


На правах рукописи



Мамаев Михаил Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО
ПОТОКА ПРОТОНОВ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ
СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ
 $E_{KIN} = 1.2 - 4A$ ГЭВ

Специальность 1.3.15 —
«Физика атомного ядра и элементарных частиц. Физика
Высоких энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в **федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

Научный руководитель: **к.ф-м. н., доцент
Тараненко Аркадий Владимирович**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием**

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY** г. в **XX** часов на заседании диссертационного совета **NN** на базе **Название учреждения** по адресу: **Адрес**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm YYYY** года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
NN, д-р физ.-мат. наук

Sign

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Уравнение состояния (EOS) - описывает фундаментальные свойства ядерной материи, ее макроскопические свойства, обусловленные лежащими в основе сильными взаимодействиями. Вблизи плотности насыщения ядерной материи ρ_0 , $\rho_0 = 0.16^{-3}$, EOS контролирует структуру ядер через энергию связи и несжимаемость K_{nm} [B B1]. EOS также определяет толщину нейтронной оболочки в нейтронно-избыточных ядрах, а также свойства ядерной материи при экстремальных плотностях и/или температурах, соответствующих условиям, возникающим в экспериментах со столкновением релятивистских тяжелых ядер или наблюдаемым в нейтронных звездах и слияниях нейтронных звезд. Более того, исследования показывают, что столкновения тяжелых ионов при энергиях пучка $E_{kin}=1.23-10A$ ГэВ (соответствующих энергиям в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 2.4-5$ ГэВ) и слияния нейтронных звезд обнаруживают сходные температуры ($T \sim 50-100$ МэВ) и плотности барионов $\rho \sim (2 - 5)\rho_0$ [B2; B3]. Не ограничиваясь описанием свойств материи, состоящей только из протонов и нейтронов, EOS может также отражать появление новых степеней свободы, например, странных частиц в ядрах нейтронных звезд или кварков и глюонов в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Считается, что столкновения ультра-релятивистских тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере (LHC) и релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC), где плотность барионов крайне мала, привели к образованию новой формы материи с партонами степенями свободы, обычно называемой сильносвязанной кварк-глюонной материей (КГМ) [B4]. После открытия КГМ на коллайдере RHIC в 2005 году изучение уравнения состояния квантовой хромодинамики (КХД) в области высоких барионных плотностей стали главной целью программ сканирования по энергии в экспериментах: STAR на коллайдере RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 3 - 27$ ГэВ), NA61/SHINE на ускорителе SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 5.2 - 17$ ГэВ) [B5], BM@N на ускорителе Nuclotron ($\sqrt{s_{NN}} = 2.3 - 3.5$ ГэВ) [B6] и HADES на ускорителе SIS18 ($\sqrt{s_{NN}} = 2.3 - 2.55$ ГэВ) [B7]. Строящиеся ускорители FAIR ($\sqrt{s_{NN}} = 3 - 5$ ГэВ) и NICA ($\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ) позволят изучить область высоких барионных плотностей еще более детально.

Ключевую роль в открытии КГМ и определении ее ключевых транспортных свойств сыграли измерения анизотропных коллективных потоков

рожденных адронов. Величина анизотропных потоков определяется коэффициентами ряда Фурье v_n в разложении азимутального распределения частиц относительно угла плоскости реакции Ψ_{RP} , определяемой осью пучка и вектором прицельного параметра [B8]:

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

где n – порядок гармоники и φ – азимутальный угол импульса частиц. Коэффициенты потоков v_n можно определить путем усреднения косинуса разности углов $(\varphi - \Psi_{RP})$ по частицам и событиям: $v_n = \langle \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})) \rangle$. Благодаря своей чувствительности к деталям начального состояния сильновзаимодействующей материи и ранним временам столкновения, первые два коэффициента разложения Фурье v_1 (направленный поток) и v_2 (эллиптический поток) являются одними из самых чувствительных к EOS сигналами. 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 $E_{kin} = 2-8A$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2.7-4.3$ ГэВ), выполненных экспериментом E895 на ускорителе AGS, с теоретическими предсказаниями [B9–B11]. 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 [B1]. В дополнение, новые экспериментальные измерения первых двух гармоник коллективных потоков протонов, выполненные экспериментом STAR на коллайдере RHIC для данных энергий, не согласуются с результатами эксперимента E895. 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 экспериментом E895, не учитывал влияние непотоковых корреляций на измерения v_n . К непотоковым корреляциям можно отнести следующие эффекты: 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 сильно-взаимодействующей материи. В 2019 году эксперимент HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) [B7], расположенный на ускорителе SIS-18 в GSI, набрал порядка 2 млрд событий столкновений Ag+Ag при энергиях $E_{kin} = 1.23$ АГэВ и 1.58 АГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2.4$ ГэВ и 2.55 ГэВ), которые дополнили существующие данные для столкновений Au+Au при энергии $E_{kin} = 1.23$ АГэВ. Это позволило впервые провести высокоточные измерения направленного потока v_1 протонов используя современные методики подавляющие вклад непотоковых корреляций. 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 на первом в России эксперименте по изучению столкновений релятивистских ядер BM@N (Барионная Материя на Нуклотроне) на новом ускорительном комплексе NICA (ОИЯИ, Дубна), в ходе которого было набрано порядка 500 М событий столкновений ядер Xe+Cs(I) при энергии $E_{kin} = 3.8$ АГэВ. 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 $E_{kin}=1.23-1.58$ А ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}=2.4-2.55$ ГэВ) в эксперименте HADES (GSI), а также изучение возможности проведения измерений коллективной анизотропии в эксперименте BM@N (NICA, ОИЯИ). 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 (непотоковых 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 $E_{kin}=1.23-1.58A$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}=2.4-2.55$ 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 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 $E_{kin}=1.23-1.58A$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}=2.4-2.55$ ГэВ) в эксперименте HADES.
2. 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 акспетанса установки.
3. Результаты сравнения измеренных значений направленного потока (v_1) с расчетами в рамках современных моделей ядро-ядерных столкновений, проверка эффекта масштабирования v_1 с энергией столкновения и геометрией области перекрытия.
4. Получена оценка 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 получены новые экспериментальные измерения направленного потока v_1 протонов с учетом вклада непотоковых корреляций для для ядро-ядерных столкновений (Au + Au, Ag + Ag) при энер-

гиях $E_{kin} = 1.23-1.58A$ ГэВ ($\sqrt{s_{NN}}=2.4-2.55$ 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, получению 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, Дармштадт), была адаптирована к условиям установки BM@N (NICA, ОИЯИ), 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 $E_{kin} = 3.8$ АГэВ. Данные результаты важны и для будущего эксперимента MPD (NICA), который также может работать в режиме эксперимента на фиксированной мишени.

Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованностью с опубликованными данными для измерения v_1 протонов в столкновениях Au + Au при энергии 1.23A ГэВ. Результаты измерения для наклона направленного потока $dv_1/dy|_{y=0}$ в области средних быстрых находятся в хорошем согласии со значениями с других экспериментов (STAR, FORI) и следуют зависимости от энергии столкновения и законам масштабирования коллективных потоков в данной области энергий. Зависимости направленного потока (v_1) протонов от скорости и поперечного импульса также согласуются с расчетами Монте-Карло моделей со импульсно-зависимым потенциалом [B12], 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 последующий полной реконструкции событий. Хорошее согласие между величинами v_n , полученными из анализа полностью реконструированных в BM@N частиц и модельных данных, 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, ОИЯИ), Международная конференция по физике элементарных частиц и астрофизике «ICPPA» (2020, 2022, 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, Россия).

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 лица 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 8 статьях, которые опубликованы в периодических научных журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus.

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 первом разделе **первой главы** кратко обсуждается статус теоретических и экспериментальных исследований направленного (v_1) и эллиптического (v_2) потоков, которые начались более 30 лет назад в экспериментах на ускорителе BEVALAC [B8].

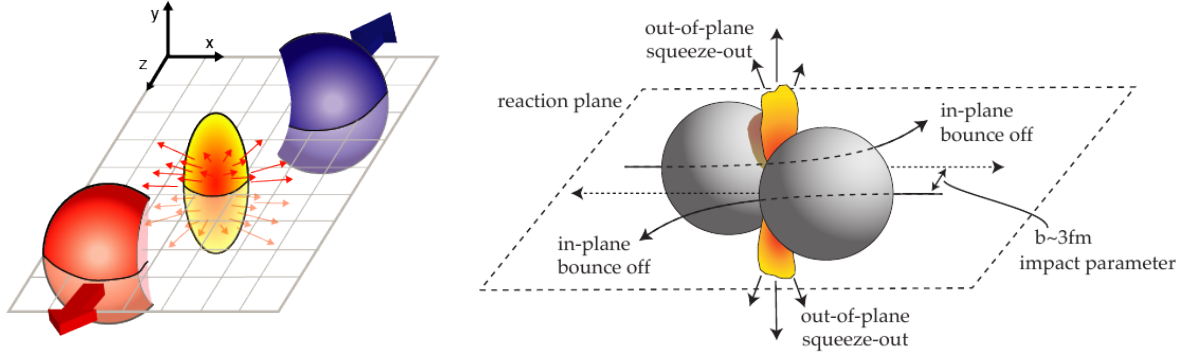


Рис. 1 — Схематичное изображение механизмов происхождения направленного v_1 и эллиптического v_2 потоков в столкновениях ядер при энергиях $\sqrt{s_{NN}} > 25$ ГэВ (слева) и $\sqrt{s_{NN}} = 2-4$ ГэВ (справа).

При высоких энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} > 25$ ГэВ, когда время прохождения сталкивающихся ядер ($t_{pass} < 1$ фм/с) меньше типичного времени расширения материи в области перекрытия ядер (t_{exp}), в гармониках v_n потока доминирует гидродинамическое коллективное расширение КГМ. Оно вызвано наличием начальной пространственной анизотропии области перекрытия ядер и геометрической флуктуации ее формы, которую можно охарактеризовать набором коэффициентов эксцентриситета ε_n , как схематически изображено на рис. 1 (слева). 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 , что КГМ при энергиях RHIC и LHC по своим свойствам является сильновзаимодействующей, близкой к идеальной, жидкости со значением η/s , близким к постулированному минимуму $1/(4\pi) \simeq 0.08$. Сравнение с расчетами транспортных моделей (RQMD, UrQMD и JAM), в которых нет формирования КГМ, показывают, что перерасcеяние адронов может воспроизвести только 20-30% от наблюдаемой величины сигнала (v_n) потоков на RHIC. В ходе программ сканирования по энергии на коллайдере RHIC от $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ до 200 ГэВ коллаборацией STAR было получено много интересных результатов для коллективных потоков. Наклон прямого 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. Это может указывать на “смягчение” уравнения состояния в резуль-

тате фазового перехода первого рода. 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. v_2 протонов меняет свой знак от положительного к отрицательному при энергии около 4 ГэВ, см рис. 1 (справа). В области энергий порядка $\sqrt{s_{NN}} \sim 2-5$ ГэВ для описания v_1 и v_2 протонов необходимо использовать транспортные модели с импульсно-зависимым потенциалом среднего поля, такие как JAM [B12].

Во втором разделе первой главы рассматриваются методы измерения азимутальных коллективных потоков, которые можно сформулировать в терминах единичного вектора частиц $u_{n,k} = (\cos n\varphi_k, \sin n\varphi_k)$ в плоскости поперечной оси пучка и вектора потока Q_n гармоники n :

$$Q_n = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^N w_k u_{n,k} = \frac{|Q_n|}{C} (\cos \Psi_n, \sin \Psi_n), \quad (2)$$

где Ψ_n — угол плоскости симметрии данного события. Сумма проходит по всем частицам в случае трекового детектора или по модулям детекторов с азимутальной сегментацией. Угол φ_k является азимутальным углом вылета частицы k или азимутальной координатой k -го элемента сегментированного детектора. Для треков вес w_k может быть единицей или заданной функцией p_T . Для сегментированных детекторов в качестве веса w_k используется сигнал, наблюдаемый в k -м сегменте детектора: заряд частиц или энергия. В методе плоскости события (EP) нормировочный коэффициент $C = |Q_n|$, а в методе скалярного произведения (SP) нормировка производится на множественность частиц в Q_n : $C = \sum_{k=1}^N w_k$. Тогда значение v_n определяется как проекция u_n -вектора на плоскость симметрии события:

$$v_n = v_n^{obs} / R_n = \langle u_n Q_n^* \rangle / R_n, \quad (3)$$

где R_n - разрешение плоскости симметрии и угловые скобки обозначают среднее по всем частицам в событии и по всем событиям. Для вычисления R_n

используется метод, называемый методом трёх подсобытий:

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

где a , b и c — три различных 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 непо- токовых корреляций в результаты измерения.

Неоднородность азимутального аксептанса детектора искажает рас- пределение Q_n -вектора, которое в идеальном случае должно быть равномер- ным. Для коррекции этого эффекта был использован метод, описанный в ра- боте [B13]. Поскольку плоскость реакции распределена равномерно, форму- лу (3) можно преобразовать следующим образом:

$$v_n = 2\langle x_n X_n \rangle / R_n^X = 2\langle y_n Y_n \rangle / R_n^Y, \quad (5)$$

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, вычисленное при помощи корреляций компонент Q_n -векторов. Систематический вклад азимутальной неоднородности аксептанса детектора может быть оценен сравнением резуль- татов полученных с использованием различных компонент u_n и Q_n -векторов. В области энергий 1-4 АГЭВ направленный поток v_1 является доминирующим сигналом, который не меняет свой знак, поэтому v_1 и более высокие гармо- ники вычисляются относительно плоскости симметрии первой гармоники Ψ_1 .

В первом разделе **второй главы** приведено описание эксперимента на фиксированной мишени HADES [B7], который состоит из тороидального сверхпроводящего магнита, центрированного вокруг оси пучка, с шестью оди- наковыми секторами регистрации, см. рис. 2 (слева). Трекингвая система, состоит из четырёх плоскостей многопроводочных дрейфовых камер (MDC). Идентификация заряженных частиц проводится одновременно используя вре- мяпролётную систему TOF+RPC и по энергосодержанию в камерах MDC. Сцинтилляционный годоскоп Forward Wall (FW), расположенный на расстоя-

нии 6.8 m от мишени, предназначен для регистстрации заряженных фрагментов спектаторов налетающего ядра.

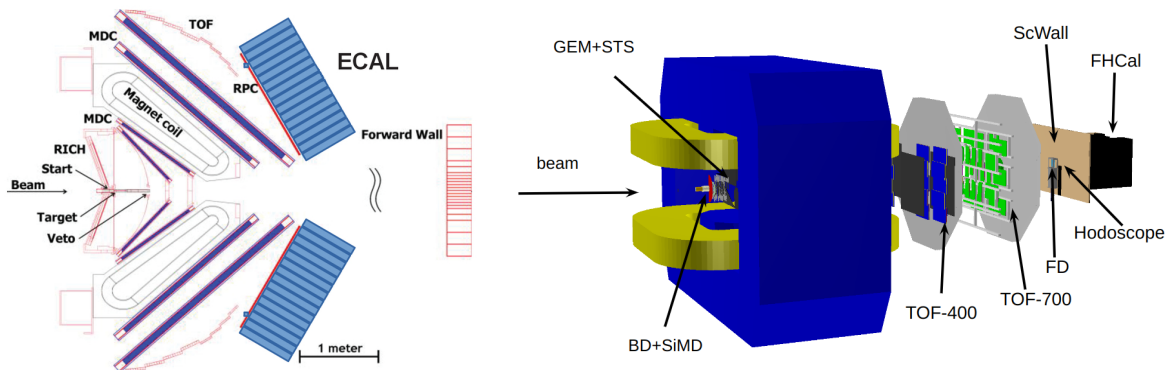


Рис. 2 — Схема экспериментов HADES (слева) и BM@N (справа).

Во втором разделе **второй главы** представлено краткое описание экспериментальной установки BM@N (см. рис. 2 (справа)). Центральная трековая система BM@N состоящая из 4 станций двусторонних кремниевых микрополосковых датчиков (STS) и 7 станций камер газообразных электронных умножителей (GEM) расположена внутри дипольного магнита с большой апертурой, что позволяет восстанавливать импульс p заряженных частиц с разрешением $\Delta p/p \sim 1.7-2.5\%$ для энергий порядка 3.5–4А ГэВ. Время-пролетная система, состоящая из двух детекторов TOF400 и TOF700, используется для идентификации заряженных частиц. Три передних детектора: передний адронный калориметр (FHCal), кварцевый годоскоп (Hodo) и сцинтиляционная стенка (ScWall) предоставляют информацию о фрагментах спектаторов налетающего ядра. В феврале 2023 года закончился первый набор физических данных, в ходе которого BM@N набрал порядка 500 М событий столкновений ядер Xe+Cs(I) при энергии $E_{kin} = 3.8$ АГэВ.

Третья глава Рассматривается разработанная автором методика измерения направленного потока v_1 протонов в эксперименте HADES. Первая часть посвящена отбору событий для анализа. Для анализа использовались только события столкновений, вершина которых лежала в следующих границах: $\sqrt{x_v^2 + y_v^2} < 3$ мм и $z_v \in (-60, 0)$ мм. Треки частиц были выбраны в соответствии с параметром качества $\chi^2 < 100$, предоставленным алгоритмом фитирования трека, и ограничением на минимальное расстояние сближения трека с вершиной (DCA): $(-10, 10)$ мм. Протоны идентифицировались при помощи информации из системы TOF+RPC (см. рис. 3 (слева)).

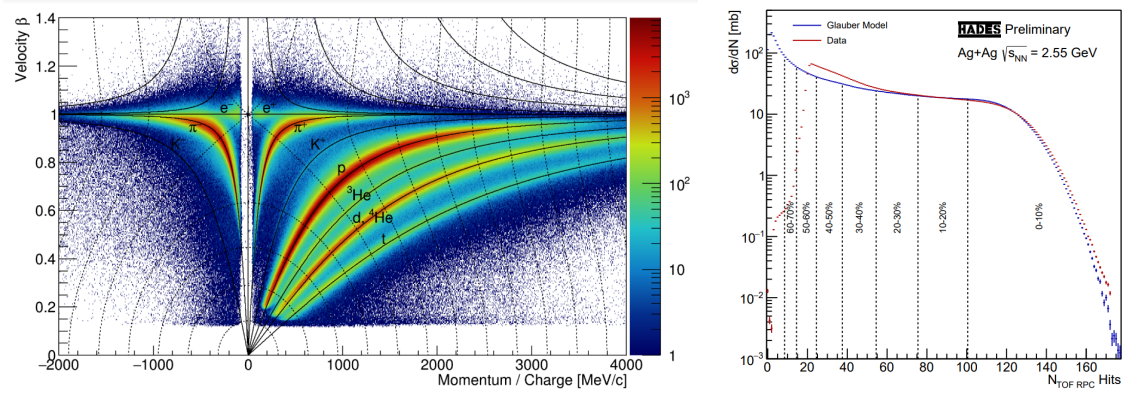


Рис. 3 — Слева: распределение частиц со скоростью β в зависимости от импульса частицы к заряду (p/q). Справа: пример распределения суммарной множественности хитов в системе TOF+RPC.

Распределение суммарной множественности хитов в системе TOF+RPC было использовано для определения центральности столкновений, используя метод подгонки Монте-Карло версией модели Глаубера [B14](см. рис. 3 (справа)).

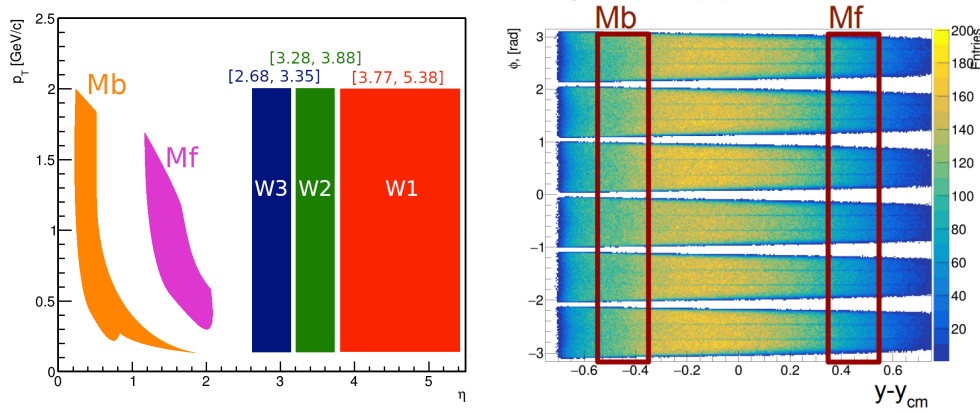


Рис. 4 — Схематическое изображение аксептанса p_T vs η , использованного для построения пяти Q_1 -векторов для анализа v_1 протонов (слева). Азимутальный аксептанс протонов в плоскости ϕ vs y_{cm} (справа).

Для оценки плоскости симметрии модули детектора FW были разделены на 3 группы: центральные (W1), средние (W2) и периферические (W3). Это позволило определить три Q_1 -вектора, см. рис. 4 (слева). Для оценки систематической ошибки вызванной непотоковыми корреляциями были построены 2 дополнительных Q_1 -вектора из треков протонов, см. рис 4 (справа). Рисунок 5 показывает сравнение v_1^{uncor} протонов, полученного с использова-

нием различных компонент u_1 и Q_1 -векторов. После применения поправок на азимутальную анизотропию аксептанса, остаточный эффект составляет порядка 2%.

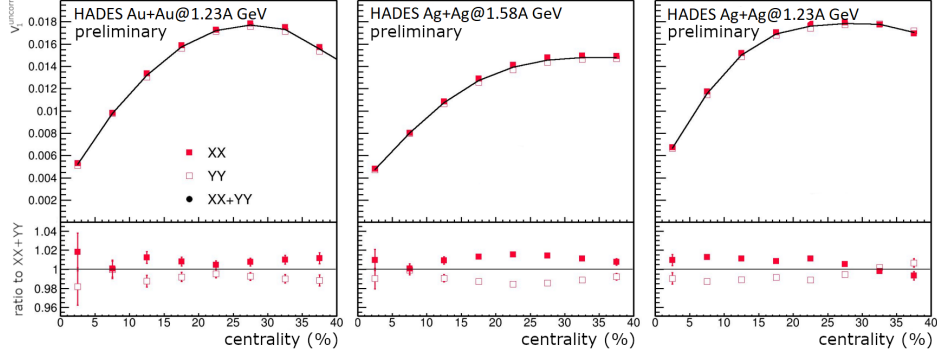


Рис. 5 — Зависимость компонент корреляции $\langle u_1 Q_1 \rangle$ от центральности после применения поправок на азимутальную неоднородность детектора.

Разрешение плоскости симметрии R_1 , полученное с использованием различных комбинаций Q_1 -векторов, показано на рис. 6. Разрешение $R_1\{W1(W2,W3)\}$ заметно отличается от значений, полученных при помощи других комбинаций. Этот эффект может быть объяснён наличием непотоковых корреляций между парами Q_1 -векторов $W1$ и $W2$, $W2$ и $W3$, которые не имеют значительного разделения по быстроте. В столкновениях Ag+Ag при обеих энергиях, $R_1\{W1(Mf,Mb)\}$ так же значительно отклоняется от среднего 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 рождённых частиц.

На рис. 7 представлена зависимость v_1 протонов от центральности в столкновениях Au+Au при $E_{kin}=1.23A$ ГэВ, измеренная при помощи различных комбинаций Q_1 -векторов. Слева представлены значения v_1 измеренные относительно внутреннего подсобытия $W1$, справа — внешнего подсобытия $W3$ и подсобытия из треков заряженных частиц Mf . Результаты для комбинаций подсобытий, разделенных по быстроте, таких как например, $W1(Mf,W3)$ и $W1(Mb,W3)$ согласуются между собой в пределах 2%, за исключением наиболее центральных событий. Значения v_1 , измеренные относительно различных плоскостей симметрии $W1$ и $W3$, так же согласуются в пределах 2%. Результаты для v_1 , полученные с использованием комбинаций

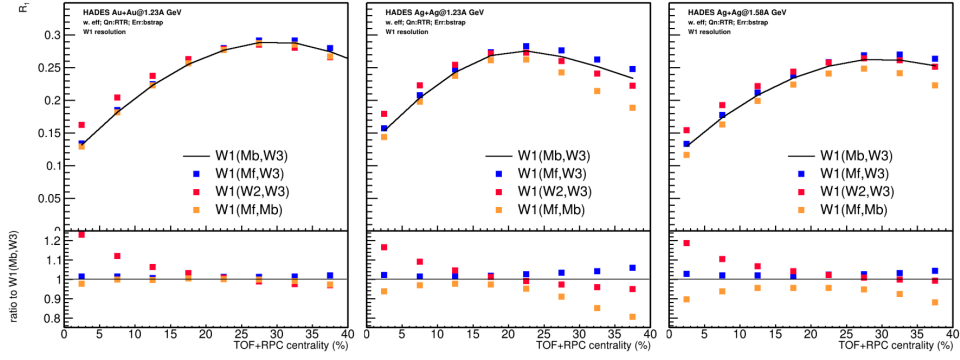


Рис. 6 — Зависимость разрешения R_1 от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов для Au+Au и Ag+Ag столкновений

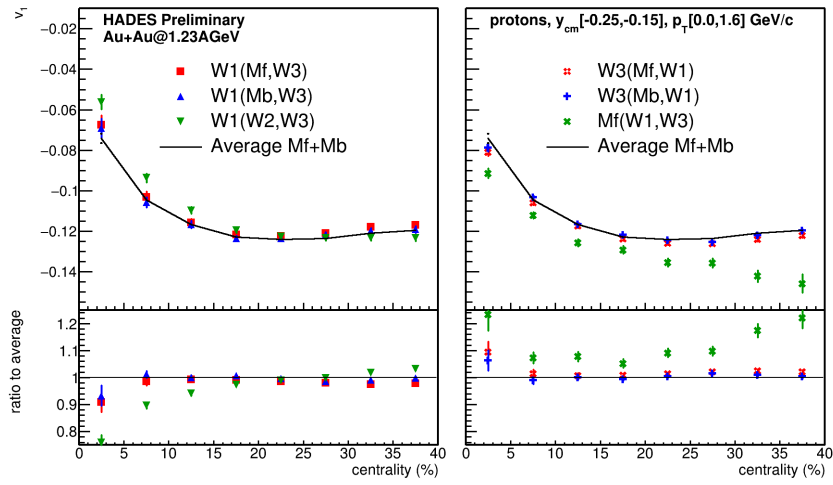


Рис. 7 — Зависимость v_1 протонов от центральности в столкновениях Au+Au, измеренная при помощи различных комбинаций Q_1 -векторов.

не разделенных по быстроте Q_1 -векторов (например $W1(W2,W3)$) значительно отличаются. В дальнейшем в качестве значений v_1 протонов было использовано среднее по всем комбинациям Q_1 -векторов, разделенных по быстроте.

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. 8 показана зависимость измеренного направленного потока v_1 протонов от поперечного импульса p_T (слева) и быстроты y_{cm} для 20-30% центральных Au+Au столкновений при кинетической энергии пучка $E_{kin} = 1.234$ ГэВ [0]. Для сравнения также показаны значения v_1 для дейтронов и тритонов.

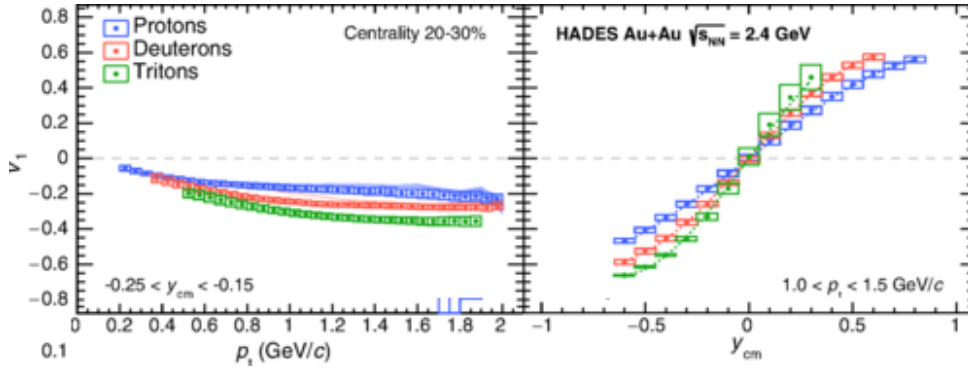


Рис. 8 — $v_1(p_T)$ (слева) и $v_1(y_{cm})$ (справа) для протонов, дейтронов и тритонов в Au+Au столкновениях при энергии $E_{kin} = 1.23A$ ГэВ.

На рисунке 9 представлена зависимость v_1 протонов от быстроты y_{cm} (слева) и поперечного импульса p_T (справа) для среднецентральных Au+Au и Ag+Ag столкновений. Типичными источниками погрешностей измерений v_1 и их характерными относительными значениями 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 u_1 и 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 поправочный коэффициент разрешения, рассчитанный с использованием различных комбинаций Q_1 -векторов (3-5%).

Значения v_1 протонов, в столкновениях Au+Au и Ag+Ag при энергии $E_{kin} = 1.23A$ ГэВ, хорошо согласуются с учетом систематических ошибок. Протоны, рожденные в столкновениях Ag+Ag при большей энергии $E_{kin} = 1.58A$ ГэВ обладают меньшим значением v_1 . Модель JAM [B12] с импульсно зависимым потенциалом среднего поля хорошо описывает зависимость v_1 от быстроты y_{cm} , как показано линиями на рис 9. Однако модель не способна описать зависимость v_1 протонов от поперечного импульса p_T .

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

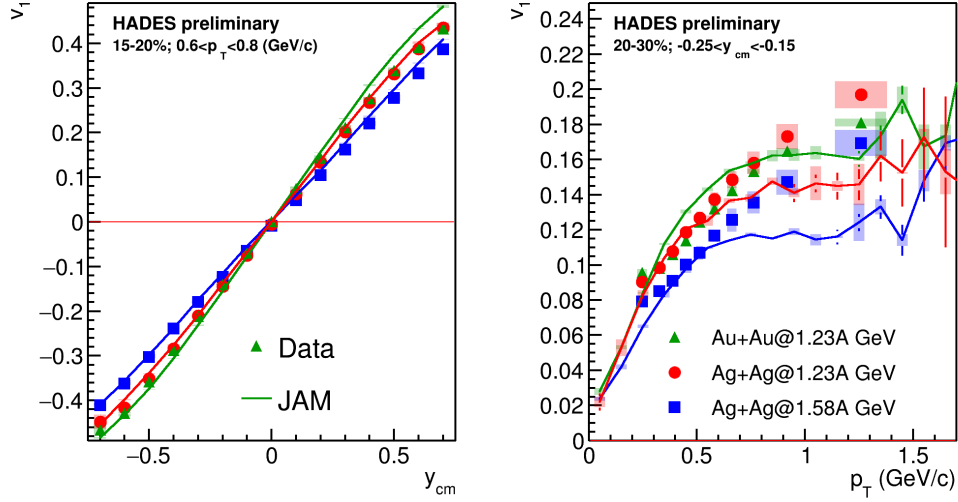


Рис. 9 — Зависимость v_1 от y_{cm} (слева) и p_T (справа) для столкновений Au+Au и Ag+Ag. Линиями показаны данные, полученные из модели JAM.

Au + Au и Ag + Ag хорошо согласуются с измерениями других экспериментов [B15; B16] (см. рис. 10).

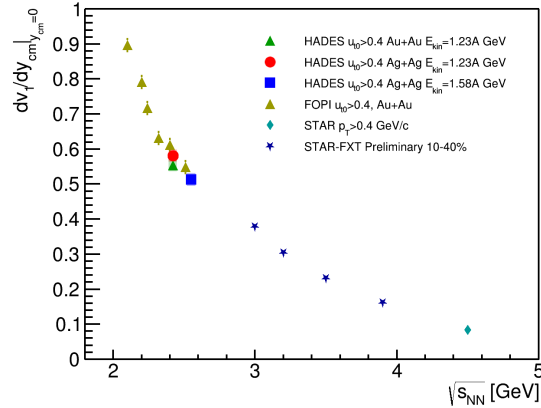


Рис. 10 — Зависимость $dv_1/dy|_{y_{cm}=0}$ протонов в среднецентральных столкновениях от энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$.

На рис. 11 слева приведена зависимость наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}=0}$ протонов от центральности столкновения. Поскольку при большей энергии время пролета двух ионов t_{pass} меньше, наклон направленного потока протонов в столкновениях Ag+Ag при энергии $E_{kin} = 1.58A$ ГэВ заметно меньше, чем при $E_{kin} = 1.23A$ 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 $y' = y_{cm}/y_{beam}$. 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. 11. 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 11 справа. Данное преобразование улучшило согласие зависимостей наклона в центральных событиях.

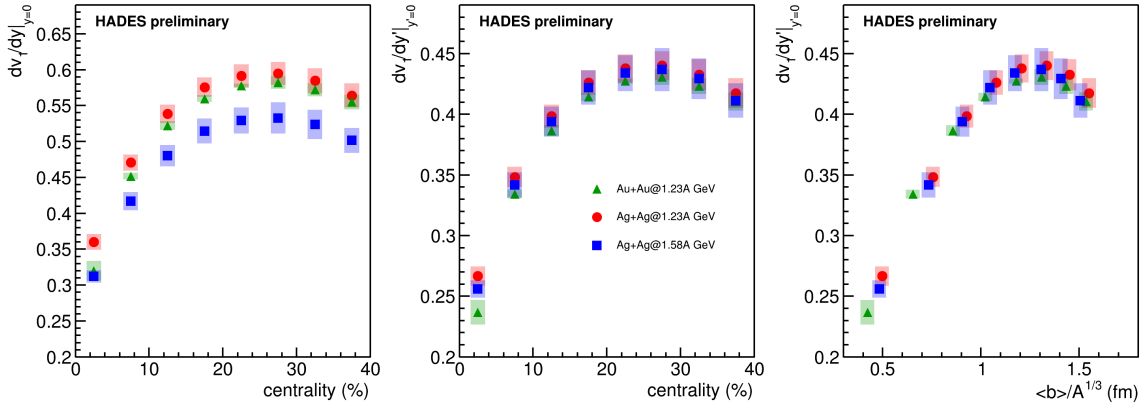


Рис. 11 — Зависимость $dv_1/dy|_{y=0}$ протонов от центральности: (слева) для $y = y_{cm}$, (в центре) для y_{cm} номированной на быстроту пучка $y' = y_{cm}/y_{beam}$ и (справа) для $dv_1/dy'|_{y'=0}$ как функции $\langle b \rangle$ нормированного на $A^{1/3}$.

Во второй части четвертой главы приведены результаты изучения возможности измерения v_1 и v_2 протонов в столкновениях Xe+Cs(I) в эксперименте BM@N. Эффективность измерений была проверена с помощью Монте-Карло моделирования и последующий полной реконструкции событий в среде BMNROOT. Для восстановления плоскости симметрии модули адронного калориметра FHCa1 были разделены на 3 группы согласно их псевдобыстроте (F1, F2 и F3), см. рис. 12 слева. Для исследования вклада непотоковых корреляций в результаты измерений были введены два дополнительных Q_1 -вектора из треков протонов Tr и отрицательных пионов $T\pi$, см. рис. 12 справа.

Азимутальный аксептанс трековой системы BM@N сильно неоднороден (см. рис. 13 (слева)). Результат применения коррекций на азимутальную неоднородность представлен на рис. 13 (справа). Разными цветами обозначены значения $v_1(y_{cm})$ протонов, полученные с использованием различных компонент u_1 -вектора. Открытые и закрытые маркеры обозначают резуль-

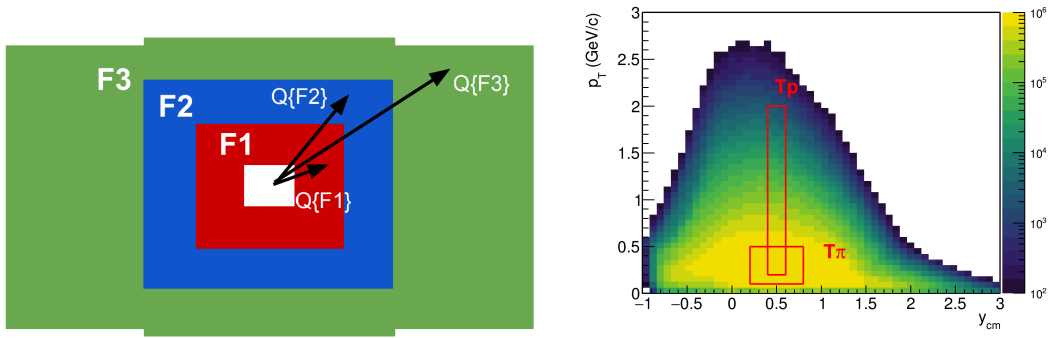


Рис. 12 — Слева: Схема разделения модулей FCHal по группам для определения плоскости симметрии события. Справа: Кинематические окна для подсчета Q_1 -векторов из треков заряженных частиц.

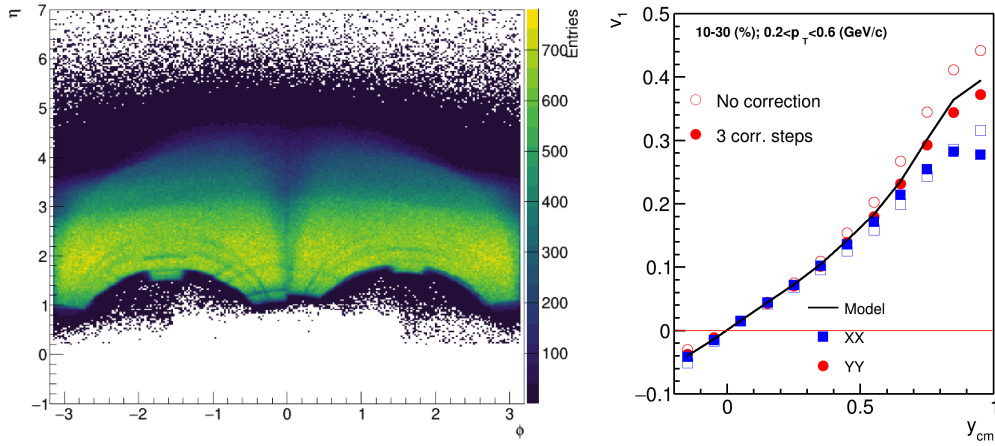


Рис. 13 — Азимутальный аксептанс трековой системы BM@N (слева). Сравнение $v_1(y_{cm})$ протонов в модельных столкновениях Xe+Cs(I) для различных компонент u_1 -вектора (справа) до и после коррекции на азимутальную неоднородность аксептанса детектора.

таты до и после коррекции, соответственно. Линией обозначены значения v_1 извлеченные напрямую из модели JAM. После применения 3 ступеней коррекции, результаты полученные при помощи YY корреляции u_1 и Q_1 -векторов, хорошо согласуются с результатами из модели. Напротив, значения v_1 , посчитанные с использованием XX -компонент, 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 u_1 и Q_1 -векторов. На рис. 14 представлена зависимость разрешения плоскостей симметрии F1, F2 и F3 от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов. Значения R_1 , по-

лученные при помощи разделенных по быстроте комбинаций, согласуются между собой в пределах статистической ошибки для всех трех плоскостей симметрии. 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 $F3$.

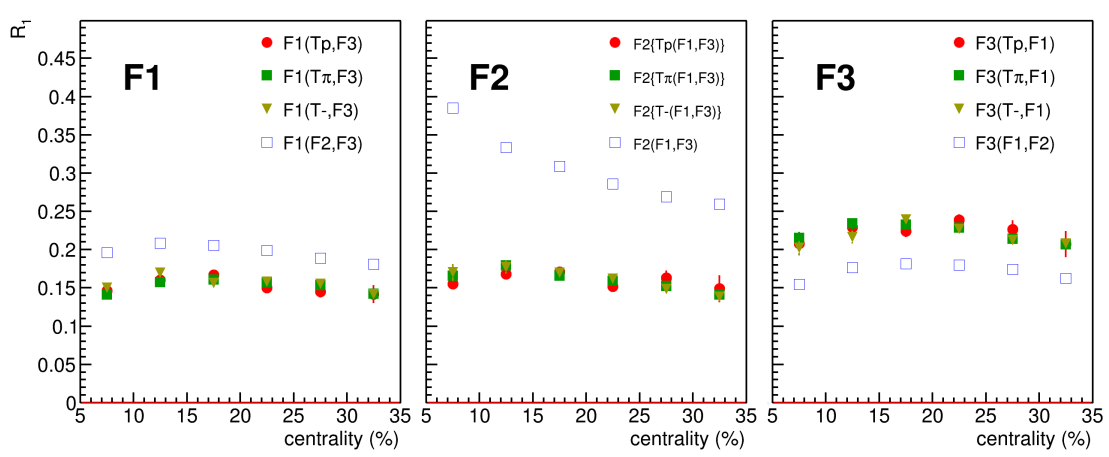


Рис. 14 — Зависимость разрешения плоскостей симметрии F1-F3 от центральности для различных комбинаций Q_1 -векторов, см. текст.

На рисунке 15 показаны результаты сравнения значений $v_1(y_{cm})$ (слева) и $v_2(p_T)$ (справа) полученных из анализа полностью реконструированных в BM@N протонов (маркеры) и модельных данных (линии) для Xe+Cs(I) столкновений при энергиях 2 - 4 АГэВ. Разными цветами обозначена разная энергия столкновений. Между данными извлеченными из модели и результатами анализа после реалистичной цепочки реконструкции наблюдается согласие в пределах статистических ошибок.

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 1.2-4 АГэВ.
2. Впервые получены зависимости v_1 протонов от быстроты и поперечного импульса, а так же наклона $dv_1/dy_{cm}|_{y_{cm}}$ в области средних

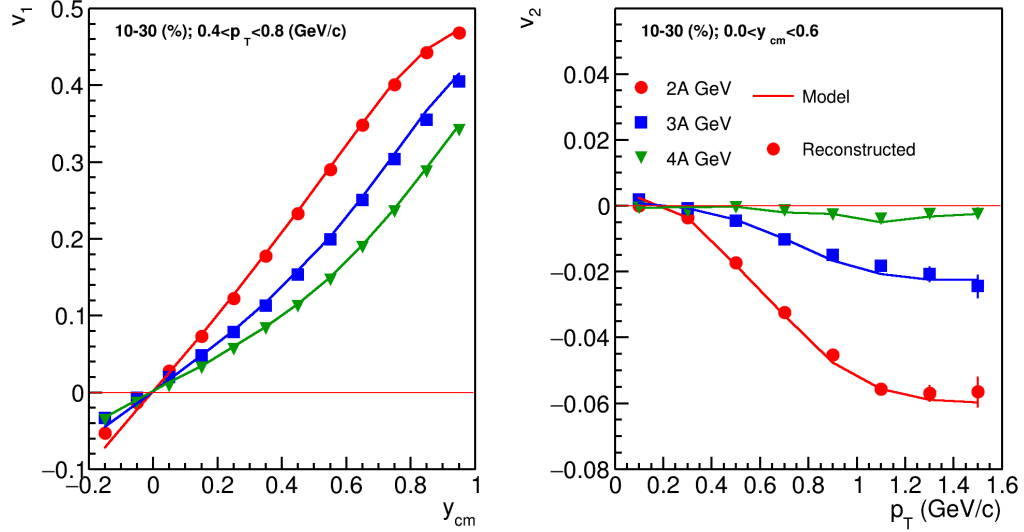


Рис. 15 — Сравнение $v_1(y_{cm})$ (слева) и $v_2(p_T)$ (справа) из анализа полностью реконструированных в BM@N протонов (маркеры) и модельных данных (линии) для Xe+Cs(I) столкновений при энергиях 2 - 4 АГэВ.

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 ядро-ядерных 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 на ускорителе NUCLOTRON-NICA (ОИЯИ, Дубна). Это позволю расширить существующую физическую программу эксперимента BM@N.

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. / под ред. P. Teterin. — 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. — т. 6, № 2. — с. 622—637.
- A5. *Adamczewski-Musch J., Mamaev M., et. al.* 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. — т. 125. — с. 262301.
- A6. *Mamaev M.* Baryonic Matter @ Nuclotron: Upgrade and Physics Program Overview // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — т. 87, № 1. — с. 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. — т. 21, № 4. — с. 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 1.58A GeV // Physics of Particles and Nuclei. — 2024. — т. 55, № 4. — с. 832—835.

Список литературы

- B1. *Danielewicz P., Lacey R., Lynch W. G.* Determination of the equation of state of dense matter // Science. — 2002. — т. 298. — с. 1592—1596.
- B2. Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics with Beam Energy Scan / A. Bzdak [и др.] // Phys. Rept. — 2020. — т. 853. — с. 1—87.
- B3. *Xu N., et. al.* Nuclear Matter at High Density and Equation of State //. — 2022.
- B4. *Esumi S.* Results from beam energy scan program at RHIC-STAR // PoS. — 2022. — т. CPOD2021. — с. 001.
- B5. *Abgrall N., et. al.* NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system // JINST. — 2014. — т. 9. — P06005.
- B6. *Senger P.* The heavy-ion program at the upgraded Baryonic Matter@Nuclotron Experiment at NICA // PoS. — 2022. — т. CPOD2021. — с. 033.
- B7. *Agakishiev G., et. al.* The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES // Eur. Phys. J. A. — 2009. — т. 41. — с. 243—277.
- B8. *Voloshin S. A., Poskanzer A. M., Snellings R.* Collective phenomena in non-central nuclear collisions // Landolt-Bornstein / под ред. R. Stock. — 2010. — т. 23. — с. 293—333.
- B9. *Pinkenburg C., et. al.* Elliptic flow: Transition from out-of-plane to in-plane emission in Au + Au collisions // Phys. Rev. Lett. — 1999. — т. 83. — с. 1295—1298.
- B10. *Liu H., et. al.* Sideward flow in Au + Au collisions between 2-A-GeV and 8-A-GeV // Phys. Rev. Lett. — 2000. — т. 84. — с. 5488—5492.
- B11. *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. — т. 66. — с. 021901.
- B12. *Nara Y.* JAM: an event generator for high energy nuclear collisions // EPJ Web of Conferences. т. 208. — EDP Sciences. 2019. — с. 11004.

- B13. *Selyuzhenkov I., Voloshin S.* Effects of non-uniform acceptance in anisotropic flow measurement // Phys. Rev. C. — 2008. — т. 77. — с. 034904.
- B14. *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.
- B15. *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.
- B16. *Adam J., et. al.* Flow and interferometry results from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ GeV // Phys. Rev. C. — 2021. — т. 103, № 3. — с. 034908.