ удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий. Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден, одобрен и утвержден на заседании Ученого совета отделения физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» протокол от 10 июня 2025 года № 5.

Отзыв подготовил:

доктор физ.-мат. наук 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики отделения физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Рябов Виктор Германович _____

подпись В.Г. Рябова заверяю

Учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев
Vorobyev_SI@pnpi.nrcki.ru

Контакты ведущей организации:

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

188300, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.

Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru

Список основных публикаций в рецензируемых научных изданиях работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации соискателя:

1. V. Riabov et al., Evidence of Spin-Orbital Angular Momentum Interactions in Relativistic Heavy-Ion Collisions, Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 1, 012301 e-Print: 1910.14408 [nucl-ex].
2. V. Riabov et al., Probing the effects of strong electromagnetic fields with charge-dependent directed flow in Pb-Pb collisions at the LHC, Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 2, 022301 • e-Print: 1910.14406 [nucl-ex].
3. V. Riabov et al., Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of $K^*(892)0$ and $\phi(1020)$ mesons, Phys.Lett.B 802 (2020) 135225 •e-Print: 1910.14419 [nucl-ex].
4. V. Riabov et al., Search for a common baryon source in high-multiplicity pp collisions at the LHC, Phys.Lett.B 811 (2020) 135849. e-Print: 2004.08018 [nucl-ex].
5. V. Riabov et al., Multiplicity dependence of $K^*(892)0$ and $\phi(1020)$ production in pp collisions at 13 TeV, Phys.Lett.B 807 (2020) 135501, Phys.Lett.B 807 (2020) 135501• e-Print: 1910.14397 [nucl-ex].
6. V. Riabov et al., Elliptic and triangular flow of (anti)deuterons in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV, Phys.Rev.C 102 (2020) 5, 055203 e-Print: 2005.14639 [nucl-ex].
7. V. Riabov et al., Reconstruction of Photon Conversions in the MPD Experiment, Particles 4 (2021) 1, 55-62.
8. V. Riabov et al., Production and reconstruction of short-lived resonances in heavy-ion collisions at NICA energies using the MPD detector, Phys.Scripta 96 (2021) 6, 064002.
9. V. Riabov et al., Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA, Eur.Phys.J.A 58 (2022) 7, 140 e-Print: 2202.08970 [physics.ins-det].
10. V. Riabov et al., Production of $K^*(892)0$ and $\phi(1020)$ in pp and Pb-Pb collisions at 5.02 TeV, Phys.Rev.C 106 (2022) 3, 034907• e-Print: 2106.13113 [nucl-ex].
11. V. Riabov et al., Characterizing the initial conditions of heavy-ion collisions at the LHC with mean transverse momentum and anisotropic flow correlations, Phys.Lett.B 834 (2022) 137393 •e-Print: 2111.06106 [nucl-ex].
12. V. Riabov et al., Anisotropic flow and flow fluctuations of identified hadrons in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV, JHEP 05 (2023) 243 e-Print: 2206.04587 [nucl-ex].
13. V. Riabov et al., Low-pT direct-photon production in Au+Au collisions at 39 and 62.4 GeV, Phys.Rev.C 107 (2023) 2, 024914. e-Print: 2203.12354 [nucl-ex].

14. V. Riabov et al., Common femtoscopic hadron-emission source in pp collisions at the LHC, Eur.Phys.J.C 85 (2025) 2, 198. e-Print: 2311.14527 [hep-ph].

15. V. Riabov et al., Disentangling Centrality Bias and Final-State Effects in the Production of High-pT Neutral Pions Using Direct Photon in d+Au Collisions at 200 GeV, Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 2, 022302 • e-Print: 2303.12899 [nucl-ex].