

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Селюженков Илья Владимирович

**Анизотропные потоки адронов в столкновениях тяжелых ядер
на установке ALICE Большого адронного коллайдера**

Специальность 01.04.16 —
«физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Официальные
оппоненты:

Аушев Тагир Абдул-Хамидович,
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор,
Московский физико-технический институт,
заведующий лабораторией физики высоких энергий

Теряев Олег Валерианович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Объединенный институт ядерных исследований,
начальник сектора лаборатории теоретической физики

Ким Виктор Тимофеевич,
доктор физико-математических наук,
Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт",
заместитель руководителя отделения физики высоких
энергий

Лохтин Игорь Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор РАН,
Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова,
ведущий научный сотрудник НИИ ядерной физики

Защита состоится 21 апреля 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, ученому секретарю диссертационного совета МИФИ.01.01.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МИФИ.01.01,
д-р физ.-мат. наук, профессор



Улин Сергей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Эксперименты по столкновениям ультра-релятивистских тяжелых ядер позволяют на очень короткое время и в очень малых объемах создавать и исследовать в лаборатории новые формы кварк-глюонной материи (КГМ), свойства которой определяются законами квантовой хромодинамики (КХД). Запуск Большого адронного коллайдера (ЛHC) в 2010 году открыл возможность для экспериментальных исследований новой области фазовой диаграммы КГМ. ЛHC позволяет сталкивать тяжелые ядра при энергиях в системе центра масс на нуклон в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ. Начальная плотность выделенной в области перекрытия ядер энергии превышает 20 ГэВ/фм³ [1]. В результате множественного рождения кварков, анти-кварков и глюонов в области перекрытия ядер образуется КГМ, которая быстро термализуется за время порядка 3×10^{-25} секунды и в процессе расширения продолжительностью около 3×10^{-23} секунд [2] она достигает размера порядка 5000 фм³ [2].

Величина средней по времени расширения температуры КГМ достигает $T \approx 300$ МэВ (4×10^{12} К) [3]. Отношение чисел рожденных анти-протонов и протонов в столкновениях на ЛHC очень близко к единице (≈ 0.99) [4]. Это соответствует практически полной симметрии образования частиц материи и анти-материи и близкому к нулю значению относительного барионного химического потенциала $\mu_B \approx 0$, который характеризует относительную плотность барионов в КГМ. По этой причине свойства КГМ, образующейся в столкновениях ядер на ЛHC, аналогичны свойствам материи, из которой состояла Вселенная на начальном этапе ее развития через несколько микросекунд после Большого взрыва. Расчеты КХД на решетке [5; 6] указывают на то, что при нулевом значении барионного химического потенциала $\mu_B = 0$ и температуре $T \approx 156$ МэВ происходит фазовый переход КГМ типа кроссовер из состояния адронного газа в состояние так называемой кварк-глюонной плазмы (КГП), в котором цветовые заряды находятся в состоянии деконфайнмента, а киральная симметрия КХД восстановлена.

Ряд вопросов, стоящих перед научным сообществом при изучении свойств КГМ, варьируется от концептуальных вопросов о том, как последовательно сформулировать релятивистскую динамику жидкости или как решить уравнения квантовой теории поля в неравновесных условиях, возникающих при столкновениях релятивистских тяжелых ядер, до конкретных практических вопросов о термодинамических и транспортных свойствах КГМ, таких как ее вязкость или проводимость. Построение модели начального состояния материи в столкновениях тяжелых ядер, определение размера, формы и пространственной ориентации области образования КГМ, описание механизма, с помощью которого продукты столкновения очень быстро термализуются – все это необходимо для экспериментального определения свойств КГМ, образующейся в релятивистских столкновениях ядер.

На момент запуска LHC эксперименты на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC), который позволяет достичь максимальную энергию столкновения ядер золота величиной в $\sqrt{s_{NN}} = 0.2$ ТэВ, уже открыли [7–10] существование фазового перехода КГМ в новое состояние деконфайнмента и позволили получить первую оценку среднего по температуре значения для отношения η/s сдвиговой вязкости КГМ η к плотности энтропии s . Ключевую роль в доказательстве существования нового состояния КГМ, определении его свойств и характеризации деталей эволюции материи в столкновениях ядер на RHIC сыграли измерения анизотропных потоков рожденных адронов.

Анизотропные потоки чувствительны к деталям начального состояния материи и ранним временам столкновения, когда динамику развития КГМ определяет состояние несвязанных кварков и глюонов. Величина анизотропных потоков определяется коэффициентами потоков v_n в разложении в ряд Фурье зависимости выхода частиц от разницы между азимутальным углом импульса частиц φ и углом плоскости симметрии области перекрытия ядер Ψ_m [11]. Экспериментально коэффициенты потоков v_n для различных гармоник n могут быть рассчитаны путем усреднения косинуса разности углов ($\varphi - \Psi_m$):

$$v_n \{ \Psi_m \} = \langle \cos[n(\varphi - \Psi_m)] \rangle. \quad (1)$$

Первые три коэффициента известны [11] как коэффициенты направленного v_1 , эллиптического v_2 и треугольного v_3 потока.

Несмотря на успех исследований на RHIC, транспортные коэффициенты КГМ, такие как объемная вязкость ζ , а также зависимости транспортных коэффициентов $\eta(T)$ и $\zeta(T)$ от температуры, мало изучены и требуют дальнейших исследований. Необходимо изучить область фазовой диаграммы КГМ при нулевом барионном химическом потенциале $\mu_B = 0$ в большем, чем позволяют энергии RHIC, диапазоне температур от $T \approx 150$ МэВ вплоть до $T \approx 300$ МэВ. В этом диапазоне нужно определить температурную зависимость отношения вязкости сдвига к плотности энтропии $\eta/s(T)$ и установить неизвестную величину отношения ζ/s и его температурную зависимость. Это невозможно без определения характеристик (начальных условий) области образования КГМ, таких как ее форма, размер и пространственная ориентация относительно направления движения сталкивающихся ядер, при энергиях столкновений в несколько ТэВ. Экспериментальные исследования описанных выше характеристик КГМ требуют построения и использования новых наблюдаемых величин для изучения анизотропных потоков, расширения акцептанса в кинематическом пространстве (поперечном импульсе и скорости) рожденных адронов, улучшения инструментов для идентификации адронов, а также разработки и внедрения новых методик измерений коэффициентов потоков v_n .

Целью представленной работы является определение свойств кварк-глюонной материи (КГМ) в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при

температурах в диапазоне $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале путем исследования анизотропных потоков адронов в столкновениях тяжелых ядер на установке ALICE Большого адронного коллайдера и проверки применимости релятивистской вязкой гидродинамики для описания эволюции КГМ в неравновесных условиях, возникающих в столкновениях релятивистских тяжелых ядер при энергиях на один нуклон в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Измерены характеристики анизотропных потоков, такие как коэффициенты v_n , для адронов, рожденных в столкновениях ядер свинца при энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ на установке ALICE, современными методами плоскости события, скалярного произведения, многочастичных кумулянтов, измерения коэффициентов потоков v_n в зависимости от инвариантной массы.
2. Разработан новый метод для коррекции эффектов неоднородностей детектора в анализе коэффициентов потоков v_n , позволяющий проводить их измерения даже в условиях сильной азимутальной неоднородности акцептанса детектора.
3. Разработан новый метод для измерения коэффициентов потоков v_n относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер; определена роль флуктуаций пространственного положения нуклонов-спектаторов в развитии анизотропных потоков рожденных в столкновениях адронов.
4. Измерена энергетическая зависимость коэффициентов потоков v_n заряженных адронов для различных гармоник $n = 2 - 6$ в столкновениях релятивистских тяжелых ядер в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ и зависимость v_n от центральности столкновения, поперечного импульса и скорости заряженных адронов.
5. Измерен коэффициент направленного потока v_1 заряженных адронов относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер в зависимости от центральности столкновения, поперечного импульса и скорости заряженных адронов.
6. Исследована корреляция между коэффициентами потоков v_m и v_n заряженных адронов для различных комбинаций гармоник $m = 3 - 5$ и $n = 2, 3$ путем измерения симметричных кумулянтов $SC(m, n)$ в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса рожденных адронов.
7. Получена зависимость коэффициентов потоков v_n различных типов заряженных адронов, таких как π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$ от поперечного импульса и центральности столкновения.

Научная новизна: диссертационной работы состоит в том, что впервые были определены свойства кварк-глюонной материи (КГМ) в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при температурах $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале – в условиях, близких начальному этапу развития Вселенной в первые микросекунды после Большого взрыва; проверена и доказана применимость релятивистской вязкой гидродинамики для описания эволюции КГМ в неравновесных условиях, возникающих в столкновениях релятивистских тяжелых ядер при энергиях на один нуклон в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ.

Научная новизна работы включает в себя следующие достижения:

1. Впервые получена энергетическая зависимость коэффициентов потоков v_n заряженных адронов для различных гармоник в столкновениях ядер свинца в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ и их зависимость от центральности столкновения, поперечного импульса и быстроты рожденных адронов.
2. Впервые получены зависимости коэффициента направленного потока v_1 от центральности столкновения, поперечного импульса и быстроты для заряженных адронов относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер.
3. Разработан новый метод для измерения четных по скорости компонент коэффициентов потоков относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер.
4. В результате применения нового метода для измерения четного по скорости коэффициента направленного потока v_1 заряженных адронов впервые показана существенная роль флуктуаций пространственного положения нуклонов-спектаторов в развитии анизотропных потоков рожденных в столкновениях адронов.
5. Обнаружены новые корреляции между коэффициентами потоков v_m и v_n , которые характеризуют флуктуации формы области перекрытия в столкновениях тяжелых ядер. Корреляции v_m и v_n заряженных адронов получены для различных комбинаций гармоник m и n путем измерения симметричных кумулянтов $SC(m,n)$ и впервые для энергий столкновения ядер в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ экспериментально измерены их зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса рожденных адронов.
6. Впервые при энергиях столкновения ядер в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ получены зависимости коэффициентов потоков v_n различных типов адронов, таких как π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \Xi^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$ от поперечного импульса и центральности столкновения.

7. Разработан новый метод коррекции эффектов неоднородностей детектора в анализе коэффициентов потоков v_n , позволяющий проводить их измерения даже в условиях сильной азимутальной неоднородности акцептанса детектора.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что на их основе были определены зависимости отношения сдвиговой η и объемной ζ вязкости КГМ к плотности энтропии s от температуры в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при температурах в диапазоне $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале. Проведенное исследование позволило определить характеристики флуктуаций области образования КГМ и проверить применимость релятивистской вязкой гидродинамики для описания эволюции КГМ в неравновесных условиях, возникающих в столкновениях релятивистских тяжелых ядер при энергиях в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ. Разработанный автором метод коррекции эффектов неоднородностей детектора многократно применялся в анализе экспериментальных данных и измерениях v_n при других энергиях столкновений ядер на действующих установках STAR [12; 13] и PHENIX [14] на RHIC, ALICE [15–22] [2–6; 8; 18] и CMS [23; 24] на LHC, NA61/SHINE и NA49 [25–28] на SPS. Данный метод будет применен в новых экспериментах в России [29–31] (эксперимент MPD на коллайдере NICA в JINR) и за рубежом [32–34] (эксперимент CBM на ускорителе FAIR в Германии).

Основные положения, выносимые на защиту:

Характеристики кварк-глюонной материи (КГМ) в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при температурах $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале, такие как величина отношения сдвиговой η/s и объемной ζ/s вязкости к плотности энтропии, их зависимость от температуры, полученные на основе сравнения измеренных характеристик анизотропных потоков различных адронов с модельными расчетами релятивистской вязкой гидродинамики для описания эволюции КГМ в неравновесных условиях, возникающих в столкновениях релятивистских тяжелых ядер при энергиях на один нуклон в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ:

1. Характеристики анизотропных потоков, такие как коэффициенты v_n , для адронов, рожденных в столкновениях ядер свинца при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ на установке ALICE Большого адронного коллайдера, измеренные методами плоскости события, скалярного произведения, методом многочастичных кумулянтов и методом определения v_n как функции инвариантной массы.
2. Зависимости коэффициентов потоков v_n заряженных адронов от центральности, поперечного импульса и быстроты для различных гармоник n при энергиях столкновения ядер в диапазоне $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ.

3. Зависимости коэффициента направленного потока v_1 относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер, для заряженных адронов от центральности, поперечного импульса и скорости.
4. Зависимости четного по скорости коэффициента направленного потока v_1 от центральности и поперечного импульса для заряженных адронов, рожденных в столкновениях ядер, позволившие определить роль флуктуаций пространственного положения нуклонов-спектаторов на развитие анизотропных потоков.
5. Зависимости корреляций между коэффициентами потоков v_m и v_n заряженных адронов, вычисленных с помощью симметричных кумулянтов $SC(m, n)$ для различных комбинаций гармоник m и n от центральности столкновения и поперечного импульса.
6. Зависимости коэффициентов потоков v_n для различных типов адронов, таких как π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$ от центральности и поперечного импульса.
7. Новый метод коррекции эффектов неоднородностей детектора в анализе коэффициентов потоков v_n , позволяющий проводить их измерения даже в условиях сильной азимутальной неоднородности акцептанса детектора.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается их согласованностью с результатами для коэффициентов анизотропных потоков v_n , полученных без идентификации частиц на других экспериментальных установках ЛHC, таких как CMS и ATLAS, а также согласованностью с измерениями v_n идентифицированных адронов на установках STAR и PHENIX на RHIC и теоретическими предсказаниями на основе гидродинамических расчетов для v_n адронов, рожденных в столкновениях тяжелых ядер при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ.

Апробация работы. Основные результаты работы многократно докладывались на научных симпозиумах Института тяжёлых ионов GSI в Германии, Европейской организации по ядерным исследованиям CERN в Швейцарии, собраниях Немецкого физического общества DPG; семинарах и лекциях в НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН Троицк, Франкфуртского университета имени Иоганна Вольфганга Гёте, ежегодных собраниях Института Экстремальных Материй EMMI в Дармштадте; на международных конференциях Кварковая материя Quark-Matter-2011 (Анси, Франция, май 2011), Корреляции частиц и фемтоскопия WPCF-2011 (Токио, Япония, сентябрь 2011), Многогранность физики сильных взаимодействий Hirscheegg-2012 (Хиршегг, Германия, январь 2012), Флуктуации и корреляции в столкновениях тяжелых ядер ECT-TRENTO-2012 (Тренто, Италия, июль 2012), Кварковый конфайнмент и адронная спектроскопия Quark-Confinement-2012

(Мюнхен, Германия, октябрь 2012), Корреляции частиц и фемтоскопия WPCF-2013 (Ачиреале, Италия, ноябрь 2013), Достижения в потоках (Детройт, США, ноябрь 2013), Кварковая материя Quark-Matter-2014 (Дармштадт, Германия, май 2014), Корреляции частиц и фемтоскопия WPCF-2014 (Дьёндьёш, Венгрия, август 2014), Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц Lomonosov-2015 (Москва, Россия, август 2015), Кварковая материя Quark-Matter-2015 (Кобе, Япония, октябрь 2015), Странность в Кварковой Материи SQM-2016 (Калифорнийский университет в Беркли, США, июнь 2016), Международный симпозиум по многочастичной динамике ISMD-2016 (Остров Чеджу, Южная Корея, август 2016), Кварковая материя Quark-Matter-2017 (Чикаго, США, февраль 2017), Начальные условия в ядерных столкновениях при высоких энергиях IS-2017 (Краков, Польша, сентябрь 2017), Кварковая материя Quark-Matter-2018 (Венеция, Италия, май 2018), Международный семинар по множественным партонным взаимодействиям на LHC (Перуджа, Италия, декабрь 2018), Международная конференция Странность в Кварковой Материи SQM-2019 (Бари, Италия, июнь 2019), Кварковая материя Quark-Matter-2019 (Ухань, Китай, ноябрь 2019).

Личный вклад. Диссертация основана на работах, выполненных автором в рамках международной коллаборации ALICE на LHC в 2010–2019 гг. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные лично автором, и результаты, полученные при его определяющем участии в постановке задач, в разработке методов их решения, в анализе экспериментальных данных, а также в подготовке результатов измерений для публикации от лица коллаборации ALICE на LHC.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 печатных работах, которые опубликованы в периодических научных журналах входящих в базы данных Web of Science и Scopus.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований сильно-взаимодействующей материи при предельно высоких плотностях и температурах, образующейся в ультра-релятивистских столкновениях тяжелых ядер. Приводится обзор научной литературы, существующих теоретических подходов и экспериментальных данных по изучаемой проблеме. Обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследований, перечисляются основные наблюдаемые для изучения кварк-глюонной материи (КГМ) и её перехода в новое состояние, в котором цветовые заряды находятся в состоянии деконфайнмента, а киральная симметрия КХД восстановлена. Ставятся основные задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость измерений коллективных эффектов, отражающие динамику основной массы

рожденных частиц в столкновениях тяжелых ядер на экспериментах Большого адронного коллайдера (LHC).

Первая глава содержит описание установки ALICE [35] (Большой ионный эксперимент на коллайдере), являющейся крупным экспериментом на Большом адронном коллайдере (LHC) в Женеве. ALICE оптимизирована для изучения КГМ материи, возникающей при столкновениях релятивистских тяжелых ядер. Детекторные системы ALICE (см. рис. 1) делятся на три категории: детекторы центрального цилиндра, передние детекторы и мюонный спектрометр MUON.

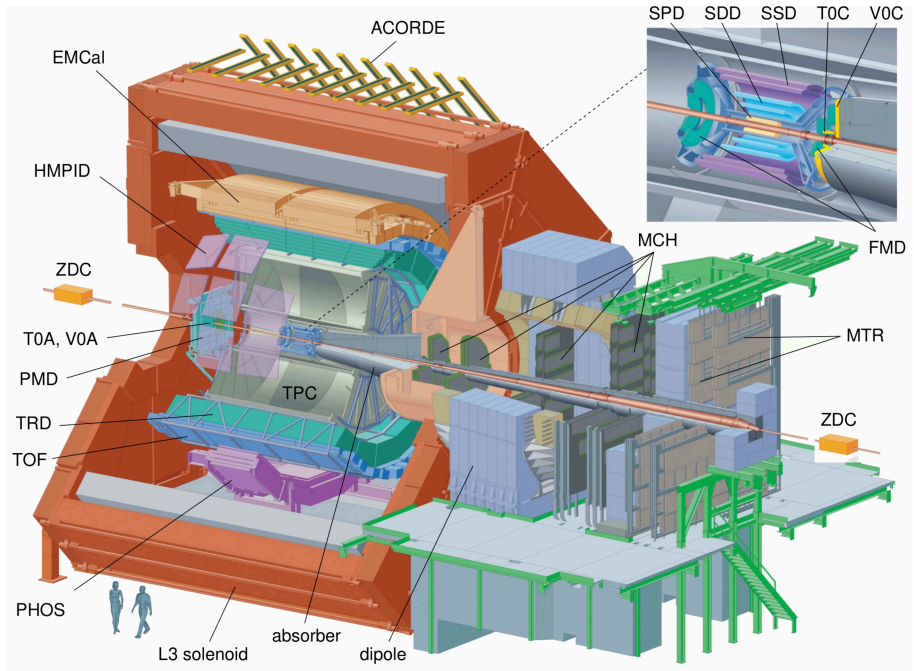


Рис. 1 — Эксперимент ALICE на LHC в CERNe.

Детекторами центрального цилиндра являются внутренняя трековая система (ITS), состоящая из подсистем SPD, SDD и SSD, время-проекционная камера (TPC), детектор переходного излучения (TRD), детектор времени пролета (TOF), фотонный спектрометр (PHOS), электромагнитный калориметр (EMCal), детектор для идентификации частиц с большим импульсом (HMPID) и детектор космических лучей (ACORDE). Все детекторы встроены в магнит соленоида (L3 solenoid), который имеет магнитное поле $B = 0.5$ Тл.

Передние детекторы ALICE включают детектор множественности фотонов (PMD) с газовым счетчиком и кремниевый передний детектор множественности (FMD). Они предназначены, соответственно, для измерения в каждом столкновении ядер числа фотонов и числа заряженных частиц для интервала псевдо-быстроты $|\eta_{\text{lab}}| \approx 3$. Черенковские детекторы T0 (T0A и T0C) определяют время и продольное положение взаимодействия ядер. Массив сцинтилляторов VZERO (V0A и V0C) измеряет число заряженных частиц для $-3.7 < \eta_{\text{lab}} < -1.7$ и $2.8 < \eta_{\text{lab}} < 5.1$. Он используется в основном для триггерной системы и определения центральности и угла плоскости события в столкновениях ядер. Центральность также может быть измерена с помощью калориметров нулевых углов (ZDC). ZDC состоит из двух вольфрам-кварцевых нейтронных и двух латунно-кварцевых протонных калориметров, расположенных симметрично по обе стороны от области взаимодействия и используемых для измерения энергии нуклонов-спектаторов.

Мюонный спектрометр MUON с адронным поглотителем (absorber), дипольным магнитом (dipole) с изгибающей силой 3 Тм и пятью станциями для трекинга (MCH), каждая содержащая по две падовые камеры, используется для регистрации распадов кваркония и легких векторных мезонов в области быстрой $-4.0 < y < -2.5$. Две дополнительные станции (MTR), расположенные за поглотителем с длиной ядерного взаимодействия $7\lambda_{\text{int}}$, обеспечивают возможность регистрации столкновений с одним или двумя мюонами и позволяют регулировать порог для значений поперечного импульса мюонов.

В главе также описаны процедуры реконструкции события столкновения и траекторий частиц, методы определения характеристик столкновения (центральность столкновения и плоскость события), критерии отбора столкновений и треков частиц при измерениях коэффициентов анизотропных потоков, методика идентификации заряженных адронов в TPC и TOF, поиск вторичных вершин и реконструкция кинематики короткоживущих адронов.

Вторая глава посвящена описанию феномена анизотропных потоков в столкновениях тяжелых ядер. В главе освещена важная роль измерений флуктуаций анизотропных потоков и их зависимостей от центральности, поперечного импульса и быстроты в определении начального размера и формы области образования КГМ. Указана особая роль измерения коэффициентов направленного потока v_1 относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер, позволяющих помимо размера и формы определить также пространственную ориентацию области образования КГМ. Показана зависимость корреляций между флуктуациями величины коэффициентов потоков v_n и v_m различных гармоник n и m как от начальных условий образования КГМ, так и от температурной зависимости транспортных коэффициентов КГМ.

Подчеркнута необходимость измерения v_n для различных типов адронов в зависимости от поперечного импульса p_T , что необходимо для экспериментального подтверждения образования новой формы КГМ, состоящей из свободных

кварков и глюонов, а также определения транспортных коэффициентов КГМ. Коэффициенты v_n для адронов с разными массами в области $p_T < 3$ ГэВ/с чувствительны к скорости расширения и вязкости КГМ. Сравнение отношения величины v_n к числу кварков для различных адронов в области поперечных импульсов $p_T < 3 - 6$ ГэВ/с позволяет установить, были ли достигнуты температуры выше критической ($T > 156$ МэВ), при которых КГМ переходит в состояние деконфайнмента и ее транспортные свойства определяются взаимодействием свободных кварков и глюонов.

Вторая глава также включает описание методов, использованных для измерения коэффициентов анизотропных потоков, в частности разработанного автором нового метода коррекции эффектов неоднородностей детектора в анализе коэффициентов потоков v_n . Было введено три типа поправок, применимых как для корректировки единичных векторов $\mathbf{u}_n = (\cos n\varphi, \sin n\varphi)$, определенных азимутальным углом φ импульса каждого из адронов, так и для векторов потока \mathbf{Q}_n , которые определяются суммой единичных векторов \mathbf{u}_n (подробнее см. [17]):

1. *Сдвиг (центровка) \mathbf{u}_n -вектора.* Первая поправка применяется путем вычитания из компонент \mathbf{u}_n -вектора соответствующих им средних значений.
2. *Поворот \mathbf{u}_n -вектора.* Вторая поправка, которая применяется после центровки, основана на вычислении коэффициентов поворота согласно формуле (27) в [17].
3. *Масштабирование \mathbf{u}_n -вектора.* Третья поправка задается коэффициентами скэйлинга, которые определяются по формуле (26) из [17]. Она применяется после того, как проведена и центровка, и поворот \mathbf{u}_n -вектора.

Особенность метода состоит в том, что он не требует Монте-Карло моделирования отклика детектора, и поправки полностью определяются экспериментально измеряемыми величинами. При этом метод позволяет проводить измерения v_n даже в условиях сильной азимутальной неоднородности акцептанса детектора.

Далее во второй главе приведено описание техники многочастичных корреляций [11], двухчастичных корреляций с разделением частиц по быстроте [11], методов плоскости события и скалярного произведения [11] [17], способов измерения коэффициентов анизотропных потоков с помощью треклетов ITS и сигналов FMD [12], определения потоков “методом v_n как функции инвариантной массы” [9], измерения коэффициента направленного потока относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер [2; 8], метода расчета симметричных кумулянтов $SC(m, n)$ [11]. Также изложено описание различных процедур оценки и вычитания непотоковых корреляций [7; 10].

Коэффициенты анизотропных потоков v_n для короткоживущих адронов, распадающихся внутри установки ALICE и восстановленных по их продуктам распада (т.е. K_S^0 , ϕ , Λ , $\bar{\Lambda}$, Ξ^+ , Ξ^- , $\bar{\Omega}^+$ и Ω^-), измеряются методом v_n как функция инвариантной массы (m_{inv}) [9]. В этом методе зависимость коэффициента

потока v_n^{exp} от m_{inv} , измеренная для всех кандидатов короткоживущих адронов, построенная из продуктов распада, разделяется на вклад от реального распада короткоживущего адрона v_n^s и комбинаторный вклад $v_n^{\text{bg}}(m_{\text{inv}})$ с помощью подгонки (фитирования) функцией

$$v_n^{\text{exp}}(m_{\text{inv}}) = \frac{v_n^s N_s(m_{\text{inv}}) + v_n^{\text{bg}}(m_{\text{inv}}) N_{\text{bg}}(m_{\text{inv}})}{N_{\text{exp}}(m_{\text{inv}})}. \quad (2)$$

Здесь $N_{\text{exp}}(m_{\text{inv}})$ – общее количество кандидатов короткоживущих адронов, а $N_s(m_{\text{inv}})$ и $N_{\text{bg}}(m_{\text{inv}})$, соответственно, число реальных распадов короткоживущих адронов и число комбинаторного фона. Рисунок 2 иллюстрирует данный метод для измерения коэффициента эллиптического потока v_2 . На рис. 2 различными символами показаны измеренные зависимости v_2^{exp} от m_{inv} для различных короткоживущих адронов. Линиями показан результат подгонки параметров функции, заданной уравнением 2, при которых достигается наилучшее описание измеренных значений $v_2^{\text{exp}}(m_{\text{inv}})$. Результатом данной процедуры подгонки является значение коэффициента потока v_2^s данного короткоживущего адрона.

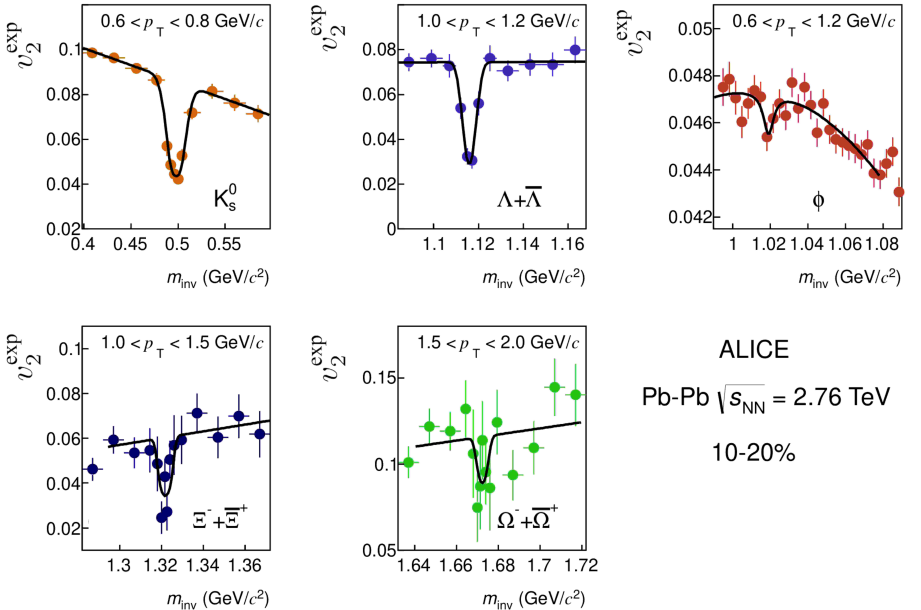


Рис. 2 — Зависимость v_2^{exp} от инвариантной массы m_{inv} для различных короткоживущих адронов (K_S^0 , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, ϕ , $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$) в столкновениях Pb–Pb для интервала центральности 10–20 %. Сплошными линиями показаны результаты подгонки функцией, определенной уравнением 2.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты для коэффициентов анизотропных потоков v_n адронов для различных гармоник $n = 1-6$, измеренных с помощью установки ALICE на LHC. Результаты получены для v_n как относительно плоскостей симметрии, определенных положением нуклонов в области перекрытия ядер (нуклонов-участников), так и относительно плоскости, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер. Коэффициенты v_n измерены для заряженных и идентифицированных адронов: π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$. Также представлены корреляции между величинами v_n и v_m для различных гармоник $m = 3-5$ и $n = 2-3$, определенные с помощью симметричных кумулянтов $SC(m,n)$.

Приведены систематические погрешности измерений коэффициентов эллиптического v_2 и потоков более высоких гармоник для заряженных адронов, их флуктуаций, коэффициента направленного потока v_1 относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер, корреляций величин v_n и v_m для различных n и m , определенных с помощью симметричных кумулянтов $SC(m,n)$, а также v_n различных идентифицированных адронов. Размер систематических ошибок измерений варьируется в зависимости от энергии $\sqrt{s_{NN}}$ и центральности столкновения, типа частиц, диапазона поперечного импульса p_T и (псевдо-)быстроты частиц, номера гармоники v_n или комбинации гармоник m и n при вычислении симметричных кумулянтов $SC(m,n)$, а также от типа частиц, использованных для определения плоскости симметрии события (рожденные частицы или нуклоны-спектаторы). Вклад в полную погрешность измерений от конкретного источника систематической ошибки определялся согласно критерию Барлоу [36].

Типичными источниками погрешностей измерений и их характерными относительными значениями являются: точность восстановления вершины столкновения (1–2 %); погрешности в реконструкции треков и определении импульса частиц (5 %); зависимость эффективности реконструкции траекторий частиц от импульса и (псевдо-)быстроты (5 %); неточность GEANT3 Монте-Карло симуляций отклика установки на прохождение частиц через материал детекторных подсистем (5–20 %); примеси при идентификации частиц по потерям dE/dx в TPC и сигналу TOF (2–10 %); примеси из-за распада короткоживущих адронов (вторичных треков) при отборе первичных частиц (до 6 %); изменение параметров установки ALICE, например смена полярности магнита (3 %); неопределенности в определении центральности столкновения (3–5 %); изменения геометрии пересечения пучков LHC, таких как места их пересечения относительно центра координат ALICE, относительного смещения и угла между сталкивающимися пучками (10–15 %); асимметрия регистрации нуклонов-спектаторов в плоскости кольца LHC и в перпендикулярном ей направлении (до 20 %); непотоковые корреляции частиц, происходящие из-за фрагментации струй, распадов резонансов и наличия малых кластеров (10 %).

Представлены первые результаты измерений на LHC коэффициентов эллиптического v_2 , треугольного v_3 , четырехугольного v_4 и пятиугольного v_5 потоков заряженных адронов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ (см. рис. 3 (слева)). Измерения проведены в диапазоне псевдо-быстрот $|\eta_{\text{lab}}| < 0.8$ и поперечных импульсов $0.2 < p_{\text{T}} < 5.0$ ГэВ/с. Значение v_2 , измеренное для класса центральности 40–50 % с использованием метода четырехчастичных корреляций [11] и усредненное по поперечному импульсу и псевдо-быстроте, составило 0.087 ± 0.002 (стат.) ± 0.003 (сист.) [1]. Показано, что коэффициент эллиптического потока v_2 как функция p_{T} достигает максимального значения порядка 0.2 вблизи $p_{\text{T}} = 3$ ГэВ/с. Величина v_2 при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ увеличивается примерно на 30 % по сравнению с результатами RHIC для столкновений Au–Au при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 0.2$ ТэВ. Теоретические предсказания на основе гидродинамических расчетов, в которых учтены вязкие поправки, согласуются с обнаруженным увеличением v_2 . Показано, что v_3 можно описать в терминах флуктуаций начальной пространственной анизотропии столкновения [3]. В наиболее центральных (0–5 %) столкновениях эллиптический v_2 и треугольный v_3 коэффициенты потоков имеют одинаковую величину, что указывает на доминирующий эффект флуктуаций начальной пространственной анизотропии.

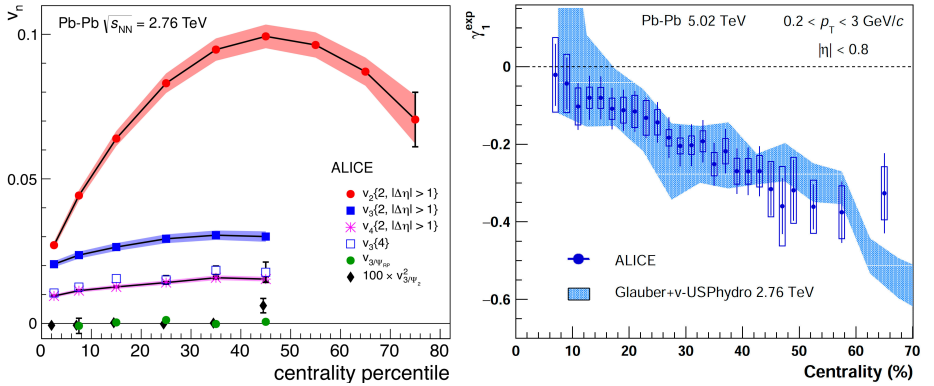


Рис. 3 — (слева) Зависимости v_2 , v_3 и v_4 заряженных адронов для диапазона $0.2 < p_{\text{T}} < 5.0$ ГэВ/с от центральности для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ. Закрашенные полосы изображают оценку возможной величины непотоковых корреляций. (справа) Зависимость коэффициента асимметрии γ_1^{exp} распределения эллиптического потока $P(v_2)$ для заряженных адронов от центральности для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ ТэВ. Результаты сравниваются с гидродинамическими расчетами [37] для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ.

Детально исследованы зависимости коэффициентов анизотропного потока v_n от p_T и их эволюция с центральностью столкновения и номером гармоники n для заряженных адронов, рожденных в столкновениях Pb–Pb при двух энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ (см. рис. 4). Коэффициенты анизотропных потоков измерены методом двух- и многочастичных кумулянтов [11] $v_n\{k\}$ вплоть до шестой гармоники $n = 6$ и числа частиц в кумулянте $k = 4$. Результаты представлены для диапазона псевдо-быстрот $|\eta_{lab}| < 0.8$ и поперечного импульса $0.2 < p_T < 50$ ГэВ/с. Приближенный скэйлинг v_n как функции поперечного импульса вида $v_n(p_T) \sim p_T^{n/3}$ наблюдается для всех гармоник в диапазоне $0.2 < p_T < 3$ ГэВ/с [14]. Оценка влияния геометрии столкновения и флуктуаций плотности энергии в области перекрытия двух ядер на формирование эллиптического потока v_2 проведена с помощью многочастичных кумулянтов $v_2\{k\}$, измеренных вплоть до $k = 8$. Получено, что коэффициент асимметрии γ_1^{exp} распределения эллиптического потока $P(v_2)$ (см. рис. 3 (справа)) имеет отрицательное значение и его величина растет от центральных (5–10 %) к периферальным (60–70 %) столкновениям. Увеличение величины γ_1^{exp} соответствует уменьшению размера области образования КГМ и уменьшению числа источников флуктуаций (числа нуклонов-участников) от центральных к периферальным столкновениям. Для диапазона центральности 10–50 % получен верхний предел на возможную величину коэффициентов асимметрии более высокого порядка равный 4×10^{-4} при 95 % уровне достоверности. Форма распределения $P(v_2)$ была описана степенной функцией $P(\varepsilon)$ [38] эксцентриситета ε области образования КГМ, оптимальные параметры которой были найдены путем их сопоставления с измеренными значениями кумулянтов $v_2\{k\}$. Измеренные зависимости v_n и $P(v_2)$ были сравнены с различными модельными предсказаниями [37; 39–41], что далее позволило определить зависимость флуктуаций размера и формы области образования КГМ от центральности и установить температурную зависимость отношения вязкости сдвига $\eta(T)$ и объемной вязкости $\zeta(T)$ КГМ к плотности энтропии s (см. результаты Байесовского анализа на рис. 10).

Представлены результаты измерений v_2 , v_3 и v_4 заряженных адронов в широком диапазоне псевдо-быстрот $-3.5 < \eta_{lab} < 5$. Зависимости коэффициентов анизотропных потоков v_n от η_{lab} измерены с помощью двух- и четырехчастичных корреляций [11]. Результаты представлены на рис. 5 (слева). Показано, что форма зависимости v_n от η_{lab} незначительно меняется с центральностью столкновения для гармоник $n = 2-4$, в то время как их величина заметно уменьшается с увеличением абсолютного значения псевдо-быстроты. Проведено сравнение измеренных зависимостей v_n от η_{lab} с расчетами на основе гидродинамической модели [43] с учетом температурной зависимости η/s . Применимость при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ расширенного продольного скэйлинга v_2 была проверена путем сравнения (см. рис. 5 (справа)) с результатами измерений при более низких энергиях столкновения, включая результаты RHIC [44]. Таким образом, скэйлинг применим для гораздо более широкого диапазона $0 < |\eta_{lab} - y_{beam}| < 8$ (где y_{beam} – быстрота пучка), чем было установлено ранее на RHIC [44].

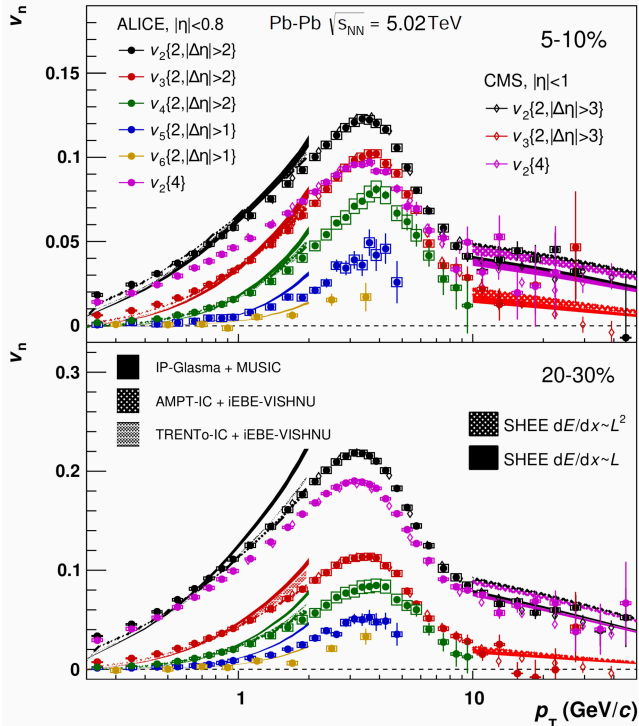


Рис. 4 — Зависимости v_n от p_T для столкновений Pb–Pb и двух различных классов центральности столкновений (5–10 % и 20–30 %) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, измеренные методами двух- и четырехчастичных кумулянтов и методом скалярного произведения [11]. Также представлены результаты различных гидродинамических расчетов [39–41], выполненных на основе разных моделей начального состояния, и измерения CMS [42].

Измерен коэффициент направленного потока v_1 заряженных адронов, рожденных в области $|\eta_{lab}| < 0.8$, относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (см. рис. 6 (а)). Обнаружен отрицательный наклон зависимости нечетной “odd” компоненты коэффициента направленного потока (v_1^{odd}) от псевдо-быстроты η_{lab} , который примерно в 3 раза меньше, чем при самой высокой энергии $\sqrt{s_{NN}} = 0.2$ ТэВ на RHIC [45] (см. рис. 6 (с)). Меньший наклон v_1 для энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ говорит об уменьшении наклона области образования КГМ относительно направления движения ядер с увеличением энергии столкновения, что противоречит предсказаниям [46; 47] об усилении вращения этой области с ростом энергии.

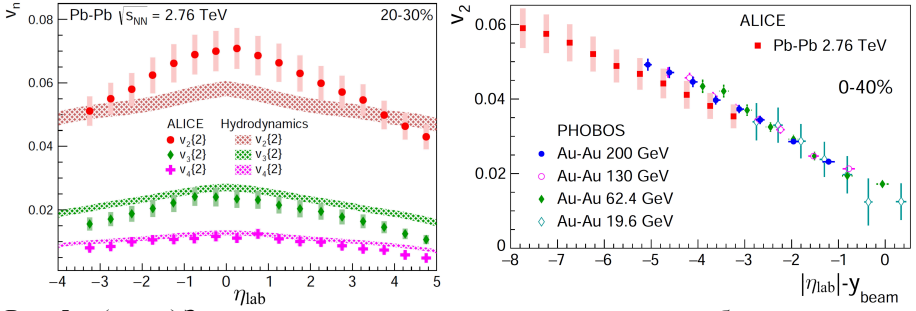


Рис. 5 — (слева) Зависимость v_n заряженных адронов от псевдо-быстроты η_{lab} для центральности 20–30 % в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ. Измерения сравниваются с результатами гидродинамических расчетов [43] с учетом температурной зависимости η/s . (справа) Зависимость v_2 заряженных адронов от $|\eta_{\text{lab}}| - y_{\text{beam}}$ (где y_{beam} – быстрота пучка) для центральности 0–40 % в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ. Результаты сравниваются с данными PHOBOS [44] для столкновений Au–Au в диапазоне энергий $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 0.0196 - 0.2$ ТэВ.

Впервые измерена четная “even” компонента коэффициента направленного потока (v_1^{even}) по отношению к плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер (см. рис. 6 (а)). Показано, что v_1^{even} не зависит от псевдо-быстроты и меняет знак при поперечных импульсах p_T между 1.2 и 1.7 ГэВ/с [2; 8]. Одновременно с этим величина $\langle p_x \rangle^{\text{even}} / \langle p_T \rangle$ – четная как функция быстроты доля переданного импульса вдоль направления отклонения спектаторов $\langle p_x \rangle \equiv \langle p_T \cos(\varphi - \Psi_{\text{SP}}) \rangle$ (где Ψ_{SP} – азимутальный угол направления отклонения спектаторов), – согласуется с нулем (см. рис. 6 (b)). Это означает, что отсутствует корреляция между величиной импульса, переданного в направлении отклонения спектаторов, и флуктуацией формы распределения энергии в зоне перекрытия двух ядер. В совокупности результаты наблюдений для v_1 и $\langle p_x \rangle$ являются доказательством дипольно-подобных флуктуаций начальной формы области образования КГМ.

Обнаружено, что величина v_1^{even} , полученная из двух-частичных корреляций заряженных адронов, рожденных в области центральных быстрот, примерно в 40 раз больше, чем v_1^{even} , измеренная для тех же адронов, но по отношению к плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер. Это указывает на слабую ($\approx 1/40$) корреляцию между ориентацией плоскости симметрии дипольных флуктуаций области образования КГМ и направлением отклонения нуклонов-спектаторов. Данные измерения с использованием нуклонов-спектаторов позволили определить [48; 49] пространственную ориентацию (наклон относительно направления движения ядер) области образования КГМ в столкновениях тяжелых ядер на ЛHC.

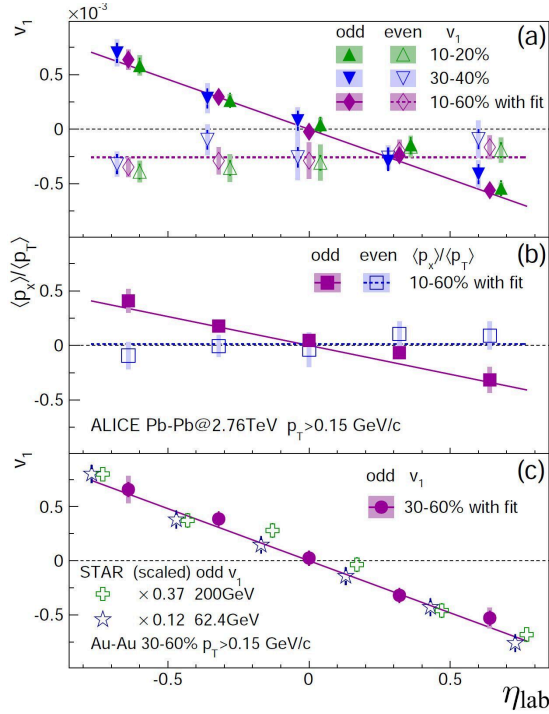


Рис. 6 — Зависимости четной (“even”) и нечетной (“odd”) компонент (a) v_1 заряженных адронов и (b) доли переданного импульса вдоль направления отклонения спектров $\langle p_x \rangle / \langle p_T \rangle$ от псевдо-быстроты η_{lab} в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. (c) Сравнение v_1^{odd} с данными STAR [45] для Au–Au столкновений при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200$ и 62.4 ГэВ, умноженными для удобства сравнения величины наклона на коэффициенты 0.37 и 0.12, соответственно.

Получены корреляции между коэффициентами анизотропных потоков v_m и v_n заряженных адронов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (см. рис. 7). Они определены в терминах многочастичных смешанных корреляторов $SC(m,n)$, называемых симметричными кумулянтами, которые по построению не зависят от корреляции между соответствующими коэффициентам v_m и v_n плоскостями симметрий Ψ_m и Ψ_n . Измерена зависимость $SC(m,n)$ от центральности для комбинаций гармоник малого (v_2 и v_3) и высокого (v_4 и v_5) порядка. Положительные значения корреляции $SC(4,2)$ наблюдаются для всего диапазона центральности. Это означает, что измерение для конкретного столкновения величины v_2 большей, чем среднее значение $\langle v_2 \rangle$ по всем столкновениям, увеличивает вероятность измерить значение v_4 , большее, чем соответствующее среднее значение $\langle v_4 \rangle$. Отрицательное значение $SC(3,2)$ отражает антикорреляцию между величинами v_2 и v_3 , из чего следует,

что измерение величины v_2 большей, чем $\langle v_2 \rangle$, увеличивает вероятность изменения значения v_3 меньше $\langle v_3 \rangle$. Эти наблюдения отражают взаимосвязь между величинами v_m и v_n для различных гармоник m и n , что в свою очередь дает информацию о флуктуациях формы области образования КГМ, дополнительную к уже полученной на основе измерений распределений $P(v_n)$ для индивидуальных гармоник n . Обнаружено, что корреляции между v_3 (v_4) и v_2 , зависят от p_T в полу-центральных столкновениях [13]. Это обусловлено температурной зависимостью объемной вязкости $\zeta(T)$ проявляющейся в результате расширения и остывания КГМ во время ее адронизации. Таким образом, вместе с существующими измерениями коэффициентов анизотропных потоков v_n результаты для $SC(m,n)$ предоставили новую информацию о флуктуациях формы области образования КГМ и транспортных свойствах КГМ, таких как зависимость η/s от температуры (см. сравнение с гидродинамическими расчетами [50] на рис. 7).

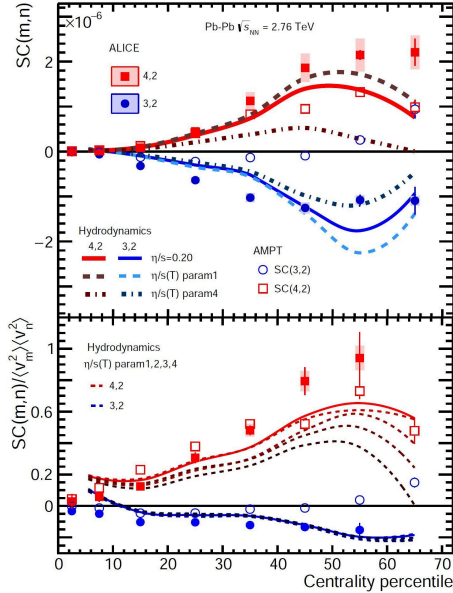


Рис. 7 — Зависимости симметричных кумулянтов $SC(m,n)$ заряженных адронов и их отношения к произведению средних значений квадратов коэффициентов потоков $\langle v_n^2 \rangle \langle v_m^2 \rangle$ от центральности для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Результаты сравниваются с гидродинамическими расчетами (обозначены как ”Hydrodynamics”) для различных параметризаций [50] зависимости отношения вязкости сдвига η КГМ к плотности энтропии s от температуры T и расчетами транспортной модели AMPT [51].

Коэффициенты v_n для идентифицированных адронов измерены в столкновениях Pb–Pb при энергиях $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ. Представлены зависимости

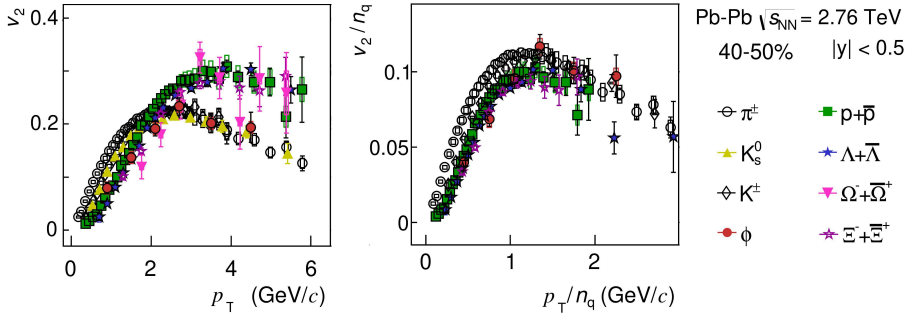


Рис. 8 — (слева) Зависимость v_2 для π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$ от поперечного импульса p_T для центральности 40–50 % в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ. (справа) Зависимость отношения v_2/n_q от отношения p_T/n_q , где n_q обозначает число валентных кварков в адроне.

v_2 от p_T для π^\pm , K^\pm , K_S^0 , $p + \bar{p}$, ϕ , $\Lambda + \bar{\Lambda}$, $\Xi^- + \bar{\Xi}^+$ и $\Omega^- + \bar{\Omega}^+$ в разных классах центральности (см. рис. 8). Для π^\pm , K^\pm и $p + \bar{p}$ также измерены коэффициенты потоков более высокого порядка v_3 , v_4 и v_5 (см. рис. 9). В области $p_T < 3$ ГэВ/с обнаружено упорядочивание v_n по массе адронов (см. рис. 8 (слева) и рис. 9), выражающееся в уменьшении при заданном p_T величины коэффициентов v_n с увеличением массы адронов. Это упорядочивание происходит из-за радиального расширения КГМ с общей скоростью v_T , которое модифицирует распределение поперечного импульса адронов p_T в зависимости от их массы m согласно соотношению $p_T \approx mv_T$. Результаты измерений согласуются с расчетами на основе гидродинамической модели iEBE-VISHNU [52] с малым значением отношения вязкости сдвига к плотности энтропии ($\eta/s = 0.08$), начальными условиями из модели АМРТ [53] и адронной фазы в рамках транспортной модели UrQMD [54].

В области поперечных импульсов $3 < p_T < 6$ ГэВ/с значения коэффициентов анизотропных потоков v_n различных адронов группируются на уровне 20 % в зависимости от того, являются ли они мезонами или барионами, т.е. величина v_n линейно зависит от количества кварков в адроне (см. рис. 8 (справа)). Это позволяет утверждать, что во время остывания и адронизации КГМ коалесценция кварков является адекватным механизмом образования адронов. Сравнение с расчетами модели АМРТ [53] (см. рис. 9 (справа), а также рис. 14 из [10]) подтверждает значимый эффект влияния поздней стадии эволюции КГМ и адронного перерасеяния на формирование величины v_n различных адронов. Фаза адронного перерасеяния [10] при малых значениях p_T модифицирует форму

$v_n(p_T)$ в зависимости от массы частиц и при промежуточных значениях p_T меняет соотношение между величинами v_n различных типов адронов в зависимости от числа составляющих их кварков.

Значения v_2 и v_3 заряженных пионов и (анти-)протонов также измерены для больших поперечных импульсов, вплоть до $p_T \approx 16$ ГэВ/с [7]. В этой области v_n слабо зависят от p_T . Показано, что значение v_2 и v_3 у протонов больше, чем у пионов, по крайней мере, до $p_T = 8$ ГэВ/с. Это означает, что зависимость потоков от числа и типа кварков в адроне проявляется и для процессов рождения адронов с большими значениями поперечных импульсов p_T .

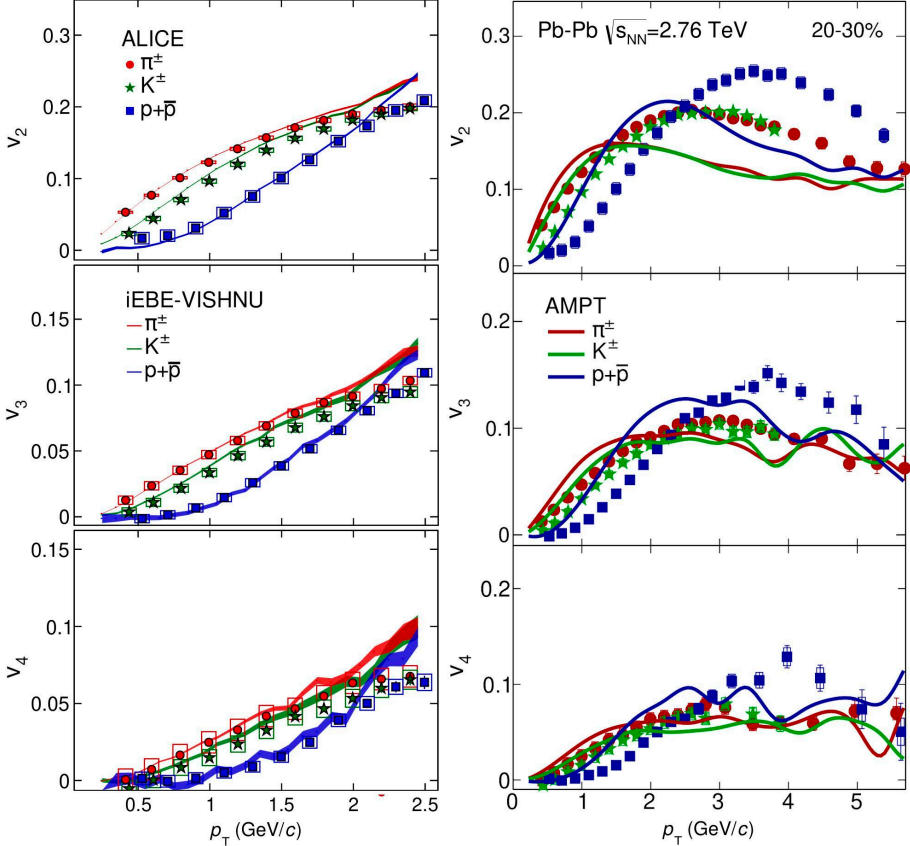


Рис. 9 — Зависимости v_2 , v_3 и v_4 для π^\pm , K^\pm и $p + \bar{p}$ от p_T для 20–30 % центральности в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Результаты сравниваются с гидродинамическими расчетами iEBE-VISHNU [52] и расчетами транспортной модели AMPT [51].

На основе полученных данных для коэффициентов потоков v_n и выходов различных адронов [1; 55; 56] был проведен Байесовский анализ [57–59] экспериментальных данных и расчетов численного моделирования с использованием современного представления о начальном состоянии столкновения ядер [60], уравнения состояния КХД [6; 61] и вязкой гидродинамики [50]. На рис. 10 пред-

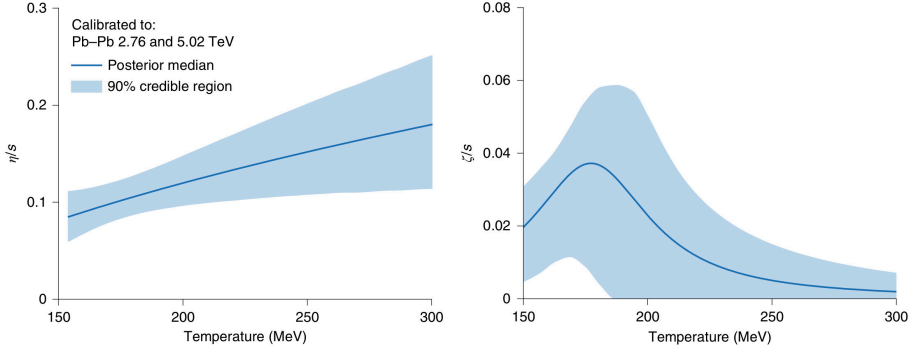


Рис. 10 — Результаты Байесовского анализа [57] для зависимости отношения сдвиговой η и объемной ζ вязкости к плотности энтропии s от температуры T , полученные на основе экспериментальных данных для столкновений Pb–Pb в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ.

ставлены результаты Байесовского анализа для характеристик кварк-глюонной материи (КГМ), таких как зависимости отношения сдвиговой и объемной вязкости к плотности энтропии от температуры, в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при температурах $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале – в условиях, близких начальному этапу развития Вселенной в первые микросекунды после Большого взрыва.

В заключении приведен основной результат работы: определены свойства кварк-глюонной материи (КГМ), такие как отношения сдвиговой и объемной вязкости к плотности энтропии, а также их зависимость от температуры (T), в ранее неисследованной области фазовой диаграммы КХД при температурах $150 < T < 300$ МэВ и нулевом барионном химическом потенциале – в условиях, близких начальному этапу развития Вселенной в первые микросекунды после Большого взрыва. Свойства КГМ определены на основе измерения анизотропных потоков адронов, рожденных в столкновениях ядер свинца при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ на установке ALICE Большого адронного коллайдера [1–16] и их сравнения с расчетами релятивистской вязкой гидродинамики для описания эволюции КГМ в неравновесных условиях, возникающих в столкновениях релятивистских тяжелых ядер при этих энергиях.

Основные достижения диссертационной работы:

— Впервые получены зависимости коэффициентов анизотропных потоков v_n заряженных адронов от центральности столкновения и поперечного импульса для различных гармоник n в столкновениях Pb–Pb при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ. Показано, что треугольный поток v_3 можно описать в терминах флуктуаций формы области образования КГМ, что необходимо для выделения реалистичной модели начального состояния и определения транспортных характеристик КГМ [1–3; 5–7; 14; 16].

— Впервые определены величины прямого v_1 , эллиптического v_2 , треугольного v_3 и квадратичного v_4 потоков заряженных адронов для энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в рекордном диапазоне псевдо-быстрот. Это позволило расширить диапазон применимости продольного скэйлинга эллиптического потока (v_2) до 8 единиц псевдо-быстроты [2; 5; 12].

— Впервые определен наклон направленного потока v_1 заряженных адронов относительно плоскости симметрии, заданной направлением отклонения нуклонов-спектаторов и направлением движения сталкивающихся ядер, при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Результат указывает на уменьшение наклона области образования КГМ и ослабление ее вращения относительно направления движения ядер, по сравнению со столкновениями на RHIC при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 0.2$ ТэВ [2; 8].

— Впервые обнаружена четная по быстрой компоненте направленного потока v_1 заряженных адронов по отношению к плоскости разлета нуклонов-спектаторов, что является доказательством дипольно-подобных флуктуаций энергии, выделенной при столкновениях ядер в области образования КГМ [2; 4; 5; 8].

— Впервые определены зависимости корреляции между коэффициентами потоков v_n и v_m заряженных адронов для различных комбинаций гармоник m и n от центральности и поперечного импульса, которые дали новые ограничения на флуктуации формы области образования КГМ в плоскости, перпендикулярной направлению движения сталкивающихся ядер [11; 13; 16].

— Впервые определены коэффициенты потоков v_n для идентифицированных адронов в диапазоне энергии столкновения $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 - 5.02$ ТэВ. Показано, что величины коэффициентов потоков v_n для мезонов и барионов в области поперечных импульсов $p_T \approx 3-6$ ГэВ/ c соотносятся согласно количеству составляющих их кварков, что указывает на то, что кварки группируются в адроны в процессе адронизации КГМ [5–7; 9; 10; 15].

— Разработан и реализован новый метод коррекции эффектов неоднородностей детектора в анализе коэффициентов потоков v_n , позволяющий проводить их измерения даже в условиях сильной азимутальной неоднородности акцептанса детектора [17; 18].

Публикации автора по теме диссертации

1. *Aamodt K., ... Selyuzhenkov I. et al.* Elliptic flow of charged particles in Pb–Pb collisions at 2.76 TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 105. P. 252302.
2. *Selyuzhenkov I.* Charged particle directed flow in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV measured with ALICE at LHC // *J. Phys.* 2011. Vol. G38. P. 124167.
3. *Aamodt K., ... Selyuzhenkov I. et al.* Higher harmonic anisotropic flow measurements of charged particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107. P. 032301.
4. *Selyuzhenkov I.* ALICE probes of local parity violation with charge dependent azimuthal correlations in Pb–Pb collisions // *PoS.* 2011. Vol. WPCF2011. P. 044.
5. *Selyuzhenkov I.* Anisotropic flow and other collective phenomena measured in Pb–Pb collisions with ALICE at the LHC // *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 2012. Vol. 193. P. 153.
6. *Selyuzhenkov I.* Azimuthal correlations and collective effects in a heavy-ion collisions at the LHC energies // *J. Phys. Conf. Ser.* 2013. Vol. 426. P. 012002.
7. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Anisotropic flow of charged hadrons, pions and (anti-)protons measured at high transverse momentum in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett.* 2013. Vol. B719. P. 18.
8. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Directed flow of charged particles at midrapidity relative to the spectator plane in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. P. 232302.
9. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Elliptic flow of identified hadrons in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *JHEP.* 2015. Vol. 06. P. 190.
10. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *JHEP.* 2016. Vol. 09. P. 164.
11. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Correlated event-by-event fluctuations of flow harmonics in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117. P. 182301.

12. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Pseudorapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett.* 2016. Vol. B762. P. 376.
13. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Systematic studies of correlations between different order flow harmonics in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Rev.* 2018. Vol. C97. P. 024906.
14. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Energy dependence and fluctuations of anisotropic flow in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ and 2.76 TeV // *JHEP.* 2018. Vol. 07. P. 103.
15. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Anisotropic flow of identified particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // *JHEP.* 2018. Vol. 09. P. 006.
16. *Acharya S. . S. I. e. a.* Investigations of anisotropic flow using multiparticle azimuthal correlations in pp, p–Pb, Xe–Xe, and Pb–Pb collisions at the LHC // *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 123. P. 142301.
17. *Selyuzhenkov I. and Voloshin S.* Effects of non-uniform acceptance in anisotropic flow measurement // *Phys. Rev.* 2008. Vol. C77. P. 034904.
18. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC // *Int. J. Mod. Phys.* 2014. Vol. A29. P. 1430044.

Список литературы

1. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Measurement of transverse energy at midrapidity in Pb–Pb collisions at 2.76 TeV // *Phys. Rev.* 2016. Vol. C94. P. 034903.
2. *Aamodt K. et al.* Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett.* 2011. Vol. B696. P. 328.
3. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Direct photon production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett.* 2016. Vol. B754. P. 235.
4. *Aamodt, K. et al.* Midrapidity antiproton-to-proton ratio in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 105. P. 072002.
5. *Aoki Y. et al.* The Order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics // *Nature.* 2006. Vol. 443. P. 675–678.
6. *Bazavov A. et al.* Chiral crossover in QCD at zero and non-zero chemical potentials // *Phys. Lett.* 2019. Vol. B795. P. 15.
7. *Arsene I. et al.* Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC? Perspective from the BRAHMS experiment // *Nucl. Phys.* 2005. Vol. A757. P. 1.
8. *Adcox K. et al.* Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration // *Nucl. Phys.* 2005. Vol. A757. P. 184.

9. *Adams J. et al.* Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions // Nucl. Phys. 2005. Vol. A757. P. 102.
10. *Back B. B. et al.* The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC // Nucl. Phys. 2005. Vol. A757. P. 28.
11. *Voloshin S. A., Poskanzer A. M., Snellings R.* Collective phenomena in non-central nuclear collisions // Landolt-Bornstein. 2010. Vol. 23. P. 293.
12. *Adamczyk L. et al.* Inclusive charged hadron elliptic flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 39$ GeV // Phys. Rev. 2012. Vol. C86. P. 054908.
13. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Charged and strange hadron elliptic flow in Cu+Cu collisions at 62.4 and 200 GeV // Phys. Rev. 2010. Vol. C81. P. 044902.
14. *Afanasiev S. et al.* Systematic studies of elliptic flow measurements in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. 2009. Vol. C80. P. 024909.
15. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Measurement of $\Upsilon(1S)$ elliptic flow at forward rapidity in Pb–Pb collisions // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 123. P. 192301.
16. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Study of J/ψ azimuthal anisotropy at forward rapidity in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // JHEP. 2019. Vol. 02. P. 012.
17. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* Event-shape engineering for the D-meson elliptic flow in mid-central Pb–Pb collisions // JHEP. 2019. Vol. 02. P. 150.
18. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* J/ψ elliptic flow in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 119. P. 242301.
19. *Acharya S., ... Selyuzhenkov I. et al.* D-meson azimuthal anisotropy in midcentral Pb–Pb collisions at 5.02 TeV // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 120. P. 102301.
20. *Adam J., ... Selyuzhenkov I. et al.* Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // JHEP. 2016. Vol. 09. P. 028.
21. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Azimuthal anisotropy of D meson production in Pb–Pb collisions // Phys. Rev. 2014. Vol. C90. P. 034904.
22. *Abbas E., ... Selyuzhenkov I. et al.* J/ψ elliptic flow in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111. P. 162301.
23. *Sirunyan A. et al.* Constraints on the chiral magnetic effect using charge-dependent azimuthal correlations // Phys. Rev. 2018. Vol. C97. P. 044912.
24. *Khachatryan V. et al.* Observation of charge-dependent azimuthal correlations in pPb collisions // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 118. P. 122301.
25. *Klochkov V., Selyuzhenkov I.* Anisotropic flow relative to the spectator plane in Pb+Pb collisions at 30A GeV/c // Nucl. Phys. 2019. Vol. A982. P. 439.
26. *Golosov O., ... Selyuzhenkov I. et al.* Effects of the detector non-uniformity in pion directed flow measurement relative to the spectator plane by the NA49 experiment at the CERN SPS // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 204. P. 06011.

27. *Kashirin E., ... Selyuzhenkov I. et al.* Measurement of pion directed flow relative to the spectator plane by the NA49 experiment // 2018. arXiv: [1810.07718](https://arxiv.org/abs/1810.07718) [nucl-ex].
28. *Golosov O., Selyuzhenkov I., Kashirin E.* Analysis of anisotropic transverse flow in Pb–Pb collisions at 40A GeV // KnE Energ. Phys. 2018. Vol. 3. P. 340.
29. *Golubeva M., ... Selyuzhenkov I. et al.* Forward hadron calorimeter at MPD/NICA // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 798. P. 012074.
30. *Svintsov I., ... Selyuzhenkov I. et al.* Flow performance in MPD at NICA // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 798. P. 012067.
31. *Parfenov P., ... Selyuzhenkov I. et al.* Performance studies of anisotropic flow with MPD at NICA // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 204. P. 07010.
32. *Guber I., Selyuzhenkov I. et al.* Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD) // GSI-2015-02020. 2015. P. 75.
33. *Blau D., Selyuzhenkov I. and Klochkov V.* Performance studies for strange hadron flow measurements in CBM at FAIR // KnE Energ. Phys. 2018. Vol. 3. P. 195.
34. *Klochkov V. and Selyuzhenkov I.* CBM performance for anisotropic flow measurements // KnE Energ. Phys. 2018. Vol. 3. P. 416.
35. *Aamodt K. et al.* The ALICE experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. Vol. 3. S08002.
36. *Barlow R.* Systematic errors: Facts and fictions // 2002. P. 134. arXiv: [hep-ex/0207026](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0207026) [hep-ex].
37. *Giacalone G. et al.* Skewness of elliptic flow fluctuations // Phys. Rev. 2017. Vol. C95. P. 014913.
38. *Yan L., Ollitrault J.-Y., Poskanzer A. M.* Eccentricity distributions in nucleus-nucleus collisions // Phys. Rev. 2014. Vol. C90. P. 024903.
39. *McDonald S. et al.* Hydrodynamic predictions for Pb+Pb collisions at 5.02 TeV // Phys. Rev. 2017. Vol. C95. P. 064913.
40. *Zhao W. et al.* Collective flow in 2.76 A TeV and 5.02 A TeV Pb+Pb collisions // Eur. Phys. J. 2017. Vol. C77. P. 645.
41. *Betz B. et al.* Cumulants and nonlinear response of high p_T harmonic flow at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Rev. 2017. Vol. C95. P. 044901.
42. *Sirunyan A. M. et al.* Azimuthal anisotropy of charged particles with transverse momentum up to 100 GeV/c in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV // Phys. Lett. 2018. Vol. B776. P. 195.
43. *Denicol G., Monnai A., Schenke B.* Moving forward to constrain the shear viscosity of QCD matter // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. P. 212301.
44. *Back B. B. et al.* Energy dependence of elliptic flow over a large pseudorapidity range in Au+Au collisions at RHIC // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94. P. 122303.

45. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* System-size independence of directed flow at the Relativistic Heavy-Ion Collider // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. P. 252301.
46. *Bleibel J. et al.* Anisotropic flow at LHC from the quark gluon string model with parton rearrangement // *Phys. Lett.* 2008. Vol. B659. P. 520.
47. *Csernai L. P. et al.* Fluid Dynamical Prediction of Changed v_1 -flow at LHC // *Phys. Rev.* 2011. Vol. C84. P. 024914.
48. *Chatterjee S., Bozek P.* Strong directed flow of heavy flavor as a probe of matter distribution in heavy-ion collisions // *Nucl. Phys.* 2019. Vol. A982. P. 679–682.
49. *Bozek P., Wyslkiel I.* Directed flow in ultrarelativistic heavy-ion collisions // *Phys. Rev.* 2010. Vol. C81. P. 054902.
50. *Niemi H. et al.* Event-by-event fluctuations in a perturbative QCD + saturation + hydrodynamics model // *Phys. Rev.* 2016. Vol. C93. P. 024907.
51. *Qian J., Heinz U.* Hydrodynamic flow amplitude correlations in event-by-event fluctuating heavy-ion collisions // *Phys. Rev.* 2016. Vol. C94. P. 024910.
52. *Song H., Bass S., Heinz U. W.* Spectra and elliptic flow for identified hadrons in 2.76A TeV Pb+Pb collisions // *Phys. Rev.* 2014. Vol. C89. P. 034919.
53. *Xu J. and Ko C.M.* Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV in a multiphase transport model // *Phys. Rev.* 2011. Vol. C83. P. 034904.
54. *Bass S. A. et al.* Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 1998. Vol. 41. P. 255.
55. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Centrality dependence of π , K, p production in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Rev.* 2013. Vol. C88. P. 044910.
56. *Abelev B., ... Selyuzhenkov I. et al.* Event-by-event mean p_T fluctuations in pp and Pb–Pb collisions at the LHC // *Eur. Phys. J.* 2014. Vol. C74. P. 3077.
57. *Bernhard J. E. et al.* Bayesian estimation of the specific shear and bulk viscosity of quark–gluon plasma // *Nature Phys.* 2019. Vol. 15. P. 1113.
58. *Moreland J. et al.* Estimating initial state and quark-gluon plasma medium properties using a hybrid model with nucleon substructure calibrated to pPb and Pb–Pb collisions at 5.02 TeV. 2018. arXiv: [1808.02106](https://arxiv.org/abs/1808.02106) [[nucl-th](https://arxiv.org/abs/1808.02106)].
59. *Devetak D., ... Selyuzhenkov I. et al.* Global fluid fits to identified particle transverse momentum spectra from heavy-ion collisions at the Large Hadron Collider. 2019. arXiv: [1909.10485](https://arxiv.org/abs/1909.10485) [[hep-ph](https://arxiv.org/abs/1909.10485)].
60. *Moreland J. et al.* Alternative ansatz to wounded nucleon and binary collision scaling in high-energy nuclear collisions // *Phys. Rev.* 2015. Vol. C92. P. 011901.
61. *Bazavov A. et al.* Equation of state in (2+1)-flavor QCD // *Phys. Rev.* 2014. Vol. D90. P. 094503.

Селюженков Илья Владимирович

Анизотропные потоки адронов в столкновениях тяжелых ядер
на установке ALICE Большого адронного коллайдера

Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____