

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. СКОБЕЛЬЦИНА

На правах рукописи

Эйюбова Гюльнара Ханларовна

АНИЗОТРОПИЯ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ
В СТОЛКНОВЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР
И КВАРК-ГЛЮОННАЯ МАТЕРИЯ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена на кафедре Физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.Л. Коротких

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Б. А. Арбузов (НИИЯФ МГУ), г. Москва

кандидат физико-математических наук, начальник сектора ОИЯИ

П. И. Зарубин (ОИЯИ), г. Дубна

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк.

Защита диссертации состоится “13” ноября 2009 года в 15 часов на заседании Д 501.001.77 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 5, “19 корпус НИИЯФ МГУ”).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына.

Автореферат разослан “8” октября 2009 года

Ученый секретарь Совета по защите кандидатских
и докторских диссертаций

доктор физико-математических наук

С. И. Страхова

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Теоретическое и экспериментальное исследование свойств ядерной материи в условиях экстремально высоких температур и плотностей энергии является одной из актуальнейших задач современной физики высоких энергий, вызывающей растущий на протяжении последних 20 лет научный интерес. Достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового сверхплотного состояния вещества — кварк-глюонной плазмы (КГП) — предсказывается статистической Квантовой хромодинамикой (КХД) для сильновзаимодействующих систем с достаточно высокой температурой (более 200 МэВ) и/или плотностью барионного заряда. Согласно современным космологическим представлениям, кварк-адронный фазовый переход имел место в ранней Вселенной в первые микросекунды после Большого Взрыва. Особую актуальность данная тематика приобретает в связи с запуском в 2009 г. Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider — LHC) в Европейском центре ядерных исследований ЦЕРН. Эксперименты с пучками тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере дадут уникальную возможность воссоздания в лабораторных условиях существовавшей на самых ранних стадиях развития Вселенной прото-материи, изучение свойств которой представляет значительный интерес как с точки зрения понимания природы фундаментальных взаимодействий и происхождения элементарных частиц, так и для проверки современных теорий рождения и эволюции Вселенной.

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал по исследуемым проблемам, полученный на ускорителе SPS в ЦЕРНе и коллайдере RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории США. Ряд полученных данных свидетельствует о проявлении коллективных эффектов на партонном уровне и говорит в пользу гипотезы формирования нового сверхплотного состояния ядерной материи (например КГП) в наиболее центральных соударениях тяжелых ионов, хотя возможности аль-

тернативных интерпретаций по-прежнему обсуждаются в литературе. Исследования в области энергий Большого адронного коллайдера в ЦЕРНе откроют новый режим физики взаимодействий тяжелых ионов, в котором жесткие и полужесткие процессы рождения будут доминировать над мягкими процессами, а статистика ожидается достаточно высокой для систематического анализа различных аспектов КХД-физики в среде с начальной плотностью энергии, намного превышающей критическое значение для кварк-адронного фазового перехода. Создание новых технологий диагностики экстремальных состояний ядерной материи в соударениях тяжелых ионов (с использованием уже имеющихся разработок в этой области при меньших энергиях) позволит получить новые свидетельства о формировании кварк-глюонной плазмы в соударениях тяжелых ионов и изучить структуру и эволюцию ядерной материи.

Цели диссертационной работы

1. Исследование азимутальной анизотропии частиц, рожденных в ядро-ядерных столкновениях при сверхвысоких энергиях на коллайдерах RHIC и LHC, с помощью реалистичной модели HYDJET++, включающей мягкие и жесткие КХД-процессы. Оценка параметра эллиптической анизотропии при энергии LHC.
2. Восстановление коллективного потока частиц различными методами и учет непотоковых корреляций в условиях большого вклада жестких процессов при энергиях LHC. Создание программных разработок для внедрения данных методов в программное обеспечение экспериментов на LHC.
3. Обоснование возможности измерения с высокой точностью азимутальной анизотропии на трековой установке CMS (Компактный Мюонный Соленоид) LHC с использованием для этой цели информации об устройстве трекера CMS и программного обеспечения реконструкции событий на CMS.

4. Разработка метода быстрого дискретного вейвлет-преобразования для анализа сложной структуры в двумерном угловом распределении частиц, включающей струи адронов и кольцеобразные образования от предполагаемого глюонного черенковского излучения при прохождении партона через плотную кварк-глюонную среду.
5. Построение модели образования эллиптического потока в протон-протонном столкновении при энергиях ЛНС. Доказательство сильной зависимости параметра азимутальной анизотропии от формы распределения плотности партонов в начальном состоянии нуклона.

Основные результаты диссертационной работы:

1. В рамках модели HYDJET++ исследована роль жестких и мягких процессов в формировании эллиптического потока. Показано, что рождение струй изменяет характер поведения зависимости $v_2(p_T)$, приводя к спаду и практически зануляя значение потока при $p_T > 2$ ГэВ/с при энергии ЛНС. Тем не менее при больших p_T эффект подавления струй в анизотропной среде дает ненулевые значения эллиптического потока $v_2 \approx 5\%$.

Получены предсказания эллиптического потока для PbPb столкновений при энергии $\sqrt{s} = 5500$ ГэВ как $v_2 = v_2(p_T, \eta, b)$. Значения интегрального эллиптического потока для энергий ЛНС в 1.5–2 раза меньше, чем значения для энергий РННС, что также связано с влиянием жестких процессов, сечение которых растет с энергией.

2. В рамках модели HYDJET++ проанализирован эффект распада резонансов на поведение $v_2(p_T)$. Поток приморожденных частиц оказывается меньше, чем поток всех частиц, включая продукты распада резонансов. Меньше всего эффект распада резонансов влияет на каоны. Показано, что при рассмотрении скейлинга по числу конституэнтных кварков $v_2/n_q(K E_T/n_q)$, который предполагает образование потока на партонном уровне, важно учитывать эффекты распада резонансов, т.е.

эффекты конечного состояния. Пренебрежение этим эффектом может привести к ложному скейлингу.

3. Проанализированы возможности различных методов определения эллиптического потока v_2 (метод с определением плоскости реакции, метод двухчастичных корреляций, метод нулей Ли-Янга). Показано, что значительное уменьшение систематической ошибки в определении v_2 при высоких поперечных импульсах может быть достигнуто при использовании метода нулей Ли-Янга, эффективно исключаящего непотоковые корреляции, что особенно будет важно при энергиях ЛНС из-за роста вклада сруйных событий. При $v_2\sqrt{N} > 1$, где N — типичное значение множественности изучаемых частиц в событии, метод надежно выделяет поток v_2 .
4. Проведена реконструкция значений $v_2(p_T, \eta)$ и величины разрешения угла плоскости реакции для трекера CMS установки. Показано, что трековая система эксперимента CMS позволяет с достаточной степенью точности проводить измерения эллиптического потока частиц в соударениях тяжелых ионов на ЛНС. Оценка общей систематической ошибки, включающей учет конечной множественности и непотоковые корреляции от рождения струй, составляет не более, чем 20%.
5. Разработан метод быстрого вейвлет-анализа для исследования сложных структур в двумерном угловом распределении частиц и показано, что с его помощью можно выделять и исследовать конусные структуры. Кроме того, с помощью предложенного метода вычитания фона в вейвлет анализе можно существенно понизить порог определения поперечной энергии струи до $E_T \geq 20$ ГэВ/с в сравнении со стандартными алгоритмами поиска струйных событий.
6. В рамках модели неполной термализации вещества сделаны предсказания значений эллиптического потока в протон-протонных соударениях для различных форм пространственного распределения протона.

Показано, что как абсолютная величина v_2 , так и ее зависимость от центральности столкновения в сильной степени определяется структурой пространственного распределения плотности партонов в протоне.

Научная новизна диссертации:

1. В диссертации впервые проанализирована возможность трековой системы эксперимента CMS на LHC по измерению азимутальной анизотропии частиц. Зависимость коэффициента азимутальной анизотропии v_2 от поперечного импульса и псевдобыстроты реконструируется с достаточно высокой точностью ($< 3\%$). Таким образом, показано, что трековая система эксперимента CMS позволяет с достаточной степенью точности проводить измерения эллиптического потока частиц в соударениях тяжелых ионов на LHC.
2. В работе впервые приведены оценки эллиптического потока в протон-протонных столкновениях, полученные в рамках модели неполной термализации с учетом пространственной формы плотности протона. Впервые предсказана зависимость эллиптического потока в pp-столкновениях от прицельного параметра.
3. Впервые применен метод вейвлет-анализа для нахождения струй и удаления фона с высокой множественностью частиц. Найдено, что положение струй хорошо определяется по положению вейвлет-коэффициентов на разных масштабах, в зависимости от ширины струи. Выделение кольцеобразной структуры невозможно в стандартных конусовых алгоритмах поиска струй, но становится простым в двумерном дискретном вейвлет-преобразовании.

Практическая ценность работы

Главный интерес к анизотропному потоку обусловлен его чувствительностью к самым ранним стадиям эволюции события. Поэтому необходимо предсказание эллиптического потока при энергиях LHC и тщательное исследование возможностей измерения потока на построенных установках. В

работе установлено, что можно с высокой точностью измерять эллиптический поток частиц в соударениях тяжелых ионов на ЛНС с помощью трековой системы эксперимента CMS, что открывает новые возможности для анализа свойств ядерной материи в малоизученных режимах экстремально высоких плотностей энергий и температур. Разработанные методы реконструкции коэффициента азимутальной анизотропии v_2 и вейвлет-метод и соответствующее программное обеспечение будут использованы для обработки экспериментальных данных после начала работы Большого адронного коллайдера. Проведенный анализ различных методов измерения азимутальной анизотропии при энергиях ЛНС позволит выбрать стратегию для надежного выделения фактора эллиптического потока v_2 . Результаты моделирования эллиптического потока в ядро-ядерных и протон-протонных столкновениях могут быть использованы для предварительных оценок в измерениях на ЛНС.

В событийном анализе важно не только наблюдать сложную структуру (конусные структуры, подложка, шлейф), но и отделить ее от адронных струй и определить ее количественные параметры. Разработан метод количественного выделения конусных структур в двумерных угловых распределениях в расчете на событийный анализ данных.

Личный вклад автора

Автором проведены вычисления эллиптического потока в рамках модели HYDET++ и сравнение с экспериментальными данными коллайдера RHIC, сделаны предсказания для энергии ЛНС. Исследовано влияние эффекта распада резонансов и рождения струй на значение и поведение эллиптического потока и на проявление скейлинга по числу конституэнтных кварков. Автором проведен сравнительный анализ различных методов определения эллиптического потока и на количественном уровне показано преимущество метода нулей Ли-Янга для исключения непотоковых корреляций. Автором выполнено компьютерное моделирование откликов трекового детектора установки CMS на ЛНС с помощью официального про-

граммного обеспечения этого эксперимента и произведена реконструкция параметров треков. С использованием реконструированных треков проведено вычисление плоскости реакции и эллиптического потока частиц различными методами с помощью компьютерных программ, написанных автором работы. Решающий вклад автора состоит в создании программного обеспечения и тестировании алгоритма вейвлет-преобразования.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах НИИЯФ МГУ и Ломоносовских чтениях МГУ (2007), а также на следующих конференциях: Международная конференция “Quark Matter’2008” (Джайпур, Индия, 2008), 4-й международный семинар по физике высоких p_T “High- p_T physics at LHC” (Прага, Чехия, 2009), совещания RDMS CMS коллаборации (Минск, 2008), Сессия-конференция РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” (Москва, ИТЭФ, 2007), Международный семинар по физике ультррелятивистских тяжелых ионов “Workshop of European Research Group on Ultrarelativistic Heavy Ion Physics” (Дубна, 2006).

Публикации

Основные результаты, представленные к защите, опубликованы в четырех работах. Перечень опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений общим объемом 122 страниц, включая 7 таблиц, 66 рисунков и список цитированной литературы из 141 наименований.

II. Содержание работы

Во Введении представлена общая характеристика диссертационной работы, анализируется актуальность темы проводимого исследования, а также дается краткое описание содержания глав диссертации.

В ГЛАВЕ I приводится обзор научной литературы, обсуждаются общие проблемы, связанные с изучением ядро-ядерных соударений высокой

энергии. Обсуждается также возможность формирования кварк-глюонной плазмы в столкновениях тяжелых ионов при энергиях ускорителя ЛНС. Для извлечения информации об эволюции системы и о свойствах образованной материи предложен ряд наблюдаемых эффектов: подавление выхода J/Ψ и Υ -мезонов по сравнению с выходом в протон-протонных столкновениях, подавление выхода частиц с большими поперечными импульсами p_T , подавление двуструйных событий, гидродинамическое коллективное движение частиц, отношение выходов различных адронов и др.

В **ГЛАВЕ II** обсуждается эллиптический поток частиц в нецентральных столкновениях ядер.

В разделе II.1 дается общее представление о коллективном потоке, о механизме его образования, изложен необходимый математический аппарат.

В разделе II.2 приводится обзор экспериментальных данных по анизотропному потоку v_2 . Наблюдение достаточно большой ($v_2 \cong 0.2$) азимутальной анизотропии при энергиях РНС и ее количественное описание в гидродинамической модели стало одним из главных признаков проявления образования кварк-глюонной материи.

В разделе II.3 вычисляется эллиптический поток в рамках модели HYDJET++ для столкновений PbPb при энергии ЛНС (описание модели приведено в Приложении). Проведено сравнение экспериментальных данных РНС по эллиптическому потоку идентифицированных частиц с вычислениями модели HYDJET++. Из рис. 1 видно, что модель разумно описывает данные в диапазоне $p_T \approx 0 \div 3$ ГэВ/с.

Выполнен анализ влияния распада резонансов на поток идентифицированных частиц. Модель HYDJET++ включает широкую таблицу резонансов (360 частиц). В рамках этой модели получено, что поток v_2 прямых частиц меньше, чем поток всех частиц данного типа, включающих продукты распада резонансов. Также показано, как это влияет на формирования скейлинга $v_2(K E_T)/n_q$ по числу конституэнтных кварков. На рис. 2 видно, что кривые значительно сближаются при рассмотрении потока для всех

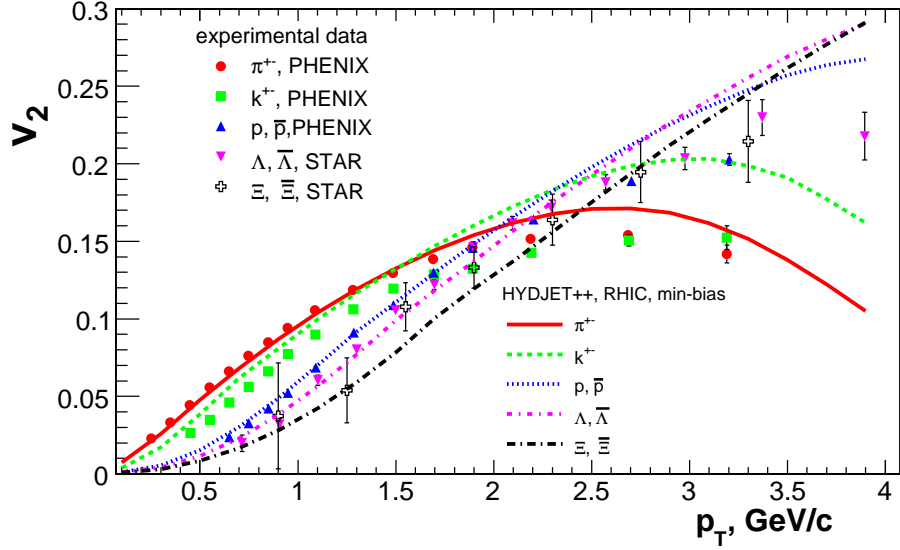


Рис. 1: Значения эллиптического потока $v_2(p_T)$, полученные в модели HYDJET++ и сравнение с данными RHIC

частиц по сравнению с потоком для прямых частиц. Этот эффект более выражен для энергии LHC (рис. 2, правый). Также обсуждается влияние струй на эллиптический поток.

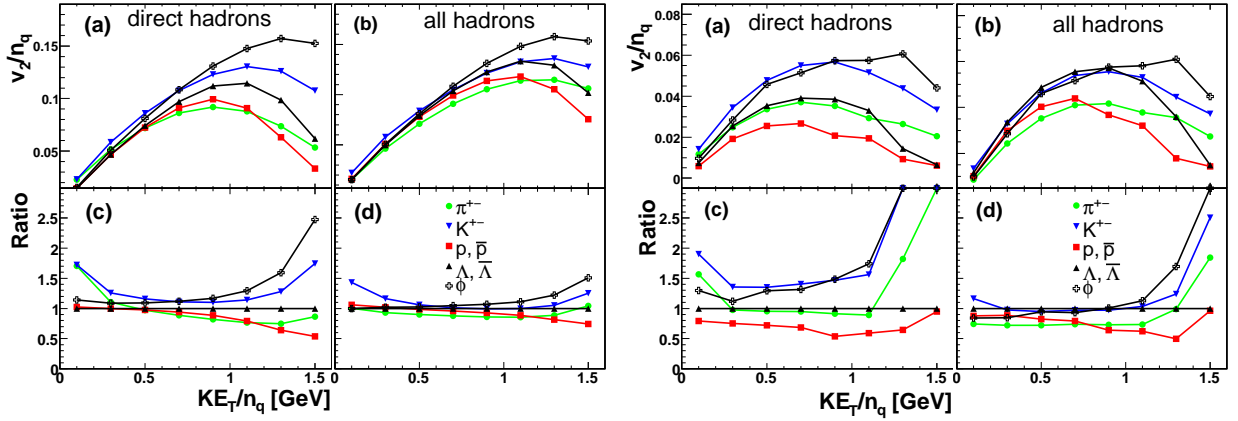


Рис. 2: Слева: а) Значения эллиптического потока $v_2(p_T)$ в столкновениях AuAu при энергии RHIC, полученные в модели HYDJET++ для разных типов прямых частиц б) для частиц, включающих продукты распада резонансов. с), d) отношение кривых в а) б) соответственно. Справа: то же, но для PbPb-столкновений при энергии LHC.

Проведено восстановление эллиптического потока различными методами и сравнение эффективности восстановления данных методов. На рис. 3 представлена зависимость от прицельного параметра столкновения $v_2(b)$

для смоделированных генератором HYDJET++ событий, посчитанная различными методами: $v_2\{EP\}$ — методом с вычислением плоскости события, $v_2\{2\}$ — методом двухчастичных корреляций, $v_2\{\infty\}$ — методом нулей Ли-Янга, а также истинное значение потока v_2^{true} , определенное с известным углом плоскости реакции. Из рисунка видно, что методы $v_2\{EP\}$ и $v_2\{2\}$ имеют большую погрешность для наиболее центральных событий, где значение потока невелико, и для наиболее периферических, где мала множественность, и наиболее оптимально описывают поток в диапазоне полупериферических событий. Метод $v_2\{\infty\}$ дает практически истинное значение v_2^{true} во всем интервале центральностей.

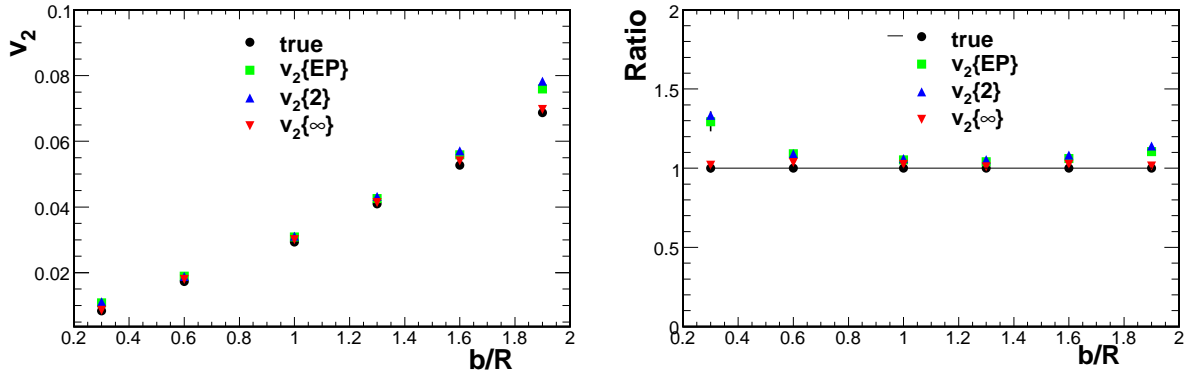


Рис. 3: Слева: Восстановление эллиптического потока различными методами в зависимости от центральности. Справа: Отношение полученных данным методом значений потока к истинному значению, посчитанному в генераторе.

ГЛАВА III. Важной частью проведения эксперимента является предварительное компьютерное моделирование откликов детектора и вычисление физических величин для смоделированных данных. В данной главе приведено описание установки CMS на LHC и вычисление эллиптического потока для этой установки с помощью компьютерного моделирования.

В разделе III.1 обсуждается научная программа исследований эксперимента на Большом Адронном Коллайдере.

В разделе III.2 дается общее описание установки Компактный Мюонный Соленоид (CMS) и ее отдельных детекторов.

В разделе III.3 рассматривается программное обеспечение для модели-

рования ядро-ядерных соударений на установке CMS.

В разделе III.4 исследованы возможности трекера установки CMS по измерению плоскости реакции и эллиптического потока в столкновении тяжелых ядер. Приведены результаты как на уровне генератора частиц, так и для случая полного моделирования откликов установки. На рис. 4 представлены зависимости $v_2(p_T)$ и $v_2(\eta)$, полученные методом определения плоскости события, для смоделированных и реконструированных событий. Зависимости коэффициента азимутальной анизотропии v_2 от попереч-

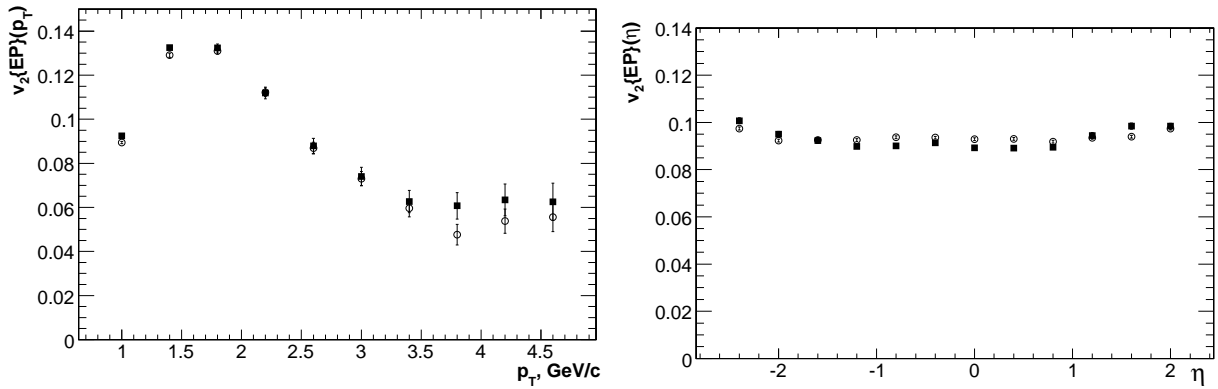


Рис. 4: p_T -зависимость и η -зависимость $v_2\{EP\}$ -коэффициентов для столкновений PbPb при прицельном параметре $b = 9$ фм. Полые точки — для смоделированных, сплошные — для реконструированных событий на CMS трекере.

ного импульса и псевдобыстроты реконструируется с достаточно высокой точностью ($< 3\%$).

ГЛАВА IV посвящена многочастичным корреляциям в ядро-ядерных столкновениях, таким, как струи, конусные структуры.

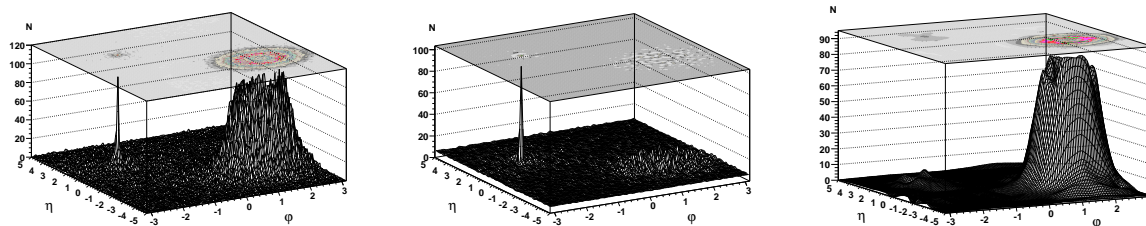
Раздел IV.1 содержит описание концепции струй и алгоритмов их восстановления. Рождение жестких адронных струй в экспериментах по e^+e^- -аннигиляции, в ep -, pp - и $p\bar{p}$ -взаимодействиях на коллайдерах — достаточно хорошо изученное явление, которое явилось наглядным тестом теории возмущений КХД. Главное отличие распространения струй в вакууме и в среде заключается в потере энергии струи в среде. Подавление выхода пар жестких струй предполагается использовать как признак формирования сверхплотного состояния КГП в соударениях ядер. Алгоритмы выделения

струй могут быть разбиты на две группы: кластерные алгоритмы и конусные алгоритмы. Обе группы основаны на предположении, что адроны в струе “близки” друг другу: либо в координатном пространстве, либо в импульсном соответственно.

В разделе IV.2 содержится обзор экспериментальных данных RHIC по подавлению частиц с большим поперечным импульсом, а также по двух-адронным азимутальным корреляциям с лидирующим адроном. Вводится фактор R_{AA} как выход частиц в ядро-ядерных столкновениях на пару сталкивающихся нуклонов по сравнению с протон-протонным столкновением. Оказалось, что в центральных AuAu-столкновениях выход адронов при больших p_T (≥ 2 ГэВ/с) подавлен в пять раз.

В разделе IV.3 описывается идея глюонного черенковского излучения и конуса Маха. В опубликованных теоретических работах на основе новых корреляционных данных широко обсуждаются вопросы о природе сложных структур в угловых распределениях частиц. В частности, в 3-х частичной корреляции хорошо видна конусная структура. Предложены два механизма ее образования: конус Маха (ударные волны в плотной среде кварк-глюонной материи) и черенковское излучение глюонов при прохождении быстрого кварка через эту среду.

В разделе IV.4 описан алгоритм нахождения с помощью вейвлет-анализа таких физических объектов как струи и кольцевые структуры. Вейвлет-анализ заключается в разложении функции $f(x)$ в ряд по базисным функциям $\psi_{a,b}(x)$ специального вида, называемых вейвлетами. Отличительная черта вейвлет-преобразования состоит в том, что базисная функция задана на конечном интервале (либо быстро убывает на бесконечности), а вся область задания функции $f(x)$ охватывается благодаря последовательным сдвигам базисной функции. Таким образом вейвлет-преобразование позволяет выявлять локальные характеристики функции. На рис. 5а) представлен результат анализа смоделированного узкого гауссовского пика и крупномасштабной кольцевой структуры. Вейвлет анализ позволяет на-



а)

б)

в)

Рис. 5: а) Анализируемая начальная гистограмма; б) восстановление узкого пика; в) восстановление крупномасштабной структуры.

можно выделить как узкий пик, так и конусную структуру. Для этого при обратном вейвлет-преобразовании используются либо только вейвлет-коэффициенты на мелких шкалах (восстановление узкого пика, рис. 5б), либо наоборот, только на крупных шкалах (выявление крупномасштабной кольцевой структуры, рис. 5в). Видно, что при рассмотрении гистограммы на этих масштабах выделяется структура, изначально присутствующая в функции. Также, на основе анализа смоделированных генераторами событий PYTHIA и NIGING предложен алгоритм, позволяющий определять положения осей струй, рождающихся в соударениях тяжелых ионов, при большой множественности фона. Обсуждаются проблемы вычитания фона.

ГЛАВА V посвящена исследованию эллиптического потока в протон-протонных столкновениях и его взаимосвязи с пространственными характеристиками протона (плотность распределения протона, площадь перекрытия двух протонов с заданным прицельным параметром и ее эксцентриситет). Вопрос о коллективном потоке в pp-столкновениях до настоящего времени серьезно не обсуждался. В опубликованных работах появление азимутальной анизотропии рассматривается как следствие модельных расчетов, не связанных с образованием сгустка КГМ. В то же время естественно предположить, что такой сгусток образуется в pp-столкновениях. Возникает вопрос о его пространственной форме и о величине эллиптического потока.

В Разделе V.1 описана модель неполной термализации. Принято рас-

смаатривать отношение эллиптического потока к эксцентриситету (v_2/ε) как функцию плотности частиц, равной отношению множественности к площади перекрытия двух ядер. Согласно гидродинамическим предсказаниям, v_2 пропорционально эксцентриситету ε начальной области перекрытия. При неполном термодинамическом равновесии коэффициент пропорциональности зависит от числа Кнудсена $K = \lambda/R$, где λ — длина свободного пробега. Модель имеет два свободных параметра: эффективное партонное сечение взаимодействия и эллиптический поток v_2 в гидродинамическом пределе. Эти параметры извлекаются из описания данных на RHIC по ядроядерному взаимодействию.

В Разделе V.2 приведены различные распределения плотности протона. Пространственная структура протона широко обсуждается в литературе. Предложены различные формы радиальной зависимости: экспоненциальная, гауссовская, ферми-распределение и твердой сферы. Описано вычисление пространственных характеристик (эксцентриситета, площади перекрытия) в глауберовском эйкональном приближении.

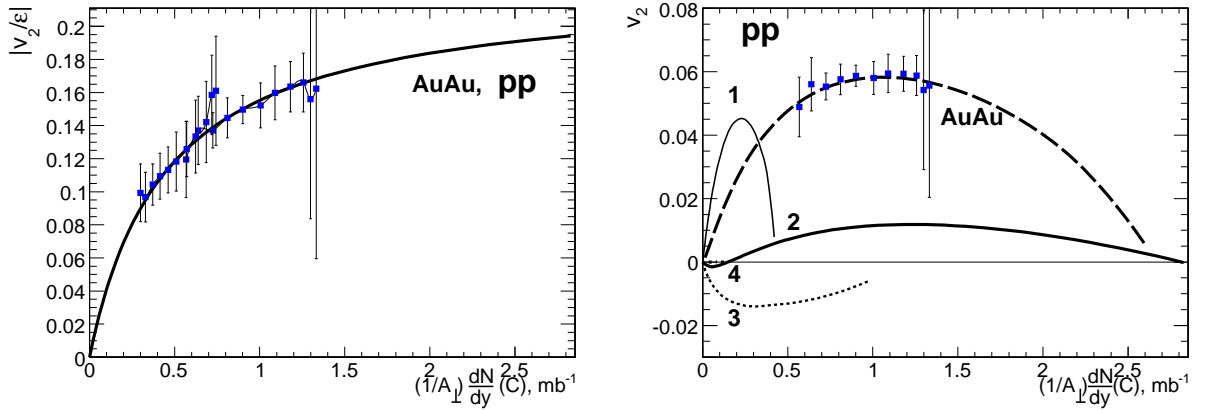


Рис. 6: Слева: Отношение v_2/ε в AuAu-столкновениях на RHIC как функция плотности множественности $\frac{1}{A_{\perp}} \frac{dN}{dydC}$. Кривая — результат расчетов в модели неполной термализации. Справа: Эллиптический поток в pp-столкновениях при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ для различных распределений пространственной плотности: (1) — твердая сфера с $R = 0.89$ фм, (2) распределение Ферми с $R = 0.56, a = 0.112$ фм, (3) — экспоненциальное распределение с $R_{rms} = 0.70$ фм, (4) — распределение Ферми с $R = 1.05, a = 0.290$ фм, пунктирная линия — AuAu-столкновения.

В разделе V.3 изложены полученные теоретические предсказания величины эллиптического потока в протон-протонных соударениях в рамках модели неполной термализации рожденного вещества. Результаты сравниваются с потоком в ядро-ядерных столкновениях на RHIC. Результаты для протон-протонных столкновений показаны на рис. 6. Анизотропный поток v_2 для плотности распределения жесткой сферы в пять раз больше, чем для распределения с размытым краем. Для экспоненциального распределения плотности протона эллиптический поток отрицателен. Малая величина потока в протон-протонных столкновениях делает его экспериментальное измерение затруднительным, как вследствие вклада так называемых непотоковых эффектов, так и из-за флуктуаций самого значения потока.

В Приложении обсуждаются программы-генераторы HIJING, PYTHIA и HYDJET++. Приведено подробное описание используемых методов вычисления эллиптического потока и вейвлет-анализа.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

III. Список публикаций по теме диссертации

1. В.Л. Коротких, Г.Х. Эйюбова. “Двумерный вейвлет-анализ смоделированных угловых распределений частиц в столкновениях релятивистских ядер”, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия, с. 20-23 (2008).
2. I.M. Dremin, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, L.I. Sarycheva. “Two-dimensional discrete wavelet analysis of multiparticle event topology in heavy-ion collisions”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35** 095106, 10pp (2008).
3. В.Л. Коротких, И.П. Лохтин, С.В. Петрушанко, Л.И. Сарычева, А.М. Снигирев, Г.Х. Эйюбова. “Эллиптический поток частиц в соударениях тяжелых ионов и возможность его измерения при энергиях *LHC*” ЯФ, т.**71**, с. 2179-2188 (2008).
4. G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh, I.P. Lokhtin, S.V. Petrushanko, L.I. Sarycheva, A.M. Snigirev, D. Krofcheck. “Azimuthal Anisotropy in Heavy Ions Collisions with CMS Tracker”, CMS Analysis Note, **2007/004**, 14pp (2007).

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии КДУ

Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: press@kdu.ru