

На правах рукописи

Мамаев Михаил Валерьевич

Исследование направленного потока протонов
в ядро-ядерных столкновениях
при энергиях $E_{kin} = 1.2 — 4A$ ГэВ

1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва—2025

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

Научный руководитель:

Тараненко Аркадий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Харлов Юрий Витальевич, доктор 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.

Лохтин Игорь Петрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел экспериментальной физики высоких энергий, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

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 и степень ее разработанности.

Уравнение состояния (Equation Of State, EOS) описывает фундаментальные свойства ядерной материи, обусловленные лежащими в основе сильными взаимодействиями. Вблизи плотности насыщения ядерной материи ρ_0 , $\rho_0 = 0,16 \text{ фм}^{-3}$, EOS контролирует структуру ядер через энергию связи и несжимаемость K_{nm} [10]. EOS также описывает свойства ядерной материи при экстремальных плотностях и/или температурах. Предполагается, что такие условия достигаются в экспериментах по столкновению релятивистских тяжелых ядер или в нейтронных звездах и слияниях нейтронных звезд. Исследования показывают, что столкновения тяжелых ионов при энергиях пучка $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}10,4 \text{ ГэВ}$ (энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{--}5 \text{ ГэВ}$ в системе центра масс) и слияния нейтронных звезд обнаруживают сходные температуры ($T \sim 50\text{--}100 \text{ МэВ}$) и плотности барионов $\rho \sim (2 - 5)\rho_0$ [11]. EOS может также отражать появление новых степеней свободы, например, странных частиц в ядрах нейтронных звезд или кварков и глюонов в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. После открытия кварк-глюонной материи (КГМ) в столкновениях ионов золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$ на коллайдере RHIC в 2005 году изучение уравнения состояния квантовой хромодинамики (КХД) в области высоких барионных плотностей стало главной целью программ сканирования по энергии в экспериментах: STAR (RHIC) ($\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}27 \text{ ГэВ}$), NA61/SHINE (SPS) ($\sqrt{s_{NN}} = 5,2\text{--}17 \text{ ГэВ}$), BM@N (NICA) ($\sqrt{s_{NN}} = 2,3\text{--}3,5 \text{ ГэВ}$) и HADES (SIS18) ($\sqrt{s_{NN}} = 2,3\text{--}2,55 \text{ ГэВ}$) [11—13]. Планирующиеся эксперименты CBM (FAIR) ($\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}5 \text{ ГэВ}$) и MPD (NICA) ($\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11 \text{ ГэВ}$) позволят изучить область высоких барионных плотностей еще более детально. Одним из ключевых наблюдаемых эффектов в изучении КГМ являются анизотропные коллективные потоки адронов, рожденных в столкновении. Они могут быть охарактеризованы через коэффициенты ряда Фурье $v_n = \langle \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})) \rangle$ в разложении азимутального распределения частиц

относительно угла плоскости реакции Ψ_{RP} , определяемой осью пучка и вектором прицельного параметра [14]:

$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})), \quad (1)$$

где n — порядок гармоники и φ — азимутальный угол импульса частиц. Первые два коэффициента разложения Фурье v_1 (направленный поток) и v_2 (эллиптический поток) показывают чувствительность к EOS созданной материи. Основополагающее ограничение на значения несжимаемости K_{nm} ядерной материи в диапазоне плотностей $(2-5)\rho_0$ было получено путем сравнения измерений направленного (v_1) и эллиптического (v_2) потоков протонов в Au+Au столкновениях при энергиях $E_{\text{kin}} = 2-8A$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,7-4,3$ ГэВ), выполненных в эксперименте E895 на ускорителе AGS, с теоретическими предсказаниями [15–17]. Однако интерпретация данных направленного потока v_1 протонов требует включения в модель «мягкого» EOS с коэффициентом несжимаемости $K_{nm} \sim 210$ МэВ. Значения для эллиптического потока v_2 лучше согласуются с более «жестким» уравнением состояния $K_{nm} \sim 380$ МэВ [10]. В дополнение, новые экспериментальные измерения первых двух гармоник коллективных потоков протонов, выполненные в эксперименте STAR [18; 19] на коллайдере RHIC для данных энергий, не согласуются с результатами эксперимента E895 [15]. Одна из возможных причин различия в результатах измерений может заключаться в том, что стандартный метод «плоскости событий» для измерений потоков, использовавшийся 15–20 лет назад в эксперименте E895, не учитывал влияние непотоковых корреляций на измерения v_n . К непотоковым корреляциям можно отнести: адронные резонансы и вклад вторичных частиц, сохранение полного(поперечного) импульса, фемтоскопические корреляции. Высокоточные измерения направленного и эллиптического потоков в этой области энергий современными методами анализа, подавляющими вклад непотоковых корреляций, важны для дальнейшего ограничения значения EOS симметричной по

изоспину сильно взаимодействующей материи. В 2019 году в эксперименте HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) [13], расположенном на ускорителе SIS-18 в GSI, набрано порядка 2 млрд событий столкновений Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{А ГэВ}$ и $1,58\text{А ГэВ}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{ ГэВ}$ и $2,55\text{ ГэВ}$), которые дополнили существующие данные для столкновений Au+Au при энергии $E_{\text{kin}} = 1,23\text{А ГэВ}$. Ожидается, что сравнение результатов измерений для различных сталкивающихся систем при различных энергиях поможет оценить вклад взаимодействия рожденных частиц с нуклонами-спектаторами в наблюдаемые коллективные потоки и получить новые ограничения на значения EOS симметричной материи. В феврале 2023 года закончился набор данных в первом в России эксперименте по изучению столкновений релятивистских ядер BM@N (Барионная Материя на Нуклотроне)[12] на новом ускорительном комплексе NICA (ОИЯИ, Дубна), в ходе которого было набрано порядка 500 М событий столкновений ядер Xe+Cs(I) при энергии $E_{\text{kin}} = 3,8\text{А ГэВ}$. Данная работа впервые показала возможности измерения коллективных потоков в эксперименте BM@N, что значительно расширило его физическую программу по изучению EOS материи в области высоких барионных плотностей.

Целью работы является экспериментальное исследование коллективной анизотропии протонов в ядро-ядерных столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}1,58\text{А ГэВ}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{--}2,55\text{ ГэВ}$) в эксперименте HADES (GSI), а также изучение возможности проведения измерений коллективной анизотропии в эксперименте BM@N (NICA). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать и применить на практике метод измерения коллективных потоков в экспериментах с фиксированной мишенью с учетом неоднородности азимутального аксептанса установки.
2. Разработать метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непоточковых корреляций), и изучить их влияние на результаты измерения коллективных потоков.

3. Исследовать характеристики направленного потока v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}1,58\text{A}$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{--}2,55$ ГэВ) в эксперименте HADES.
4. Произвести сравнение полученных результатов измерения v_1 протонов с теоретическими моделями и данными других экспериментов.
5. Исследовать влияние спектаторов налетающего ядра на формирование v_1 протонов с помощью проверки законов масштабирования коллективных потоков с энергией и геометрией столкновения.
6. Изучить возможности измерения коллективных потоков протонов в эксперименте BM@N (NICA).

Основные 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 Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}1,58\text{A}$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{--}2,55$ ГэВ).
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.

Научная новизна:

1. Впервые для экспериментов на фиксированной мишени разработаны и апробированы методы коррекции результатов измерения направленного потока на азимутальную неоднородность аксептанса установки и учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц.
2. Впервые измерены значения направленного потока v_1 протонов с

учетом вклада непотоковых корреляций для ядро-ядерных столкновений (Au+Au, Ag+Ag) при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{--}1,58\text{A}$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,4\text{--}2,55$ ГэВ), позволяющие оценить вклад нуклонов-спектаторов в коллективную анизотропию частиц.

Практическая значимость данной работы заключается в том, что новые прецизионные результаты измерения направленного потока v_1 протонов современными методами анализа, позволяющими оценить вклад непотоковых корреляций, являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей ядро-ядерных столкновений, получения новых ограничений на значения EOS симметричной сильно взаимодействующей материи в области максимальной барионной плотности. Методика измерения коллективных анизотропных потоков, опробованная впервые в эксперименте HADES (ГСИ), была адаптирована к условиям установки BM@N (NICA) и усовершенствована с целью уменьшения систематической ошибки измерения. Методика была апробирована на основе моделирования детектора BM@N и анализа первых физических данных эксперимента по изучению Xe+Cs(I) столкновений при энергии $E_{\text{kin}} = 3,8\text{A}$ ГэВ. Данные результаты важны и для будущего эксперимента MPD (NICA), который также может проводиться на фиксированной мишени.

Методология и методика исследования. Анализ анизотропных потоков протонов на основе экспериментальных данных, набранных на установках HADES (ГСИ) и BM@N(NICA), выполнялся с помощью пакета объектно-ориентированных библиотек на языке C++ QnTools. Оценка эффективности измерений предложенными методами производилась с помощью Монте-Карло моделирования установки BM@N в среде GEANT4 с последующей полной реконструкцией событий генерированных в моделях ядро-ядерных столкновений JAM и DCM-QGSM-SMM. Все вычисления и визуальное представление результатов выполнено с помощью программного пакета ROOT.

Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованностью в пределах 2–5 % с опубликованными данными

для измерения v_1 протонов в столкновениях Au+Au при энергии 1,234 ГэВ. Результаты измерения наклона направленного потока $dv_1/dy|_{y=0}$ в области средних быстрот находятся в хорошем согласии (10 %) со значениями, полученными в других экспериментах (STAR, FOPI), и следуют зависимости от энергии столкновения и законам масштабирования коллективных потоков в данной области энергий. Зависимость направленного потока (v_1) протонов от быстроты согласуется в пределах 10 % с расчетами Монте-Карло моделей с импульсно-зависимым потенциалом [20], такими как JAM и UrQMD. Для разработанных методов измерения коллективных анизотропных потоков была исследована эффективность их измерений в эксперименте BM@N с помощью Монте-Карло моделирования и с последующей полной реконструкцией событий. Хорошее согласие в пределах 2–5 % между величинами v_n , полученными из анализа полностью реконструированных в BM@N частиц, и модельными данными говорит о высокой эффективности установки для измерения коллективных потоков.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях: Международная конференция «Ядро» (2020, 2021, 2024, Россия), Международный семинар «Исследования возможностей физических установок на FAIR и NICA» (2021, Россия), Международная научная конференция молодых учёных и специалистов «AYSS» (2022, 2023, 2024, ОИЯИ), Международная конференция по физике элементарных частиц и астрофизике «ICPPA» (2020, 2022, 2024 Россия), Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц (2023, Россия), XXV Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (2023, ОИЯИ), Международный семинар «NICA» (2022, 2023, 2024, Россия), Научная сессия ядерной физики ОФН РАН (2024, 2025, Россия), Международная конференция «HSFI» (2024, Россия), Международный семинар «Россия–Китай на установке NICA» (2024, Китай).

Личный вклад. Диссертация основана на работах, выполненных автором в рамках международных коллабораций: HADES (GSI) в 2019–2022 гг. и BM@N (ОИЯИ) в 2022–2024 гг. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные лично автором или при его определяющем участии в постановке задач, разработке методов их решения, анализе данных, а также в подготовке результатов измерений для публикации от имени коллабораций HADES и BM@N. Кроме того, диссертант принимал участие в наборе экспериментальных данных и контроле их качества.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 статьях [1–9], из них 9 опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе дано описание области исследований диссертационной работы: анизотропные коллективные потоки частиц, образующихся в столкновениях релятивистских тяжелых ионов [14]. Дан обзор исследований направленного (v_1) и эллиптического (v_2) потоков в широком диапазоне энергий столкновения.

Время прохождения сталкивающихся ядер t_{pass} можно оценить как $t_{\text{pass}} = 2R/\sinh(y_{\text{beam}})$, где R и y_{beam} — радиус ядра и быстрота пучка. При энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} > 25$ ГэВ, когда $t_{\text{pass}} < 1$ фм/с, то есть меньше типичного времени расширения материи в области перекрытия ядер (t_{exp}), в гармониках v_n потока доминирует гидродинамическое коллективное расширение КГМ [11].

Оно вызвано наличием начальной пространственной анизотропии области перекрытия ядер и геометрической флуктуации ее

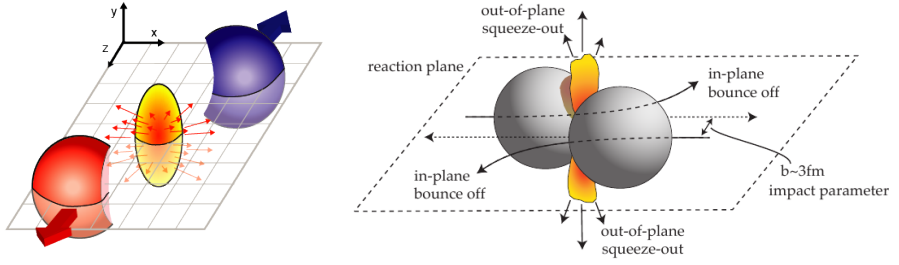


Рис. 1 — Схематичное изображение механизмов происхождения направленного v_1 и эллиптического v_2 потоков в столкновениях ядер при энергиях $\sqrt{s_{NN}} > 25$ ГэВ (слева) и $\sqrt{s_{NN}} = 2\text{--}4$ ГэВ (справа).

формы, которую можно охарактеризовать набором коэффициентов эксцентриситета ε_n . Константа пропорциональности между v_n и ε_n оказывается чувствительной к транспортным свойствам КГМ, таким как соотношения вязкости сдвига к плотности энтропии η/s . Детальное сравнение модельных расчетов с измерениями v_n показывает, что КГМ при энергиях RHIC и LHC по своим свойствам является сильновзаимодействующей, близкой к идеальной, жидкостью со значением η/s , близким к постулированному минимуму $1/(4\pi) \simeq 0,08$ [11; 21]. В ходе программ сканирования по энергии на коллайдере RHIC от $\sqrt{s_{NN}} = 3,0$ до 200 ГэВ в эксперименте STAR было получено много интересных результатов для коллективных потоков [18; 19; 22]. Наклон направленного потока dv_1/dy в области средних быстрот ($y \sim 0$) для протонов и разницы между наклоном dv_1/dy у протонов и анти-протонов показывает сильно немонотонную зависимость от энергии столкновения в области от 3.0 до 39 ГэВ [22]. Это может указывать на «смягчение» уравнения состояния в результате фазового перехода первого рода [21]. Модельные расчеты показывают, что вклад взаимодействия рожденных частиц со зрителями становится значительным для энергий столкновения менее чем $\sqrt{s_{NN}} \sim 7$ ГэВ. Это приводит к росту сигнала направленного потока v_1 и уменьшению сигнала эллиптического потока v_2 нуклонов с уменьшением

энергии столкновения. Поток v_2 протонов меняет свой знак от положительного ($v_2 > 0$) к отрицательному ($v_2 < 0$) при энергии около $\sqrt{s_{NN}} \sim 3,3$ ГэВ [16; 17], см. рис. 1 (справа). В области энергий порядка $\sqrt{s_{NN}} \sim 2\text{--}5$ ГэВ для описания потоков v_1 и v_2 протонов необходимо использовать транспортные модели с импульсно-зависимым потенциалом среднего поля, такие как JAM [20].

Далее в первой главе рассматриваются методы измерения коэффициентов v_n анизотропных потоков, которые можно сформулировать в терминах векторов плоскости симметрии (оценки плоскости реакции) $\mathbf{Q}_n$ и единичных векторов частиц $\mathbf{u}_n$ [14; 23]:

$$v_n(p_T, y) = \langle u_n(p_T, y) Q_n \rangle / R_n, \quad (2)$$

где R_n — разрешение плоскости симметрии и угловые скобки обозначают среднее по частицам в событии и по всем событиям в данной области поперечного импульса p_T и быстроты y . Единичный вектор частиц $\mathbf{u}_{n,k}$ в плоскости (x, y) поперечной оси пучка (z) определяется как $\mathbf{u}_{n,k} = (\cos n\varphi_k, \sin n\varphi_k)$, где φ_k — азимутальный угол частицы k . Двумерный вектор плоскости симметрии $\mathbf{Q}_n$ определяется как сумма единичных векторов $\mathbf{u}_{n,k}$ по группе (N) частиц в событии:

$$\mathbf{Q}_n = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^N w_k \mathbf{u}_{n,k} = \frac{|Q_n|}{C} (\cos \Psi_n, \sin \Psi_n), \quad (3)$$

где Ψ_n — угол плоскости симметрии данного события и w_k — вес, с которым производится усреднение [14; 23]. В методе плоскости события (EP) нормировочный коэффициент $C = |Q_n|$, а в методе скалярного произведения (SP): $C = \sum_{k=1}^N w_k$. Для вычисления разрешения плоскости симметрии R_n используется метод, называемый методом трёх подсобытий [14; 23]:

$$R_n \{a(b, c)\} = \sqrt{(\langle Q_n^a Q_n^b \rangle \langle Q_n^a Q_n^c \rangle) / \langle Q_n^b Q_n^c \rangle}, \quad (4)$$

где a , b и c — три различные группы частиц, в каждой из которых Q_n -вектор вычислялся независимо. Сравнивая v_n , полученный относительно различных плоскостей симметрии (к примеру, $v_n\{a\}$ и $v_n\{b\}$), можно оценить вклад непотоковых корреляций в результаты измерения.

В конце первой главы представлено описание авторской методики измерения v_n в экспериментах на фиксированной мишени с учетом неоднородности азимутального аксептанса установки:

1. В области энергий 1–4А ГэВ поток v_1 является доминирующим сигналом, который не меняет свой знак. Измерение v_n относительно плоскости симметрии спектаторов налетающего ядра Q_1 более устойчиво к непотоковым корреляциям, таким как закон сохранения импульса. Установки HADES [13] и BM@N [12] оборудованы передними модульными детекторами, гранулярность которых позволяет оценить плоскость Q_1 :

$$Q_1 = \sum_{k=1}^N E_k e^{i\varphi_k} / \sum_{k=1}^N E_k, \quad (5)$$

где φ — азимутальный угол k -го модуля детектора, E_k — амплитуда сигнала, зарегистрированного в k -м модуле детектора, которая пропорциональна энергии или заряду частицы. Для измерения v_n используется метод скалярного произведения, который всегда дает оценку $\sqrt{\langle v_n^2 \rangle}$.

2. Систематический вклад азимутальной неоднородности аксептанса детектора может быть оценен сравнением v_n , полученных с использованием x - и y -компонент u_n - и Q_n -векторов [23]: $v_n = 2\langle x_n X_n \rangle / R_n^X = 2\langle y_n Y_n \rangle / R_n^Y$, где x_n и y_n — компоненты u_n -вектора, X_n и Y_n — компоненты Q_n -вектора и $R_n^{X,Y}$ — разрешение плоскости симметрии.

3. Для создания Q_n - и u_n -векторов и их коррекции на неоднородность аксептанса по азимутальному углу, реализации различных методов анализа и оценки статистических неопределенностей с помощью метода бутстреп (bootstrap) был адаптирован пакет объектно-ориентированных библиотек на языке C++ QnTools [24], который был

изначально создан для коллайдерных экспериментов с относительно однородным азимутальным аксептансом. Для конфигурации набора детекторов в QnTools [24] используется менеджер, позволяющий моделировать как трековые, так и модульные детекторы, для каждого из которых можно задать собственный набор поправок. Последовательность корректировки $\mathbf{Q}_n$ -векторов строго определена: сначала центрирование, затем диагонализация и масштабирование [23]. В результате перечисленных операций распределение $\mathbf{Q}_n$ -векторов среди всех событий становится изотропным, как в случае идеального аксептанса.

Во второй главе рассмотрено устройство экспериментальных установок HADES (SIS18, GSI) [13] и BM@N (NICA, ОИЯИ) [12], схематично показанных на рис. 2. Для каждой установки описаны главные детекторные подсистемы, информация из которых была использована в анализе, представленном в данной работе. Для установки HADES это триггерная система (состоящая из алмазных детекторов Start и Veto), трековая система (состоящая из четырех плоскостей многопроволочных дрейфовых камер MDC и тороидального сверхпроводящего магнита), времяпролетная система META (TOF и RPC) и передний сцинтилляционный годоскоп Forward Wall (FW).

Трековая система установки BM@N состоит из четырех станций переднего кремниевых детектора (FSD) и семи станций газoeлектронных умножителей (GEM), расположенных внутри дипольного магнита с большой апертурой, что позволяет восстанавливать импульс p заряженных частиц с разрешением $\Delta p/p \sim 1,7\text{--}2,5\%$. Времяпролетная система, состоящая из двух детекторов TOF400 и TOF700, используется для идентификации заряженных частиц. Передний адронный калориметр (FHCAL) предоставляет информацию о фрагментах спектров налетающего ядра.

В третьей главе представлены результаты апробации авторской методики измерения анизотропных потоков в экспериментах на фиксированной мишени на данных экспериментов HADES [A1; A2; A5; A7; A8] и BM@N [A3; A4; A6; A9]. В первой части представлены де-

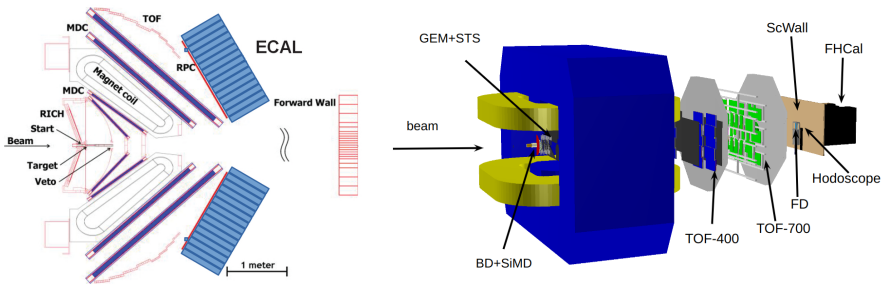


Рис. 2 — Схемы установок HADES [13] (слева) и BM@N [12] (справа).

тали измерения направленного потока v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергиях $E_{\text{kin}} = 1,23\text{A}$ ГэВ и $1,58\text{A}$ ГэВ, на основе анализа данных эксперимента HADES. Описаны методы отбора событий и треков, идентификации протонов методом времени пролета в системе META (TOF+RPC), как показано в левой части рис. 3. Для определения центральности столкновения был использован метод, основанный на Монте-Карло версии модели Глаубера (МК-Глаубер) в применении к распределению суммарной множественности хитов в системе META [25], как показано в правой части рис. 3.

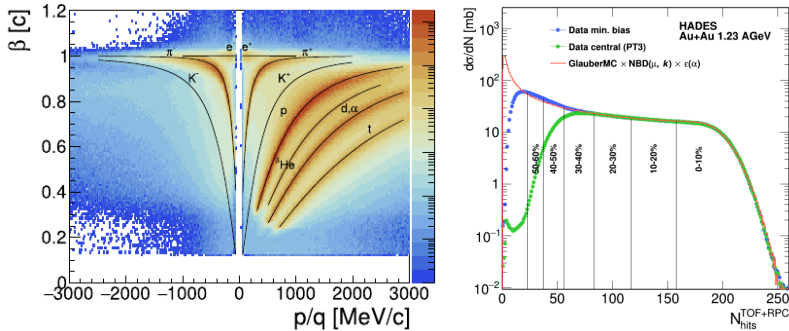


Рис. 3 — Слева: распределение частиц со скоростью β в зависимости от отношения импульса частицы к заряду (p/q). Справа: распределение суммарной множественности хитов в системе META [25].

Коэффициенты v_1 протонов были измерены методом скалярного произведения (формула (2)) как проекции векторов частиц $\mathbf{u}_1$ на

плоскость симметрии первого порядка $\mathbf{Q}_1$. Для оценки плоскости симметрии было построено пять $\mathbf{Q}_1$ -векторов: три основных $\mathbf{Q}_1$ -вектора (формула (5)) из модулей детектора FW (W1, W2 и W3) и два дополнительных $\mathbf{Q}_1$ -вектора из треков протонов (Mb и Mf), как показано на рис. 4.

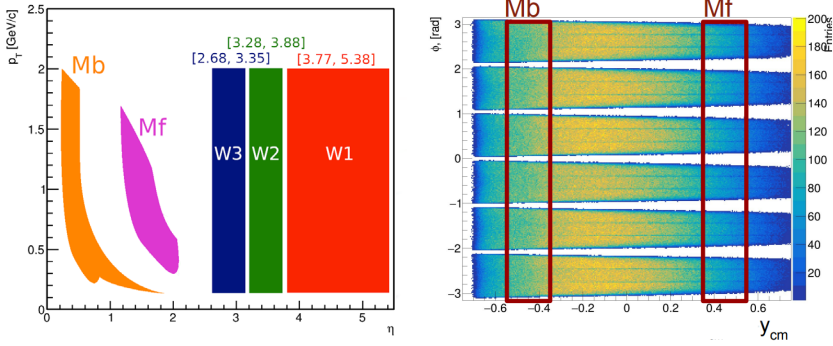


Рис. 4 — Схематическое изображение аксептанса p_T (поперечный импульс) vs η (псевдобыстрота), использованного для построения пяти $\mathbf{Q}_1$ -векторов для анализа v_1 протонов (слева). Азимутальный аксептанс протонов в плоскости ϕ (азимутальный угол) vs y_{cm} (быстрота в система центра масс) (справа) [A1].

На рис. 5 показано сравнение потока v_1 протонов, полученного с использованием x - и y -компонент $\mathbf{u}_1$ - и $\mathbf{Q}_1$ -векторов: XX и YY [A2]. После применения поправок на азимутальную анизотропию аксептанса остаточная разница между компонентами составляет порядка 1–2 %.

Разрешение плоскости симметрии R_1 , полученное методом трех подсобытий (формула (4)) с использованием различных комбинаций $\mathbf{Q}_1$ -векторов, показано на рис. 6 [A2]. Разрешение $R_1\{W1(W2,W3)\}$ заметно отличается от значений, полученных при помощи других комбинаций. Этот эффект может быть объяснен наличием непотоковых корреляций между парами $\mathbf{Q}_1$ -векторов $W1$ и $W2$, $W2$ и $W3$, которые не имеют значительного разделения по быстроте. В столкновениях $Ag+Ag$ $R_1\{W1(Mf,Mb)\}$ также значительно отклоняется от среднего

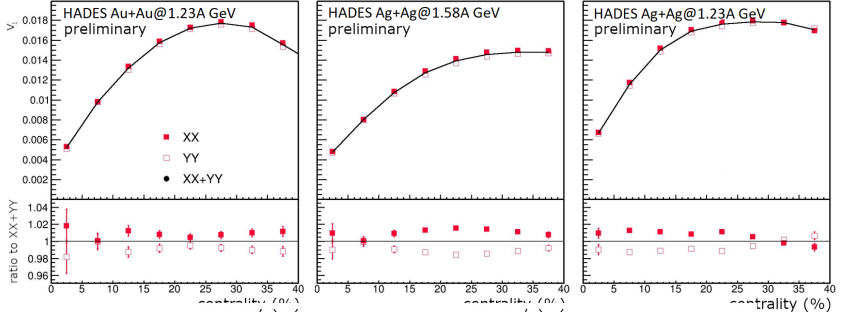


Рис. 5 — Зависимость компонент корреляции $\langle u_1 Q_1 \rangle$ от центральности после применения поправок на азимутальную неоднородность детектора [A2].

результата. Это может быть вызвано наличием корреляций из-за закона сохранения импульса между векторами Mf и Mb . Для Au+Au этот эффект менее выражен в силу большей множественности частиц.

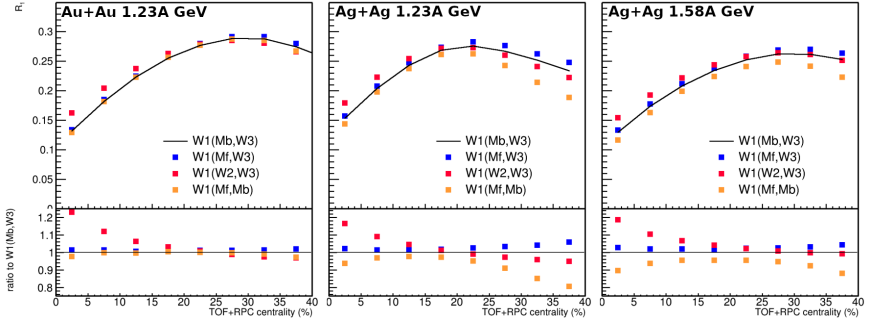


Рис. 6 — Зависимость разрешения R_1 от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов для Au+Au и Ag+Ag столкновений [A7; A8].

На рис. 7 приведено сравнение различных комбинаций Q_1 -векторов, используемых для построения потока v_1 протонов в столкновениях Au+Au и Ag+Ag [A2]. Результаты для v_1 , полученные с комбинациями $W1(Mf, W3)$ и $W1(Mb, W3)$, а также с комбинациями $W3(Mf, W1)$ и $W3(Mb, W1)$, согласуются между собой в пределах 2 %, за исключением центральных столкновений, где разница увеличивается до 5 %. Это указывает на то, что разделения по скорости

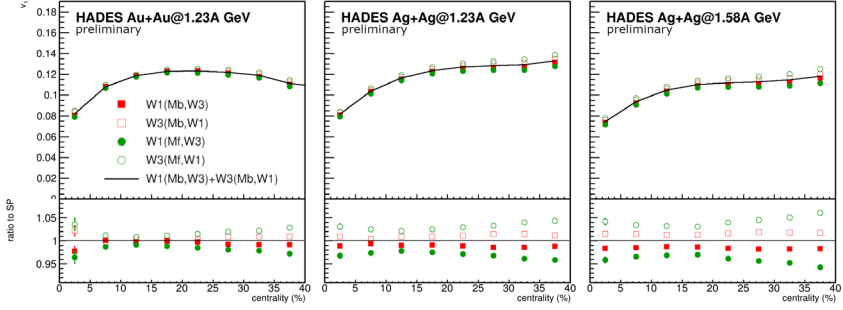


Рис. 7 — Зависимость v_1 протонов от центральности для различных комбинаций $\mathbf{Q}_1$ -векторов для Au+Au и Ag+Ag столкновений [A7; A8].

величиной 0,5 между подсобытиями FW достаточно для подавления непотоковых корреляций. В дальнейшем в качестве значений v_1 протонов было использовано среднее по всем комбинациям $\mathbf{Q}_1$ -векторов, разделенных по скорости. На рис. 8 показана зависимость измеренного направленного потока v_1 протонов от поперечного импульса p_T (слева) и скорости y_{cm} (справа) для 20–30% центральных Au+Au столкновений при энергии $E_{kin} = 1,23A$ ГэВ [A5]. Для сравнения также показаны значения v_1 для дейтронов и тритонов.

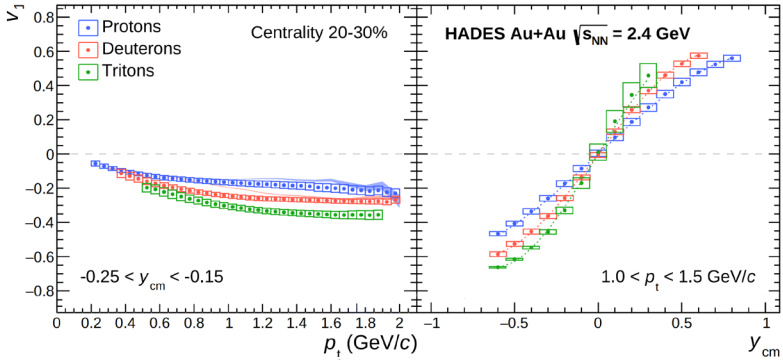


Рис. 8 — $v_1(p_T)$ (слева) и $v_1(y_{cm})$ (справа) для протонов, дейтронов и тритонов в Au+Au столкновениях при энергии $E_{kin} = 1,23A$ ГэВ [A5].

Типичными источниками систематических погрешностей измерений v_1 являются: погрешности в реконструкции треков и определении импульса частиц (1–3 %) в зависимости от p_T и y_{cm} ; изменения критериев отбора кандидатов в протоны по квадрату массы (1–3 %); остаточная разница между компонентами XX и YY корреляции векторов $\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{Q}_1$ (1–2 %); сравнение результатов, полученных методами плоскости события и скалярного произведения (1–4 %); вклад непотоковых корреляций путем сравнения значений v_1 , полученных относительно различных плоскостей симметрии ($W1$, $W2$, $W3$) и деленных на коэффициент разрешения R_1 , рассчитанный с использованием различных комбинаций $\mathbf{Q}_1$ -векторов (3–5 %) [A1; A2; A5].

Во второй части третьей главы представлены детали изучения эффективности измерения анизотропных потоков протонов в эксперименте BM@N на основе анализа полностью реконструированных модельных событий и первых экспериментальных данных для столкновений $\text{Xe}+\text{Cs(I)}$ при энергии $E_{\text{kin}} = 3,8\text{A}$ ГэВ [A3; A6; A9]. Описаны процедуры Монте-Карло моделирования и реконструкции событий на установке BM@N, включая выбор моделей. Для оценки плоскости симметрии было построено пять $\mathbf{Q}_1$ -векторов: три $\mathbf{Q}_1$ -вектора из модулей переднего адронного калориметра FHCAL (F1, F2 и F3) и два дополнительных $\mathbf{Q}_1$ -вектора из треков протонов (Tp) и отрицательных пионов ($T\pi$), как показано на рис. 9.

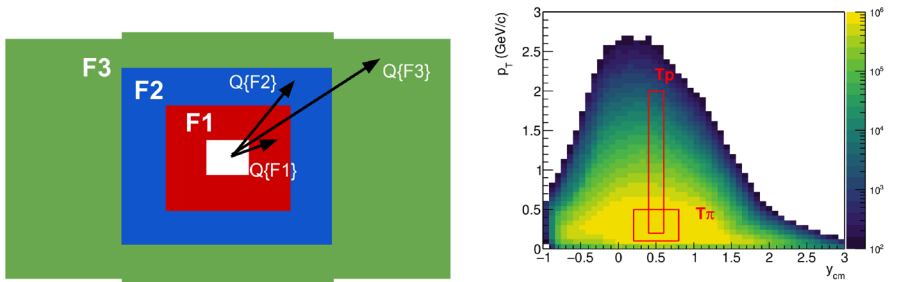


Рис. 9 — Схематическое изображение аксептанса для построения пяти $\mathbf{Q}_1$ -векторов из модулей FHCAL (слева) и треков частиц (справа) [A3; A4; A6].

В плоскости, поперечной направлению пучка, аксептанс установки BM@N имеет прямоугольную форму, что ведет к значительной неоднородности азимутального аксептанса (см. рис. 10 слева). Результат применения коррекций на азимутальную неоднородность представлен на рис. 10 (справа). Разными цветами обозначены значения $v_1(y_{cm})$ протонов для Xe+Cs(I) столкновений при энергии $E_{kin} = 4,0A$ ГэВ из анализа полностью реконструированных событий модели JAM. $v_1(y_{cm})$ были получены с использованием x - и y -компонент $\mathbf{u}_1$ - и $\mathbf{Q}_1$ -векторов: XX (квадраты) и YY (круги). Открытые и закрытые маркеры обозначают результаты до и после коррекции соответственно. Линией обозначены значения v_1 из модели JAM [20]. После применения трех степеней коррекции потоки v_1 , полученные при помощи YY корреляции $\mathbf{u}_1$ - и $\mathbf{Q}_1$ -векторов, хорошо согласуются с результатами из модели. Напротив, значения v_1 , посчитанные с использованием XX -компонент, сильно расходятся с модельными v_1 . Причиной может служить сильное отклонение частиц в направлении оси x в магнитном поле. В связи с этим в дальнейшем для анализа могут быть использованы лишь корреляции YY -компонент $\mathbf{u}_1$ - и $\mathbf{Q}_1$ -векторов.

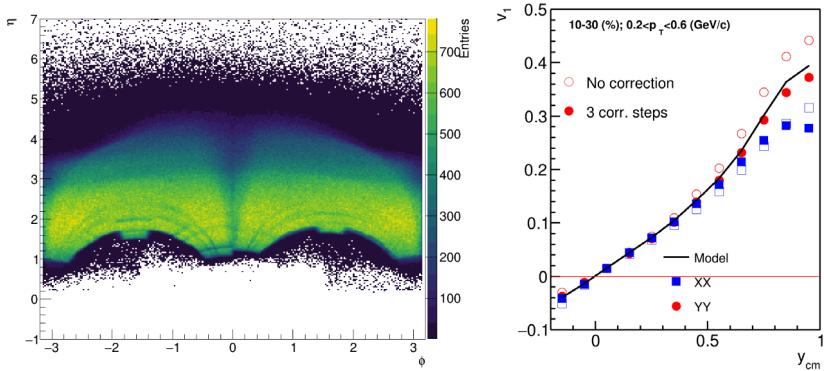


Рис. 10 — Азимутальный аксептанс трековой системы в зависимости от псевдобыстроты (η) BM@N (слева). Сравнение $v_1(y_{cm})$ протонов в модельных столкновениях Xe+Cs(I) для x - и y -компонент $\mathbf{u}_1$ - и $\mathbf{Q}_1$ -векторов: XX и YY (справа) до и после коррекции на азимутальную неоднородность аксептанса детектора [A3; A4; A6].

На рис. 11 представлена зависимость разрешения R_1 плоскостей симметрии $F1$, $F2$ и $F3$ от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов из анализа полностью реконструированных модельных данных для $\text{Xe}+\text{Cs(I)}$ при $E_{\text{kin}} = 4,0\text{A}$ ГэВ. Значения R_1 , полученные при помощи разделенных по быстроте комбинаций, согласуются между собой в пределах статистической ошибки. Значительное отличие значений R_1 , полученных с использованием комбинаций не разделенных по быстроте Q_1 -векторов, может быть объяснено распространением адронного ливня в поперечном направлении, что вызывает дополнительные корреляции между векторами $F1$ и $F2$, и $F1$ и $F3$ [A3]. Значения R_1 , полученные при помощи разделенных по быстроте комбинаций, хорошо согласуются между собой и для экспериментальных данных BM@N для столкновений $\text{Xe}+\text{Cs(I)}$ при энергии $E_{\text{kin}} = 3,8\text{A}$ ГэВ, как показано на рис. 12 [A9].

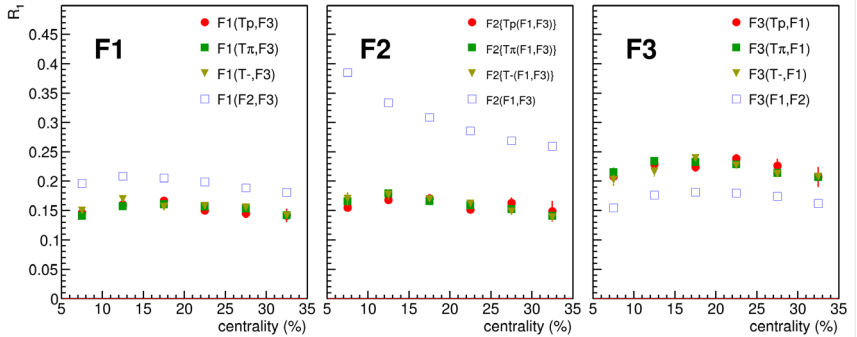


Рис. 11 — Зависимость разрешения R_1 плоскостей симметрии $F1$ – $F3$ от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов [A3; A4; A6].

В четвертой главе приведены основные результаты измерения направленного потока v_1 протонов в эксперименте HADES и результаты исследования эффективности измерения v_n протонов в эксперименте BM@N. На рис. 13 представлена зависимость v_1 протонов от быстроты y_{cm} (слева) для 15–20% центральных $\text{Au}+\text{Au}$ и $\text{Ag}+\text{Ag}$ столкновений [A7; A8]. Значения v_1 в столкновениях $\text{Au}+\text{Au}$ и $\text{Ag}+\text{Ag}$

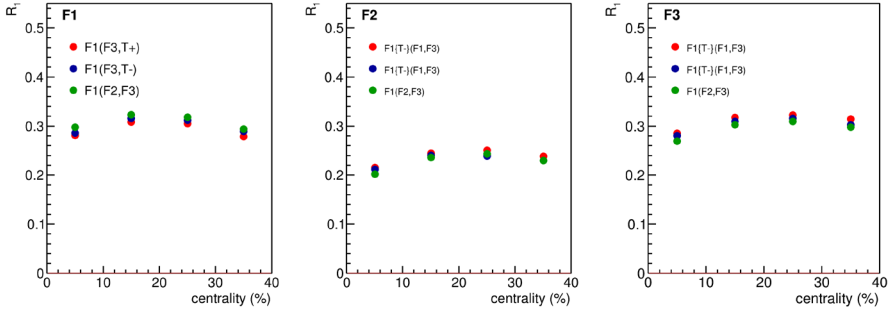


Рис. 12 — Зависимость разрешения плоскостей симметрии $F1$, $F2$ и $F3$ от центральности из анализа экспериментальных данных BM@N для столкновений Xe+Cs(I) при энергии $E_{\text{kin}} = 3,8A$ ГэВ [A9].

при энергии $E_{\text{kin}} = 1,23A$ ГэВ хорошо согласуются с учетом систематических ошибок. Протоны в столкновениях Ag+Ag при большей энергии $E_{\text{kin}} = 1,58A$ ГэВ обладают меньшим значением v_1 . Модель JAM [20] с импульсно зависимым потенциалом среднего поля MD2 хорошо описывает зависимость v_1 от быстроты y_{cm} , как показано линиями на левой части рис. 13.

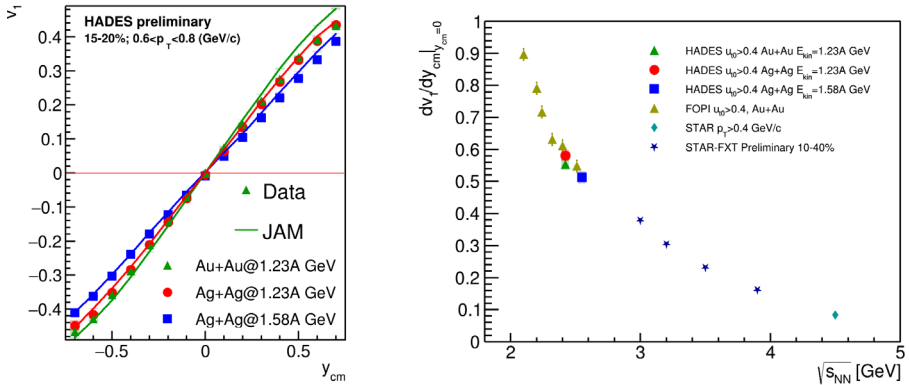


Рис. 13 — Слева: сравнение $v_1(y_{cm})$ протонов для столкновений Au+Au и Ag+Ag с расчетами модели JAM. Справа: зависимость $dv_1/dy|_{y_{cm}=0}$ протонов в Au+Au/Ag+Ag столкновениях от энергии $\sqrt{s_{NN}}$ [A4; A7; A8].

Зависимость v_1 протонов от быстроты y_{cm} была параметризована кубической функцией $v_1(y_{cm}) = a_0 + a_1 y_{cm} + a_3 y_{cm}^3$. Затем наклон направленного потока $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ в области средних быстрот $y_{cm} \sim 0$ был извлечен как параметр a_1 . Полученные значения $dv_1/dy|_{y_{cm}=0}$ протонов в столкновениях Au + Au и Ag + Ag хорошо согласуются с измерениями других экспериментов [18; 19; 26], как показано на рис. 13 (справа) [A7; A8].

На рис. 14 слева приведена зависимость наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ протонов от центральности столкновения. Поскольку при большей энергии время прохождения сталкивающихся ядер $t_{\text{pass}} = 2R/\sinh(y_{\text{beam}})$ меньше, наклон v_1 протонов в столкновениях Ag+Ag при энергии $E_{\text{kin}} = 1,58A$ ГэВ заметно меньше, чем при $E_{\text{kin}} = 1,23A$ ГэВ. Для коррекции на время t_{pass} наклон $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ был нормирован на быстроту пучка y_{beam} : $dv_1/dy'|_{y'=0}$, где $y' = y_{cm}/y_{\text{beam}}$. За исключением наиболее центральных событий, зависимость наклона $dv_1/dy'|_{y'=0}$ от центральности описывается одной кривой для всех трех наборов данных, см. центральную часть рис. 14. В каждом классе центральности был вычислен средний прицельный параметр $\langle b \rangle$ из модели Глаубера. Радиус ядра пропорционален корню кубическому из массового числа $r_N \propto A^{1/3}$. Для учета зависимости от размера сталкиваемых ядер $\langle b \rangle$ в каждом классе по центральности был нормирован на $A^{1/3}$. Наклон $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функция относительного прицельного параметра $\langle b \rangle/A^{1/3}$ представлен на рис. 14 справа. Данное преобразование улучшило согласие зависимостей наклона v_1 в центральных событиях [A7; A8].

На рис. 15 показаны результаты сравнения значений $v_1(y_{cm})$ (слева) и $v_2(p_T)$ (справа) протонов из анализа полностью реконструированных в ВМ@N модельных данных (маркеры) и напрямую из модели JAM для Xe+Cs(I) столкновений при энергиях $E_{\text{kin}} = 2, 3$ и $4A$ ГэВ [A4; A6]. Между значениями v_n , извлеченными из модели, и результатами анализа полностью реконструированных событий наблюдается согласие в пределах статистических ошибок.

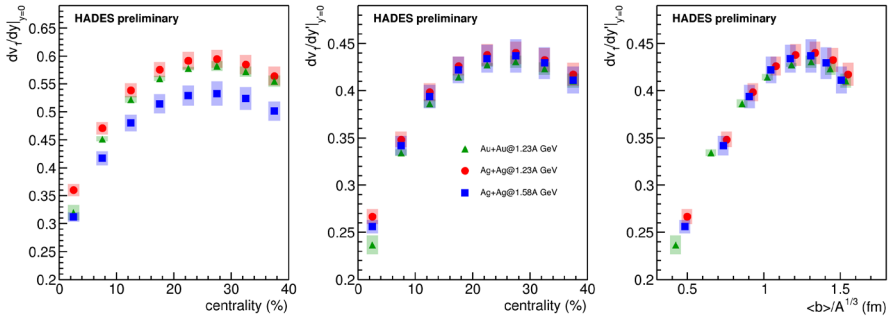


Рис. 14 — Зависимость $dv_1/dy|_{y=0}$ протонов от центральности: для $y = y_{cm}$ (слева), для y_{cm} , номированной на быстроту пучка, $y' = y_{cm}/y_{beam}$ (в центре) и для $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функции $\langle b \rangle/A^{1/3}$ (справа) [A4; A7; A8].

С использованием разработанных методов была получена зависимость направленного потока $v_1(y_{cm})$ протонов от быстроты y_{cm} на основе анализа первых экспериментальных данных BM@N для столкновений ядер Xe+Cs(I) при энергии $E_{kin} = 3,8A$ ГэВ, как показано на рис. 16 [A9]. Экспериментальная зависимость $v_1(y_{cm})$ согласуется с теоретической зависимостью из модели JAM в пределах 8% при быстротах $y_{cm} < 1$. Полученные результаты анализа полностью реконструированных модельных данных и первых экспериментальных данных позволяют сделать вывод о высокой эффективности установки BM@N для измерения анизотропных потоков [A9].

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан метод учета корреляций, не связанных с коллективным движением рожденных частиц (непоточковых корреляций), и изучено их влияние на результаты измерения коллективных потоков в области энергий 1,2–4A ГэВ.
2. Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а также наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}}$ в области средних

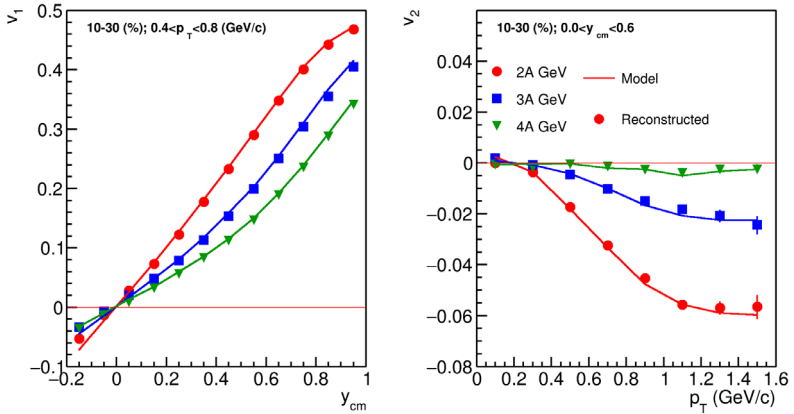


Рис. 15 — Сравнение $v_1(y_{cm})$ (слева) и $v_2(p_T)$ (справа) протонов из анализа полностью реконструированных данных (маркеры) и модели (линии) для Xe+Cs(I) столкновений при энергиях 2–4A ГэВ [A3; A6; A9].

быстрот в столкновениях Au + Au при энергии $E_{kin} = 1,23A$ ГэВ и Ag + Ag при энергиях $E_{kin} = 1,23A$ и $E_{kin} = 1,58A$ ГэВ в эксперименте NADES. Полученные новые результаты измерения v_1 протонов современными методами анализа являются принципиально важными для проверки и дальнейшего развития теоретических моделей ядроядерных столкновений.

3. Обнаружено масштабирование направленного потока протонов с временем пролета ядер t_{pass} и геометрией столкновения в области энергий $E_{kin} = 1,23A$ и $E_{kin} = 1,58A$ ГэВ, что позволяет оценить влияние спектаторов налетающего ядра на формирование направленного потока протонов.

4. На основе моделирования установки детально изучены возможности измерения коллективных потоков протонов на экспериментальной установке BM@N (NICA), что позволило расширить существующую физическую программу эксперимента.

Разработанные автором методы измерения анизотропных потоков планируется применить для получения результатов v_1 для заряженных адронов, легких ядер и гиперонов в эксперименте BM@N.

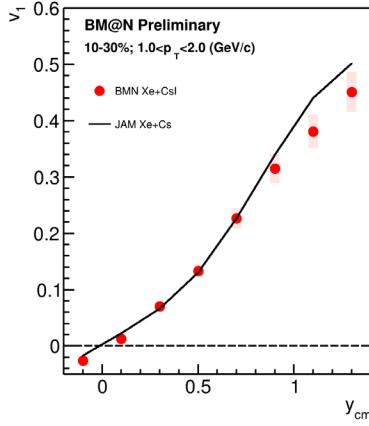


Рис. 16 — Сравнение результатов эксперимента BM@N для зависимости $v_1(y_{cm})$ протонов (символы) для 10–30 % центральных Xe+Cs(I) столкновений при энергии $E_{kin} = 3,8A$ ГэВ с расчетами модели JAM [A9].

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Mamaev M., Golosov O., Selyuzhenkov I. Directed flow of protons with the event plane and scalar product methods in the HADES experiment at SIS18 // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012122.
- A2. Mamaev M., Golosov O., Selyuzhenkov I. Estimating Non-Flow Effects in Measurements of Anisotropic Flow of Protons with the HADES Experiment at GSI // Phys. Part. Nucl. — 2022. — Т. 53, № 2. — С. 277–281.
- A3. Mamaev M. Performance Towards Spectator Symmetry Plane Estimation Using Forward Hadron Calorimeter in the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — Т. 20, № 5. — С. 1205–1208.

- A4. Mamaev M., Taranenko A. Toward the System Size Dependence of Anisotropic Flow in Heavy-Ion Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2\text{--}5$ GeV // Particles. — 2023. — T. 6, № 2. — C. 622–637.
- A5. Adamczewski-Musch J., Mamaev M., HADES Collaboration. Directed, Elliptic, and Higher Order Flow Harmonics of Protons, Deuterons, and Tritons in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ GeV // Phys. Rev. Lett. — 2020. — T. 125. — C. 262301.
- A6. Mamaev M. Baryonic Matter @ Nuclotron: Upgrade and Physics Program Overview // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — T. 87, № 1. — C. 311–318.
- A7. Mamaev M. On the Azimuthal Flow of Protons in the Heavy Ion Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2\text{--}4$ GeV // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — T. 21, № 4. — C. 661–663.
- A8. Mamaev M. On the Scaling Properties of the Directed Flow of Protons in Au + Au and Ag + Ag Collisions at the Beam Energies of 1.23 and 1.58 A GeV // Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — T. 55, № 4. — C. 832–835.
- A9. Mamaev M. Directed flow of protons in Xe+CsI collisions at the energy of 3.8 A GeV at BM@N (NICA) // Int. J. Mod. Phys. E. — 2024. — T. 33, № 11. — C. 2441009.

Список литературы

- 10. Danielewicz P., Lacey R., Lynch W. G. Determination of the equation of state of dense matter // Science. — 2002. — T. 298. — C. 1592–1596.
- 11. Sorensen A., et. al. Dense nuclear matter equation of state from heavy-ion collisions // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2024. — T. 134. — C. 104080.

12. Afanasiev S., et. al. The BM@N spectrometer at the NICA accelerator complex // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2024. — T. 1065. — C. 169532.
13. Agakishiev G., et. al. The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES // Eur. Phys. J. A. — 2009. — T. 41. — C. 243—277.
14. Voloshin S. A., Poskanzer A. M., Snellings R. Collective phenomena in non-central nuclear collisions // Landolt-Bornstein / под ред. R. Stock. — 2010. — T. 23. — C. 293—333.
15. Pinkenburg C., et. al. Elliptic flow: Transition from out-of-plane to in-plane emission in Au + Au collisions // Phys. Rev. Lett. — 1999. — T. 83. — C. 1295—1298.
16. Liu H., et. al. Sideward flow in Au + Au collisions between 2-A-GeV and 8-A-GeV // Phys. Rev. Lett. — 2000. — T. 84. — C. 5488—5492.
17. Chung P., et. al. Differential elliptic flow in 2-A-GeV - 6-A-GeV Au+Au collisions: A New constraint for the nuclear equation of state // Phys. Rev. C. — 2002. — T. 66. — C. 021901.
18. Adam J., et. al. Flow and interferometry results from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ GeV // Phys. Rev. C. — 2021. — T. 103, № 3. — C. 034908.
19. Abdallah M. S., et. al. Disappearance of partonic collectivity in $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV Au+Au collisions at RHIC // Phys. Lett. B. — 2022. — T. 827. — C. 137003.
20. Nara Y. JAM: an event generator for high energy nuclear collisions // EPJ Web of Conferences. T. 208. — EDP Sciences. 2019. — C. 11004.
21. Taranenko A. Anisotropic flow measurements from RHIC to SIS // EPJ Web Conf. — 2019. — T. 204. — C. 03009.
22. Adamczyk L., et. al. Beam-Energy Dependence of Directed Flow of Λ , $\bar{\Lambda}$, $K^\pm$, K_s^0 and ϕ in Au+Au Collisions // Phys. Rev. Lett. — 2018. — T. 120, № 6. — C. 062301.

23. Selyuzhenkov I., Voloshin S. Effects of non-uniform acceptance in anisotropic flow measurement // Phys. Rev. C. — 2008. — Т. 77. — С. 034904.
24. Kreis L., Selyuzhenkov I. QnTools analysis framework. —. — URL: <https://github.com/HeavyIonAnalysis/QnTools>.
25. Adamczewski-Musch J., et. al. Centrality determination of Au + Au collisions at 1.23A GeV with HADES // Eur. Phys. J. A. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 85.
26. Reisdorf W., et. al. Systematics of azimuthal asymmetries in heavy ion collisions in the 1 A GeV regime // Nucl. Phys. A. — 2012. — Т. 876. — С. 1–60.

Научное издание

Мамаев Михаил Валерьевич

Исследование направленного потока протонов
в ядро-ядерных столкновениях
при энергиях $E_{kin}=1.2—4\text{ А ГэВ}$

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 05.06.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 030/25 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