

На правах рукописи

Окороков Виталий Алексеевич

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ
И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ
ПРОЦЕССОВ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Автор:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'V. A. Okorokov', written over a light gray rectangular background.

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Коротких Владимир Леонидович,
НИИЯФ им. Д.В. Скобелыцына МГУ (г. Москва), вед.н.с.

Доктор физико-математических наук
Литвиненко Анатолий Григорьевич,
ЛФВЭ им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, ОИЯИ (г. Дубна), нач. сектора

Доктор физико-математических наук
Пантуев Владислав Сергеевич,
ИЯИ РАН (г. Москва), вед.н.с.

Ведущая организация:

ФГБУ «ГНЦ РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики»
им. А.И. Алиханова (г. Москва)

Защита состоится «16» апреля 2014 г. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31; тел. +7-(499)-324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



Улин С.Е.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию пространственно-временной эволюции процессов сильного взаимодействия на основе изучения коллективных эффектов в столкновениях частиц и атомных ядер при промежуточных и высоких энергиях. В данной работе был использован экспериментальный материал, полученный на пузырьковых камерах ГНЦ РФ ИТЭФ, НИЯУ МИФИ, ЦЕРН и на установке STAR.

Актуальность темы

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последнее время, полная теория сильных взаимодействий, применимая для любых начальных энергий, не создана. Квантовая хромодинамика (КХД), рассматриваемая на данный момент в качестве такой теории, в хорошем согласии с экспериментом описывает взаимодействия на относительно малых расстояниях. Одной из важнейших проблем современной физики фундаментальных взаимодействий является проблема конфайнмента, имеющего непертурбативную природу.

В настоящее время считается установленным фактом конечная протяженность процесса сильного взаимодействия в пространстве-времени. Физический анализ корреляций и коллективных переменных позволяет установить фундаментальную взаимосвязь геометрии и динамических особенностей сильного взаимодействия. Систематическое, основанное на применении различных методов и подходов, изучение коллективных эффектов в мягких адрон-адронных и адрон-ядерных процессах, сравнение с результатами для жестких столкновений является актуальным и может дать новую информацию, необходимую для завершения КХД как теории сильного взаимодействия, а также для более полного описания структуры атомного ядра. К таким эффектам относится, в частности, образование струй вторичных частиц. Другая возможность исследования фундаментальных особенностей КХД связана с изучением поведения среды при экстремальных условиях, то есть при таких температурах, при которых кварки уже неспособны образовывать бесцветные состояния в термически возбужденном глюонном поле. Это новое состояние сильновзаимодействующей материи, в силу исторических причин называемое, как правило, «кварк-глюонная плазма» (КГП), может быть образовано в столкновениях релятивистских ядер и при экспериментально достигнутых энергиях является существенно непертурбативным. Как показали многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, одним из наиболее перспективных методов изучения КГП и топологически нетривиальной структуры вакуума КХД является именно анализ корреляций, причем различные коллективные эффекты позволяют получать уникальную информа-

цию о разных стадиях пространственно-временной эволюции сильновзаимодействующей материи. Подобные исследования носят междисциплинарный характер и важны как для развития физики фундаментальных взаимодействий, так и для космологии и релятивистской астрофизики.

Представляется, что законченная теория должна давать согласованное описание сильного взаимодействия во всем диапазоне энергий, от области классической ядерной физики до пертурбативной области. Поэтому, экспериментальное изучение перехода от описания сильного взаимодействия на языке барион-мезонных степеней свободы к описанию в рамках КХД и, соответственно, к проявлению кварк-глюонных степеней свободы является важным как в случае вакуума и холодной ядерной материи, так и для сильно-взаимодействующей материи при экстремально высокой температуре и плотности энергии. Кратко описанные выше вопросы объединяются в рамках одной из наиболее важных задач современной физики – исследование поведения квантовых систем в непертурбативной области. Таким образом, изучение коллективных эффектов в столкновениях частиц и ядер при промежуточных и высоких энергиях позволяет получать новую уникальную информацию о пространственно-временной эволюции процессов сильного взаимодействия и является актуальным.

Цель диссертационной работы

Разработка совокупности методов исследований и поиск проявлений кварковых степеней свободы в процессах образования мягких адронных струй при промежуточных энергиях и новых свойств сильновзаимодействующей материи в экстремальном состоянии на различных стадиях ее пространственно-временной эволюции.

Научная новизна работы

1. Впервые получены количественные оценки энергии, при которой в образовании мягких пионных струй начинают экспериментально проявляться кварковые степени свободы. Интервал оценок для данного параметра, с учетом всех использованных методов, равен (2.43 – 2.90) ГэВ.

2. Оригинальным методом получена оценка константы сильного взаимодействия при энергии равной массе Z бозона $\alpha_S(M_Z) = 0.121 \pm 0.011$.

3. Обнаружены новые фрактало-подобные свойства у мягких струй пионов в квазиинклюзивных реакциях с нуклонной мишенью. Впервые получены зависимости температуры пионов в струях и кластерной размерности мягких струй от начальной энергии.

4. В столкновениях релятивистских тяжелых ионов обнаружен новый эффект зависимости степени подавления струи, распространяющейся внутри

объема горячей сильновзаимодействующей материи, от длины пути, проходимого частицами струи в этом объеме.

5. Впервые получены зависимости от начальной энергии абсолютной и относительной асимметрии испускания электрически заряженных частиц относительно плоскости реакции в столкновениях ядер.

Научная и практическая значимость работы

Созданная база экспериментальных данных по традиционным коллективным переменным для столкновений различных типов (от электрон-позитронной аннигиляции до адрон-ядерных взаимодействий) и всего экспериментально доступного диапазона энергий важна для понимания динамики и пространственно-временной эволюции различных процессов сильного взаимодействия в широкой области начальных энергий.

Учет полученных результатов важен для экспериментальных и феноменологических исследований глубоко непertурбативной области КХД, механизмов перехода от кварк-глюонных степеней свободы к наблюдаемым адронным состояниям. Результаты по подавлению струй в азимутально асимметричном объеме сильновзаимодействующей материи при экстремальных условиях являются надежным критерием для проверки существующих теоретических моделей и важны для получения количественных оценок транспортных свойств среды. Учет мягкой и жесткой компонент коллективного эллиптического потока, выполненный в рамках предложенной модели двухкомпонентного потока, имеет практическую значимость при физическом анализе структуры событий, особенно, в области ТэВ-ных энергий, где вклад жестких процессов рассеяния становится существенным.

Результаты работы могут быть полезны при проектировании новых экспериментов по изучению процессов сильного взаимодействия, в частности, для экспериментов, направленных на изучение механизма адронизации вторичных частиц и свойств сильновзаимодействующей материи при экстремальных условиях. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на факультете Экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Количественная оценка энергии, при которой в образовании мягких пионных струй начинают экспериментально проявляться кварковые степени свободы, $\sqrt{s_c} = (2.43 - 2.90)$ ГэВ.

2. Оценка перенормируемой константы сильного взаимодействия при энергии равной массе Z бозона $\alpha_s(M_Z) = 0.121 \pm 0.011$ на основе полученной зависимости среднего значения коллективной переменной трост от начальной энергии.

3. Значения кластерной размерности мягких пионных струй в различных реакциях при начальных энергиях 2 – 20 ГэВ. Обнаружение наличия фрактало-подобных свойств у мягких струй пионов в квазиинклюзивных реакциях при промежуточных энергиях.

4. Зависимости температуры пионов в струях и кластерной размерности мягких струй от начальной энергии.

5. Обнаружение зависимости степени подавления струи, распространяющейся внутри объема горячей сильновзаимодействующей материи, от длины пути, проходимого частицами струи в этом объеме, для столкновений ядер золота при начальной энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

6. Обобщенные с учетом двухкомпонентной структуры коллективного эллиптического потока формулы для корреляционной функции по относительному азимутальному углу, в том числе, и для различных направлений вылета частиц относительно плоскости реакции.

7. Зависимости от начальной энергии абсолютной и относительной асимметрии испускания электрически заряженных частиц относительно плоскости реакции в столкновениях ядер.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов проведенных исследований обусловлена применением хорошо разработанных и многократно апробированных методов физического анализа, использованием нескольких различных современных методик и взаимной согласованностью соответствующих результатов, широким спектром изученных реакций, используемых для обоснования физических выводов. Корректность результатов настоящей работы проверялась сравнением с вычислениями в рамках КХД и различных феноменологических моделей, с известными экспериментальными данными и общепризнанными «мировыми» средними значениями. Высокая степень достоверности результатов подтверждается более поздними независимыми исследованиями на других экспериментальных установках при различных значениях контролируемых параметров (начальная энергия и т.д.) и, в отдельных случаях, вычислениями на решетках.

Личный вклад автора

Работы, результаты которых изложены в диссертации, проводились автором самостоятельно и совместно с другими исследователями. Личный вклад автора заключается в участии в выработке целей и постановке задач исследований, в получении нового экспериментального материала на коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC) Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ) в 2004 – 2006, 2008, 2011 и 2012 гг., создании комплекса программ

для физического анализа и базы данных по коллективным характеристикам, проведении численных и аналитических расчетов, анализе и обобщении полученных результатов, разработке феноменологических моделей, написании статей. Все основные результаты физического анализа коллективных переменных и фрактальных свойств адронных струй получены лично автором. База экспериментальных данных по традиционным коллективным переменным для столкновений различных типов и всего экспериментально доступного диапазона начальных энергий, модель двухкомпонентного коллективного эллиптического потока для столкновений ядер созданы лично автором диссертации. Зависимости от начальной энергии скорости диффузии числа Черна – Саймонса, абсолютной и относительной асимметрии испускания электрически заряженных частиц относительно плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях получены лично автором. Личный вклад автора в экспериментальные результаты по ядро-ядерным столкновениям, полученные большим международным коллективом ученых, является существенным.

Апробация и публикации

Результаты, представленные в настоящей работе, докладывались на международных (PANIC 1999, ICHEP 2006, SPMP 2008) и всероссийских («Университеты России – фундаментальные исследования. Физика элементарных частиц и атомного ядра» 2003 г.) конференциях, симпозиумах (ISMD 2002), научных сессиях НИЯУ МИФИ (1998, 1999, 2000, 2005, 2006, 2008 гг.), научных сессиях – конференциях секции ядерной физики ОФН РАН (1998, 2002, 2005, 2007, 2009, 2011 – 2013 гг.), международных рабочих совещаниях (RNP 2005, IBSHEPP 2006), на рабочих и региональных совещаниях международного сотрудничества STAR (БНЛ 2003 г.; НИЯУ МИФИ 2007, 2008 гг.; ОИ-ЯИ 2003, 2009 гг.), на семинарах в Физическом институте Гейдельбергского университета (Германия, 2000 г.), в ИЯИ РАН (2002, 2004 гг.), в ГНЦ РФ ИТ-ЭФ (2003 г.), в НИИЯФ МГУ (2008 г.), на факультете Экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ (2002, 2006, 2009, 2011 – 2013 гг.), неоднократно включались в сборник «Основные научные достижения МИФИ».

Основные результаты диссертации опубликованы в 39 работах, включая 16 статей в рецензируемых журналах [1 – 16], в том числе 14 работ в журналах, входящих в международные базы цитирования (Scopus, Web of Science), 4 препринта [17 – 20], 7 докладов на крупных международных и всероссийских конференциях [21 – 27] и 12 тезисов [28 – 39]. Из этих работ 12 выполнены без соавторов и еще 4 – совместно с аспирантами и студентами автора диссертации. Методические и экспериментальные результаты проведенных исследований использованы в учебных пособиях по релятивистской ядерной физике, физике высоких энергий, междисциплинарным исследованиям [40, 41].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Содержит 188 стр. печатного текста, 58 рисунков, 30 таблиц и библиографию, включающую 417 наименований. Полный объем диссертации - 297 стр.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В вводной части сформулированы цель диссертационной работы, основные результаты, научная и практическая значимость, план расположения материала.

В первой главе обосновывается актуальность темы исследования. Для различных процессов сильного взаимодействия приведен обзор экспериментальной ситуации по изучению геометрии конечного состояния в широкой области начальных энергий. Кратко описана взаимосвязь коллективных явлений с проявлениями топологически нетривиальной структуры вакуума в теориях Янга – Миллса. Показано, что именно коллективные эффекты и соответствующие наблюдаемые предоставляют уникальную возможность по изучению структуры вакуума КХД и дискретных $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ симметрий при конечных температурах в столкновениях ядер. Обоснована важность изучения коллективных эффектов как одного из наиболее перспективных методов поиска экспериментальных сигналов образования нового состояния сильновзаимодействующей материи в столкновениях релятивистских тяжелых ионов и исследования его свойств.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Приводится краткое описание пузырьковых камер ГНЦ РФ ИТЭФ, НИЯУ МИФИ и ЦЕРН, работающих с водородным наполнением и / или с различными смесями. Описывается спектрометрическая установка STAR, в эксплуатации которой автор принимал и принимает непосредственное участие. Приведены основные характеристики указанных детекторов. Пузырьковые камеры и установка STAR вследствие широкого, достигающего 4π в первом случае, аксептанса хорошо подходят именно для изучения коллективных и геометрических характеристик процессов сильного взаимодействия. Используемый в работе экспериментальный материал получен с помощью основной трековой подсистемы установки STAR – время-проекционной камеры (TPC), имеющей постоянную геометрию и устойчивые характеристики на протяжении всех рассматриваемых сеансов. Описана методика отбора событий, измерений и математической обработки. Краткий перечень процессов множественного рождения частиц, исследуемых в рамках диссертационной работы, приведен в табл. 1. Экспериментальный материал, представленный в диссертации, содержит в совокупности около 2.7×10^8 событий, относящихся к hh , hA и AA столкновениям.

Таблица 1. Реакции, изучаемые в рамках диссертационной работы

№ п/п	Тип взаимо- действия	Детектор, начальная энергия	Конечное состояние	Статис- тика, соб.
I. эксперименты на пузырьковых камерах (ПК)				
I.1 адрон-адронные взаимодействия				
1в	π^-p	2-м ПК ЦЕРН, 2.88 ГэВ	$N + k\pi^- + l\pi^+ + j\pi^0$ $N=p, n; k=2; l=1, 2; j \geq 0$	141400
2в 2в.1	π^+p	2-м ПК ИТЭФ, 2.87 ГэВ	$N + (K^+, K^0) + (\bar{K}^0, K^-) +$ $+ k\pi^- + l\pi^+ + j\pi^0$ $N=p, n; k=0, 1; l=0-2; j=0, 1$	539
2в.2			$\Lambda + K^{0,+} + k\pi^- + l\pi^+ + j\pi^0$ $k=0, 1; l=1, 2; j=0, 1$	2202
2в.3			$\Sigma^{0,\pm} + K^{0,+} + k\pi^- + l\pi^+ + j\pi^0$ $k=0, 1; l=0-3; j=0, 1$	1377
3в	π^+p	2-м ПК ИТЭФ, 2.97 ГэВ	$N + k\pi^- + l\pi^+ + j\pi^0$ $N=p, n; k=1, 2; l=2-4; j=0, 1$	44042
I.2 адрон-ядерные взаимодействия				
4в	$\pi^- (C_2F_5Cl_3)$	105-см ПК МИФИ, 2.85 ГэВ	$\Lambda + K^0 + k\pi^- + l\pi^+ + mp + X$ $k, l, m > 0$	1676
5в	π^-Ne	2-м ПК ИТЭФ, 3.54 ГэВ	$k\pi^- + l\pi^+ + mp + X$ $k, l, m > 0$	2262
Общая статистика (ПК)				193498
II. спектрометрический эксперимент STAR (RHIC/БНЛ)				
II.1 адрон-адронные взаимодействия				
6в	pp	200 ГэВ	$h^\pm + X$	1.1×10^7
II.2 ядро-ядерные взаимодействия (приведены $\sqrt{s_{NN}}$)				
7в	$Cu+Cu$	62.4, 200 ГэВ	$h^\pm + X$	2.0×10^7
8в	$Au+Au$	7.7 – 200 ГэВ	$h^\pm + X$	2.4×10^8
Общая статистика (STAR)				2.7×10^8

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследования реакций (3в) – (5в) в области промежуточных энергий с помощью традиционных коллективных переменных, а также зависимости струйных характеристик от начальной энергии и множественности для взаимодействий различных типов.

Наиболее важными традиционными коллективными характеристиками события являются сферисити (S) и траст (T), определяемые как [42, 43]

$$S = \min_{\vec{n}} S(\vec{n}) = \frac{3}{2} \min_{\vec{n}} \frac{\sum_{i=1}^N p_{\perp i}^2}{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i^2}, \quad T = \max_{\vec{n}} T(\vec{n}) = \max_{\vec{n}} \frac{\sum_{i=1}^N |p_{\parallel i}|}{\sum_{i=1}^N |\vec{p}_i|}. \quad (1)$$

Здесь $p_{\perp i}$, $p_{\parallel i}$ – поперечный и продольный импульсы i -й частицы относи-

тельно некоторой оси $\vec{n}$ в с.ц.м. сталкивающихся частиц, N – число вторичных частиц, удовлетворяющих условиям отбора в анализе струйного рождения. В качестве дополнительных были рассмотрены следующие параметры: квадраты компонент поперечного импульса частицы в ($p_{\text{in}}^2 = \lambda_2/N$) и вне ($p_{\text{out}}^2 = \lambda_3/N$) плоскости события, выстроенность ($A = \lambda_2/\lambda_1$), и планарность ($P = \lambda_3/\lambda_2$), где $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ и λ_i – собственные значения тензора сферичности $S^{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^N p_{\alpha}^i p_{\beta}^i$, α и $\beta = x, y, z$.

Интегральные значения коллективных характеристик для реакций (3в) – (5в) представлены в табл. 2. Влияние ядра приводит к существенно более изотропному распределению вторичных частиц для реакции (5в) по сравнению с (3в), росту поперечного импульса, ослаблению выстроенности и планарности события. Лидирующие частицы приводят к обратному, по сравнению с внутриядерным перерасеянием, эффекту в изменении геометрии конечного состояния в реакции (3в).

Таблица 2. Средние значения традиционных коллективных характеристик

Параметр	Реакция		
	(3в)	(4в)	(5в)
$\langle S \rangle$	0.3039 ± 0.0009	0.303 ± 0.016	0.403 ± 0.006
$\langle T \rangle$	0.8219 ± 0.0004	–	0.774 ± 0.003
$\langle p_{\text{in}}^2 \rangle \times 10^3, (\text{ГэВ}/c)^2$	50.6 ± 0.2	–	82 ± 2
$\langle p_{\text{out}}^2 \rangle \times 10^3, (\text{ГэВ}/c)^2$	8.19 ± 0.04	–	18.4 ± 0.4
$\langle A \rangle$	0.2437 ± 0.0009	–	0.312 ± 0.006
$\langle P \rangle$	0.1953 ± 0.0009	–	0.310 ± 0.007

Согласие распределения по S для 6-лучевых событий (3в) и для e^+e^- аннигиляции, наблюдаемое в области $S \gtrsim 0.1$ (рис. 1а), а также зависимости $\langle S \rangle(N)$ для реакций, изучаемых в данной работе, и для $(\bar{\nu} + \nu)_p$ взаимодействий при близких энергиях (рис. 1б), указывают на возможное экспериментальное проявление кварковых степеней свободы в образовании струй адронов при $\sqrt{s} \sim 3-4$ ГэВ. С другой стороны, распределения по S для 6-лучевых событий (3в) при $S > 0.3$ и для e^+e^- качественно описываются как моделью с образованием струй, так и моделью изотропного фазового объема (рис. 1а), демонстрируя, что при $\sqrt{s} \simeq 3$ ГэВ адронные струи в данной области энергий экспериментально проявляются слабо. Сравнение экспериментальных зависимостей $\langle S \rangle(N)$ для различных взаимодействий и области, ограниченной кривыми 1, 2 и соответствующей изотропному распределению вторичных частиц (рис. 1б), подтверждает это предположение. Таким образом, сравнение результатов для π^+p реакции (3в), e^+e^- и $(\bar{\nu} + \nu)_p$ при близких энергиях позволяет получить следующую универсальную оценку нижней границы прояв-

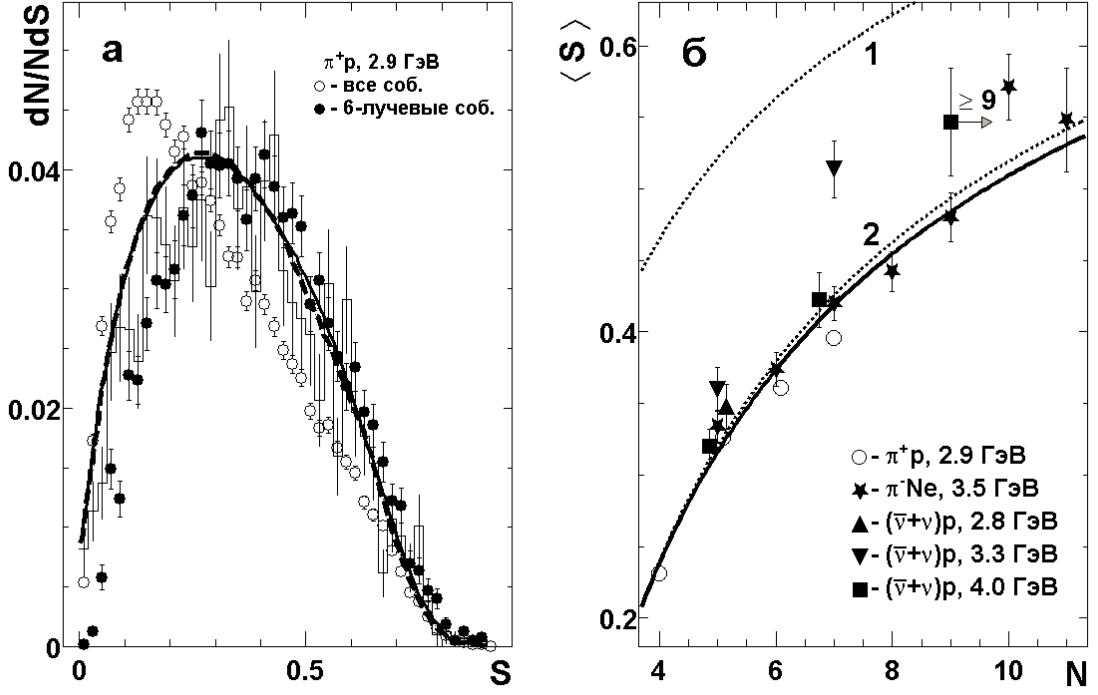


Рис. 1. Распределения по S для реакции (3ν) и для e^+e^- аннигиляции (гистограмма) при $\sqrt{s} \approx 3$ ГэВ (а). Кривые – расчеты для e^+e^- по модели изотропного фазового объема (штриховая) и по модели с учетом образования струй (сплошная). Результаты и кривые для e^+e^- аннигиляции взяты из [42]. Зависимость $\langle S \rangle$ от множественности вторичных идентифицированных частиц в событии (б). Результаты для $(\bar{\nu} + \nu)p$ взяты из [44]. Сплошная кривая соответствует фиту результатов данной работы функцией $\langle S \rangle \propto N^{-0.5}$, пунктирная кривая 1 (2) – изотропному распределению вторичных частиц в фазовом пространстве для нерелятивистского (релятивистского) предела [45].

ления струйной структуры события в различных процессах множественного образования частиц: $\sqrt{s_l} \sim 3$ ГэВ.

На основании экспериментальных результатов настоящей работы и созданной базы литературных данных для набора традиционных коллективных наблюдаемых $\mathcal{G}_1 \equiv \{\mathcal{G}_1^i\}_{i=1}^6 = \{\langle S \rangle, \langle T \rangle, \langle p_{\text{in}}^2 \rangle, \langle p_{\text{out}}^2 \rangle, \langle A \rangle, \langle P \rangle\}$ были получены зависимости каждого из указанных параметров от множественности и начальной энергии. На качественном уровне зависимости параметров из $\mathcal{G}_1$ от множественности частиц в конечном состоянии описываются степенной зависимостью при $\sqrt{s} < 12$ ГэВ. Энергетические зависимости $\langle S \rangle$ и $\langle T \rangle$ демонстрируют универсальное поведение для различных взаимодействий. Исследование зависимости $\langle T \rangle(\sqrt{s})$ позволило получить значение перенормируемой константы сильного взаимодействия при энергии равной массе Z бозона $\alpha_s(M_Z)$, согласующееся как с «мировым» средним, так и с результатами, которые были получены другими методами. Значения $\langle p_{\text{in}}^2 \rangle$ и $\langle p_{\text{out}}^2 \rangle$ для e^+e^- взаимодействий увеличиваются с ростом $\sqrt{s}$ быстрее, чем для ер и адронных взаимодействий. Зависимости от $\sqrt{s}$ параметров $\langle A \rangle$ и $\langle P \rangle$ допускают

универсальное описание эмпирическими функциями. На основе предложенных аналитических аппроксимаций были получены оценки средних значений коллективных наблюдаемых для действующих и планируемых ускорительных комплексов. При энергиях $\sqrt{s} \geq 5 - 10$ ТэВ наблюдается слабый рост оценок только для $\langle p_{\text{in}}^2 \rangle$ в pp столкновениях, значения оценок для остальных наблюдаемых из $\mathcal{G}_1$ не зависят от энергии с учетом погрешностей. Таким образом, указанные значения $\sqrt{s}$ могут рассматриваться в качестве оценки нижней границы асимптотической области для параметров из $\mathcal{G}_1$.

В четвертой главе описаны результаты исследования коллективных эффектов при взаимодействии с мишенью «м» пучка частиц «п» с образованием многочастичного конечного состояния $p + m \rightarrow 1 + 2 + \dots$ в диапазоне $\sqrt{s} \sim 2 - 20$ ГэВ с помощью релятивистски-инвариантного метода [46] и фрактальной геометрии. В случае присутствия двух струй в событии, что соответствует геометрии конечного состояния изучаемых реакций (1в) – (5в), области фрагментации мишени и пучка, могут быть разделены с помощью параметра $X_{\text{гр}} = 0.1 - 0.2$ [47]. Квадрат расстояния k -й частицы от оси струи V в пространстве 4-мерных скоростей $U_k = P_k/m_k$ определяется как [46, 47]

$$b_k = -(V - U_k)^2, \quad V = U_J/|U_J|, \quad k = \text{м, п, 1, 2, ...} \quad (2)$$

Здесь $U_J = \sum_{i=1}^N U_i$. Область значений $10^{-2} \lesssim b_k \sim 1$ соответствует переходу от доминирования барион-мезонных степеней свободы к проявлению новых, кварк-глюонных, степеней свободы в процессах образования струй вторичных частиц. Важной характеристикой является средняя кинетическая энергия частиц в системе покоя струи (температура) $\langle T_k \rangle$, которая определяется на основе аппроксимаций экспоненциальными зависимостями инвариантных функций $F(b_k)$, характеризующих инвариантное сечение и определяемых для пионных струй следующим образом: $F(b_k) = (\varepsilon/N)dN/db_k$, $\varepsilon \equiv \equiv 4/[m_\pi^2 b_k \sqrt{1 + 4/b_k}]$. В настоящей работе было предложено исследовать геометрические свойства пионных струй в пространстве U_k с помощью кластерной размерности D , определяемой по соотношению между числом частиц в струе $N(b_k)$ и радиусом последней $N(b_k) \propto b_k^{D/2}$. Для реакций (1в) – (5в) был рассмотрен набор коллективных параметров $\mathcal{G}_2 \equiv \{\mathcal{G}_2^i\}_{i=1}^3 = \{\langle b_k \rangle, \langle T_k \rangle, D\}$, характеризующих геометрию и динамику образования конечного состояния в пространстве 4-мерных скоростей.

Поведение зависимости $\langle b_k \rangle$ от числа пионов в струе (N_π) в реакциях (1в)–(3в) качественно согласуется с результатами анализа на основе традиционных коллективных переменных: с ростом N_π струи становятся более широкими. Впервые получены энергетические зависимости $\langle b_k \rangle$ для K^0 и Λ , вторичные мезоны (π и K) демонстрируют качественно аналогичные зависимости $\langle b_k \rangle(\sqrt{s})$. Для реакции (2в) была исследована зависимость величины $\langle b_k \rangle$ от

массы частицы для вторичных $\pi^{0,\pm}$, $K^{0,\pm}$, Λ и $\Sigma^{0,\pm}$. Наблюдается существенное уменьшение $\langle b_k \rangle$ для каонов по сравнению с пионами при незначительном уменьшении с дальнейшим увеличением массы частицы, что соответствует на качественном уровне поведению аналогичной зависимости при $\sqrt{s} \approx 8.7$ ГэВ. Для реакций (1в) и (3в) оценки D , полученные для пионов любого типа, имеют нецелые значения при всех рассматриваемых значениях $X_{\text{гр}}$ и для всех областей фрагментации. Это указывает на квазифрактальный характер распределения пионов в данной области фрагментации, то есть на наличие фрактало-подобных свойств у струй адронов в реакциях (1в) и (3в). Для столкновений (4в), (5в) фрактальные свойства струй выражены менее ярко.

В настоящей работе была выдвинута гипотеза о смене динамических режимов взаимодействия при $\sqrt{s} < 3 - 4$ ГэВ, отражающейся в ходе зависимостей $\forall i : \mathcal{G}_2^i(\sqrt{s})$. На рис. 2 для мягких пионных струй показаны зависимости параметров из набора $\mathcal{G}_2$ от $\sqrt{s}$ (средней энергии конечного адронного состояния W для $\bar{\nu}N$) при ограничениях $X_{\text{гр}} = 0.1$ (а, в, д) и 0.2 (б, г, е) для различных взаимодействий. Зависимости $\forall i : \mathcal{G}_2^i(\sqrt{s})$ допускают универсальную аппроксимацию логарифмической функцией вида $\mathcal{G}_2^i = a_1^i + a_2^i \ln(s/s_0)$, $s_0 = 1$ ГэВ², при $\sqrt{s} > 3.5$ ГэВ для широкого класса взаимодействий при рассмотренных значениях $X_{\text{гр}}$. Полученные результаты демонстрируют чувствительность ядерной мишени к пространственно-временным характеристикам адронных систем, распространяющихся внутри ядра. Результаты для реакций (1в) – (3в) явно указывают на изменение характера энергетических зависимостей $\forall i : \mathcal{G}_2^i$ в области $\sqrt{s} \sim 3$ ГэВ (рис. 2), подтверждая выдвинутую гипотезу. Можно предположить, что данный эффект обусловлен началом экспериментального проявления кварковых степеней свободы в образовании мягких пионных струй и соответствующим переходом от описания данных процессов на языке барион-мезонных степеней свободы к использованию кварк-глюонных степеней свободы. Сопоставление результатов для $\langle b_k \rangle$ в случае hh и $\bar{\nu}N$ взаимодействий, а также поведение зависимостей $\mathcal{G}_2^i(\sqrt{s})$ при $i = 2, 3$ (рис. 2в – е) качественно подтверждают выдвинутую гипотезу о смене динамических режимов и экспериментальном проявлении новых степеней свободы при $\sqrt{s} \sim 3$ ГэВ. Зависимости от $\sqrt{s}$ параметров из $\mathcal{G}_2^i$ при $\sqrt{s} < 4$ ГэВ, были аппроксимированы степенной функцией

$$\mathcal{G}_2^i = a_1^i (\sqrt{s/s_0} - a_2^i)^{a_3^i}, \quad \sqrt{s/s_0} \geq a_2^i, \quad (3)$$

где значение параметра a_2^i может быть поставлено в соответствие энергии $\sqrt{s_c}$, при которой в образовании пионных струй начинают экспериментально проявляться кварковые степени свободы. Дополнительно для $\langle T_k \rangle$ (рис. 2в, г) и D (рис. 2д, е) фитирование функцией (3) было выполнено во всем доступном диапазоне $\sqrt{s}$. Численные значения $\sqrt{s_c}$, полученные в результате

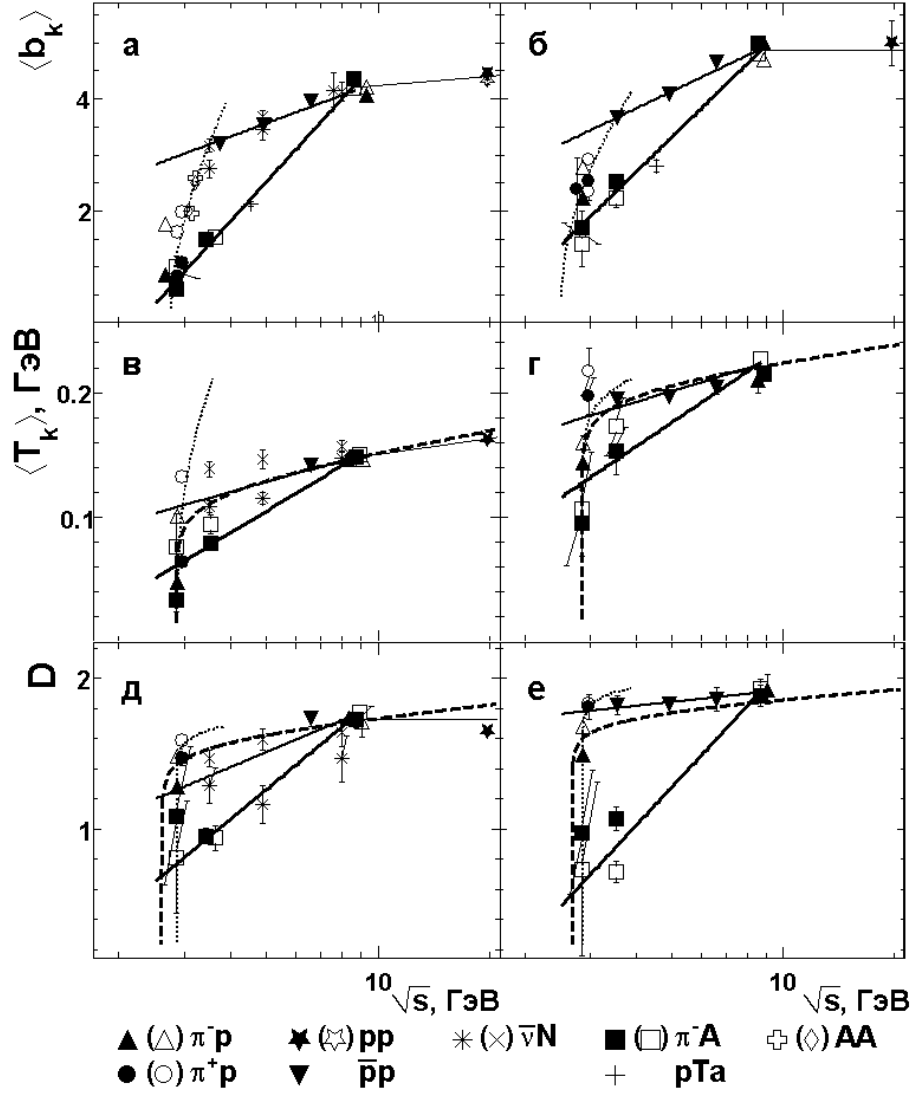


Рис. 2. Зависимости параметров $\mathcal{G}_2^i$ от $\sqrt{s}(W)$ при $X_{\text{Гр}} = 0.1$ (а, в, д) и 0.2 (б, г, е) в области фрагментации мишени (пучка). Значения $\langle b_k \rangle$ и распределения для получения оценок $\langle T_k \rangle$ и D , не являющиеся результатами настоящей работы, взяты из [47]. Пунктирная линия соответствует аппроксимации функцией (3) в области $\sqrt{s} < 4$ ГэВ, штриховая линия (рис. в–е) – всех доступных экспериментальных данных. Фитирование логарифмической функцией показано сплошной линией для совместной выборки $(hh, \bar{\nu}N)$ реакций при $4 \leq \sqrt{s} < 9$ ГэВ, сплошной толстой – для hA реакций и сплошной тонкой линией – для hh и hA взаимодействий при $\sqrt{s} > 8$ ГэВ.

фитирования зависимостей различных параметров из $\mathcal{G}_2$ от $\sqrt{s}$, суммированы в табл. 3.

Значения $\sqrt{s_c}$ разумно согласуются для различных кинематических ограничений и областей фрагментации. Таким образом, впервые получена количественная оценка нижней границы по энергии, при которой в образовании мягких пионных струй начинают экспериментально проявляться кварковые степени свободы. Интервал оценок данного параметра, согласованный с учетом всех использованных в работе методов, $\sqrt{s_c} = (2.43 - 2.90)$ ГэВ.

Таблица 3. Значения $\sqrt{s_c}$ в ГэВ

Параметр из $\mathcal{G}_2$	Фрагментация мишени, $X_{\text{гр}}$		Фрагментация пучка, $X_{\text{гр}}$	
	0.1	0.2	0.1	0.2
$\langle b_k \rangle$	2.82 ± 0.02	2.46 ± 0.04	2.43 ± 0.04	2.5 ± 0.3
$\langle T_k \rangle$	2.853 ± 0.001	2.854 ± 0.001	2.877 ± 0.001	2.854 ± 0.001
D	2.854 ± 0.002	2.858 ± 0.001	2.9 ± 0.4	2.874 ± 0.001

Поскольку само понятие адронной струи тесно связано с КХД, нельзя исключить возможность того, что параметры $\sqrt{s_l}$ и $\sqrt{s_c}$ характеризуют единый физический эффект – начало экспериментального проявления кварковых степеней свободы в мягких процессах множественного образования вторичных частиц и, как следствие, струйной структуры события. Таким образом, результаты, полученные при использовании традиционных и четырехмерных коллективных переменных, разумно согласуются и дополняют друг друга.

Пятая глава содержит результаты экспериментального исследования ранних стадий пространственно-временной эволюции системы вторичных частиц, образованных в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях. В общем случае инвариантное распределение вторичных частиц с электрическим зарядом α ($\alpha = +, -$) может быть представлено в виде ряда Фурье

$$E \frac{d^3 N_\alpha}{d\vec{p}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N_\alpha}{p_\perp dp_\perp dy} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \{ v_{n,\alpha} \cos(n\Delta\phi_{\text{RP}}) + a_{n,\alpha} \sin(n\Delta\phi_{\text{RP}}) \} \right]. \quad (4)$$

Здесь $\phi = \arctg(p_y/p_x)$ – азимутальный угол вторичной частицы рассматриваемого типа, измеренный в системе координат эксперимента, Ψ_{RP} – азимутальный угол плоскости реакции (Π_{R}), определяемой осью столкновения и $\vec{b}$ – вектором прицельного параметра, $\Delta\phi_{\text{RP}} \equiv \phi - \Psi_{\text{RP}}$, $v_{n,\alpha} = \langle \cos(n\Delta\phi_{\text{RP}}) \rangle$ и $a_{n,\alpha} = \langle \sin(n\Delta\phi_{\text{RP}}) \rangle$ – параметры, характеризующие силу $\mathcal{P}$ -четных и $\mathcal{P}$ -нечетных корреляций относительно Π_{R} , соответственно [48, 49]. Вследствие большой множественности вторичных частиц при столкновениях ядер, в данной работе используется метод статистической идентификации струй с помощью двухчастичной корреляционной функции, определяемой следующим образом: $C_2(\Delta\phi) = (N_{\text{tr}}\zeta)^{-1} \int_{\eta_{\text{min}}}^{\eta_{\text{max}}} d\Delta\eta N(\Delta\phi, \Delta\eta)$, где N_{tr} – число триггерных частиц в событии с $(p_\perp^{\text{tr}})_{\text{min}} < p_\perp^{\text{tr}} < (p_\perp^{\text{tr}})_{\text{max}}$, $N(\Delta\phi, \Delta\eta)$ – число ассоциированных частиц с $(p_\perp^{\text{a}})_{\text{min}} < p_\perp^{\text{a}} < p_\perp^{\text{tr}}$ и находящихся в пределах области $(\Delta\phi, \Delta\eta)$ относительно триггерной частицы, в ζ формально учтены геометрические поправки, эффективности и т.д. Были использованы массивы экспериментальных данных для столкновений (6в) и (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, состоящие из 1.1×10^7 событий для p+p взаимодействий (6в) и из 3.2×10^6 событий – для

Au+Au столкновений (8в). В главах 5 – 7 при изучении ядро-ядерных столкновений центральность события определялась стандартным для эксперимента STAR методом на основе множественности треков заряженных частиц в ТРС. В настоящем анализе для обеих реакций (6в) и (8в) рассматривались заряженные частицы и основное внимание было сфокусировано на полуцентральных (интервал по центральности 20 – 60%) ядро-ядерных столкновениях, что обусловлено качественными предсказаниями КХД. Для $C_2(\Delta\phi)$ использовались треки, удовлетворяющие условию $|\eta| < 1.0$. Для триггерных частиц $(p_{\perp}^{\text{tr}})_{\min} = 4$ ГэВ/с и $(p_{\perp}^{\text{tr}})_{\max} = 6$ ГэВ/с, для ассоциированных частиц – $(p_{\perp}^{\text{a}})_{\min} = 2$ ГэВ/с. Корреляционная функция, обусловленная присутствием жестких адронных струй, определяется как

$$C_2^{\text{n-f}}(\Delta\phi) = C_2(\Delta\phi) - C_2^{\text{f}}(\Delta\phi), \quad (5)$$

где $C_2^{\text{f}}(\Delta\phi)$ содержит вклады фоновых корреляций, обусловленных, в данном случае, присутствием коллективного эллиптического потока.

Функции $C_2(\Delta\phi)$ и (5) были построены для реперных взаимодействий (6в) и для полуцентральных столкновений (8в) отдельно для триггерных частиц, находящихся в плоскости («in») и вне («out») плоскости реакции. Триггерная частица и, соответственно, струя адронов, считалась направленной в Π_{R} , если $|\xi| < \pi/4 \cup |\xi| > 3\pi/4$, и вне Π_{R} , если $\pi/4 < |\xi| < 3\pi/4$, где $\xi \equiv \phi^{\text{tr}} - \Psi_2$ – относительный азимутальный угол между Π_{R} , оцениваемой плоскостью события второго порядка (Ψ_2), и триггерной частицей. Впервые обнаружено, что для столкновений (8в) при $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ подавление существенно сильнее для жестких струй адронов, распространяющихся внутри объема сильно-взаимодействующей материи и направленных вне Π_{R} , и слабее – для струй, распространяющихся внутри материи в Π_{R} .

В рамках данной работы была впервые исследована зависимость от начальной энергии эффекта подавления струй с учетом ориентации относительно Π_{R} . На рис. 3а, б показаны корреляционные функции (5) для взаимодействий (8в) при $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ и для полуцентральных Pb+Au столкновений при $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 17.3$ ГэВ в области «прямого» (малые $\Delta\phi$) и «обратного» (большие $\Delta\phi$) пика, соответственно. Видно, что функции (5) для различных направлений триггерной частицы при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 17.3$ ГэВ хорошо согласуются друг с другом в обоих случаях $\Delta\phi \sim 0$ (рис. 3а) и $\Delta\phi \sim \pi$ (рис. 3б), что принципиально отличается от соотношения между $C_2^{\text{n-f}}(\Delta\phi)$ для различных направлений вылета триггерной частицы относительно Π_{R} при $\Delta\phi \sim \pi$ для столкновений (8в). Была введена величина, количественно характеризующая различие в степени подавления струй в области «прямого» и «обратного» пиков,

$$\Delta I^{\text{r}} = I_0^{\text{r}} - I_{\pi}^{\text{r}}, \quad \text{r} = \text{in}, \text{out}. \quad (6)$$

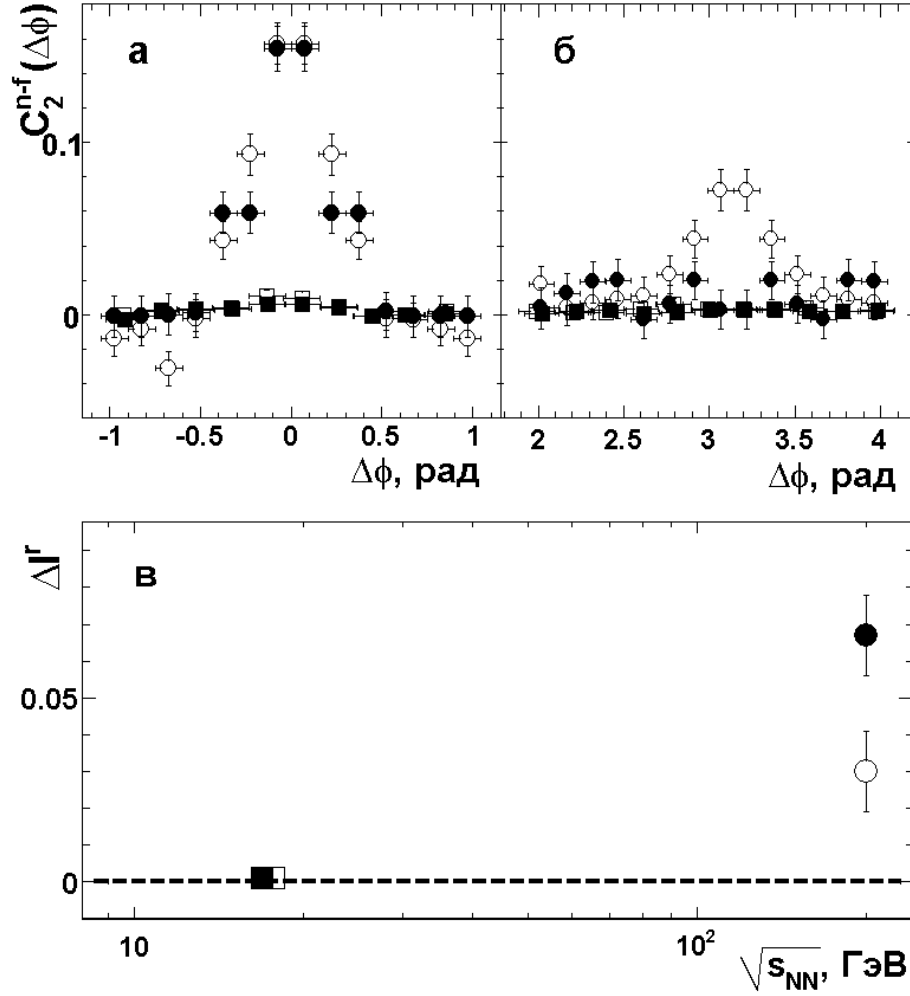


Рис. 3. Корреляционные функции (5) в области малых (а) и больших (б) $\Delta\phi$; зависимость ΔI^r от энергии столкновения (в) для полуцентральных столкновений тяжелых ионов. Экспериментальные данные для испускания триггерных частиц в (вне) плоскости реакции обозначаются следующим образом: $\circ$ ($\bullet$) – Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, $\square$ ($\blacksquare$) – Pb+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ ГэВ [50]. Показаны только статистические погрешности.

Интегральный вклад струеподобных корреляций при различных ориентациях триггерной частицы относительно плоскости реакции определяется как $I_{\Phi}^r = \int_{\Phi-0.75}^{\Phi+0.75} d(\Delta\phi) [C_2^{n-f}(\Delta\phi)]^r$, где значение $\Phi = 0$ (π) соответствует интегрированию для области «прямого» («обратного») пика. Зависимость параметра (6) от $\sqrt{s_{NN}}$ представлена на рис. 3в. Необходимо отметить, что в отличие от I_{Φ}^r , для (6) систематические неопределенности оказываются меньше статистических погрешностей. Наблюдается усиление вклада струеподобных корреляций с ростом $\sqrt{s_{NN}}$, что соответствует качественным ожиданиям на основе КХД и общей картине подавления струй в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях. Обнаружено, что при промежуточных энергиях значения I_{Φ}^r не зависят от направления испускания триггерной частицы и близки к нулю с учетом погрешностей. Ситуация существенно меняется при

переходе к столкновениям (8в) в области высоких энергий: наблюдаемые I_Γ^r и ΔI^r , как правило, отличны от нуля, причем (6) значительно больше для направления вне Π_R , чем в случае испускания триггерной частицы в Π_R . Таким образом, представленные для подавления струй с учетом Π_R результаты служат дополнительным значимым свидетельством в пользу образования в столкновениях (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ нового состояния сильновзаимодействующей материи, характеризуемого деконфайнментом цветовых зарядов.

На основе экспериментальных результатов в настоящей работе выдвинута гипотеза о сложной структуре азимутальных корреляций в АА столкновениях, возникающих вследствие вкладов источников различной динамической природы. Предполагается, что экспериментально измеряемые параметры коллективного потока, в частности v_2 , являются суперпозицией, по крайней мере, двух (мягкой и жесткой) компонент. В рамках данной модели для обобщенной корреляционной функции справедливо

$$C_2(\Delta\phi) \propto \tilde{N}[1 + 2V \cos(2\Delta\phi)] + N_h(N_h/N_J - 1)f(\Delta\phi), \quad (7)$$

где $\tilde{N}V = \sum_{i=s,h} N_i^p v_{2,i}^2 + 2N_s N_h v_{2,s} v_{2,h}$, $\tilde{N} = \sum_{i=s,h} N_i^p + 2N_s N_h$, функция $f(\Delta\phi)$ описывает парные корреляции адронов внутри струй и может быть выбрана в виде суммы двух гауссианов, соответствующих вкладам в области «прямого» и «обратного» пиков, $v_{2,s(h)}$ – параметр эллиптического потока для мягких (жестких) частиц; в расчете на событие введены следующие переменные: $N_{s(h)}$ – множественность мягких (жестких) частиц, $N_s^p = N_s(N_s - 1)$ – число пар мягких частиц, $N_h^p = N_h^2(1 - 1/N_J)$ – число пар жестких частиц, не принадлежащих одной паре противоположно направленных струй, N_J – число пар противоположно направленных струй. Получены также следующие обобщенные формулы для различных направлений испускания триггерной частицы относительно плоскости реакции:

$$[C_2(\Delta\phi)]^r \propto \tilde{N}^r[1 + 2V^r \cos(2\Delta\phi)] + N_h^r(N_h/N_J - 1)f(\Delta\phi), \quad (8)$$

где $2\pi \tilde{N}_{out}^{in} V_{out}^{in} = \sum_{i=s,h} N_i^p v_{2,i}(\pi v_{2,i} \pm 2) + 2N_s N_h(\pi v_{2,s} v_{2,h} \pm v_{2,s} \pm v_{2,h})$, $2\pi \tilde{N}_{out}^{in} = \sum_{i=s,h}(\pi \pm 4v_{2,i})(N_i^p + N_s N_h)$, $2\pi(N_{s(h)})_{out}^{in} = N_{s(h)}(\pi \pm 4v_{2,s(h)})$.

Шестая глава посвящена изучению поведения дискретных $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ симметрий в сильновзаимодействующей материи при конечных температурах с помощью коллективных эффектов, в частности, на основе асимметрии распределения электрических зарядов конечного состояния относительно Π_R , возникающей в присутствии экстремально сильного внешнего магнитного поля, – кирального магнитного эффекта (КМЭ) [51].

В данной работе для оценки абсолютной величины напряженности магнитного поля в столкновениях релятивистских ядер в соответствии с предло-

женным в [51] методом было получено следующее выражение:

$$eB \simeq 8Z\alpha\tau^{-3/2}b \exp(-y_0/2) [\tilde{c}x^{-1}f(x)R^{-3/2} + \exp(-3y_0/2)\tau^{-3/2}], \quad (9)$$

где первое слагаемое соответствует вкладу нуклонов-участников, второе – нуклонов-спектаторов, e – элементарный заряд, Z – заряд ядра, α – электромагнитная постоянная, R – радиус ядра, $x \equiv b/R$, y_0 – быстрота ядер пучка, τ – собственное время, $\tilde{c} \simeq 0.075$, функция $f(x)$ вычисляется численно [51]. Выражение (9) справедливо для $R/\text{sh}(y_0) \leq \tau \leq R$ в рамках приближения «жесткая сфера» для распределения плотности нуклонов в ядре. При малых временах $\tau \lesssim 1$ фм/с для столкновений (7в) и (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ и 200 ГэВ напряженность магнитного поля достигает значений $\sim 10^{13} - 10^{15}$ Тл, необходимых и достаточных для экспериментального проявления КМЭ [51]. Указанный временной интервал хорошо согласуется с временем жизни фазы сильносвязанной кварк-глюонной плазмы (сКГП) при энергиях RHIC. В настоящей работе были изучены зависимости от τ отношений напряженностей магнитных полей в столкновениях для различных типов ядер и начальных энергий. Напряженность магнитного поля больше для столкновений более тяжелых ядер. С ростом $\sqrt{s_{NN}}$ магнитное поле для времен $R/\text{sh}(y_0) \leq \tau \leq R$ ослабевает, что объясняется более быстрым разлетом нуклонов-спектаторов, вклад которых сильно зависит от y_0 .

Параметры a_n в (4) описывают эффект нарушения $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ четности для вторичных частиц. Экспериментальная наблюдаемая, чувствительная к эффектам возможного локального нарушения $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ симметрий сильных взаимодействий, определяется как $\langle \mathbf{K}_{\alpha\beta}^{\mathfrak{J}} \rangle = \langle \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_{\text{RP}}) \rangle$, где $\alpha, \beta = +, -$ – знаки электрических зарядов вторичных частиц [49]. Для изучения распределения заряженных частиц относительно Π_R были использованы полные массивы экспериментальных данных для Cu+Cu и для Au+Au столкновений, указанные в табл. 1 и полученные с триггером без отбора по центральности. В рассматриваемом анализе для столкновений (7в) и (8в) учитывались заряженные частицы, удовлетворяющие следующим кинематическим ограничениям: $|\eta| < 1.0$ и $0.15 < p_\perp < 2.0$ ГэВ/с.

Впервые обнаружена асимметрия испускания зарядов относительно Π_R в (7в) и (8в). Как показал ряд исследований, фоновые эффекты и механизмы разделения зарядов, не обусловленные КМЭ, не могут объяснить экспериментальные зависимости для одноименно, а в ряде случаев и для разноименно, заряженных частиц. Таким образом, результаты по асимметрии испускания электрически заряженных частиц относительно Π_R , полученные для столкновений (7в) и (8в) при $\sqrt{s_{NN}} \geq 39$ ГэВ, являются экспериментальным указанием на возможность локального нарушения $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ четности в сильных взаимодействиях и топологически нетривиальную структуру ва-

куума КХД. Учитывая необходимые для возникновения КМЭ условия [51], полученные результаты могут рассматриваться в качестве дополнительного экспериментального доказательства образования в столкновениях (7в) и (8в) при $\sqrt{s_{NN}} \geq 39$ ГэВ нового состояния сильновзаимодействующей материи.

В качестве характеристик азимутального распределения электрически заряженных частиц в АА столкновениях в настоящей работе введены абсолютная и относительная асимметрии распределения зарядов в событии относительно Π_R , определяемые, соответственно, следующим образом:

$$A_a = -[\langle \mathbf{K}_{\pm\pm}^\vartheta \rangle - \langle \mathbf{K}_{\pm\mp}^\vartheta \rangle], \quad (10a)$$

$$A_r = [|\langle \mathbf{K}_{\pm\pm}^\vartheta \rangle| - |\langle \mathbf{K}_{\pm\mp}^\vartheta \rangle|] / [|\langle \mathbf{K}_{\pm\pm}^\vartheta \rangle| + |\langle \mathbf{K}_{\pm\mp}^\vartheta \rangle|]. \quad (10б)$$

На основе модели КМЭ [51], в диссертации для предельного случая полностью восстановленной киральной симметрии и очень сильного eB , было получено $A_a \propto \langle [\Delta \mathcal{N}_{CS}]^2 \rangle \propto \Gamma_{CS}$, где $\Delta \mathcal{N}_{CS}$ – полное изменение числа Черна–Саймонса, определяемое скоростью соответствующей диффузии Γ_{CS} [52, 53]. В настоящей работе впервые получены зависимости параметров (10) от $\sqrt{s_{NN}}$, пример которых для A_a представлен на рис. 4. Используя метод, предложенный в [53], зависимости $\Gamma_{CS}(\sqrt{s_{NN}})$ были вычислены для различных eB следующим образом: $\Gamma_{CS}^{B \neq 0} = \Gamma_{CS}^{B=0} [1 + (eB)^2 / (6\pi^4 T^4)]$, $\Gamma_{CS}^{B=0} \propto T^4$, где T – температура при химическом застывании. Для оценки $\Gamma_{CS}^{B=0}$ использовалась аналитическая зависимость $T(\sqrt{s_{NN}})$, предложенная в [55] и хорошо согласующаяся с экспериментальными данными при $\sqrt{s_{NN}} \leq 200$ ГэВ. Кривая при $eB = 0$ (рис. 4) нормирована на экспериментальные точки, полученные для Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Зависимости $A_a(\sqrt{s_{NN}})$ и $A_r(\sqrt{s_{NN}})$ для полуцентральных столкновений Au+Au демонстрируют согласующиеся особенности, а именно, уменьшение при $\sqrt{s_{NN}} < 19.6$ ГэВ. В случае $A_a(\sqrt{s_{NN}})$ наблюдается качественное согласие с соответствующей зависимостью для Γ_{CS} в кварк-глюонной плазме, полученной в рамках суперсимметричной $\mathcal{N} = 4$ теории Янга–Миллса. Зависимости асимметрий (10) от $\sqrt{s_{NN}}$ указывают, вероятно, на начало доминирования адронных состояний над кварк-глюонными степенями свободы в системе, образованной при промежуточных энергиях $\sqrt{s_{NN}} \lesssim 11.5 - 19.6$ ГэВ.

В седьмой главе описаны результаты исследований поздней (мягкой) стадии пространственно-временной эволюции столкновений (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ с помощью корреляций пар тождественных заряженных пионов с малыми относительными импульсами (НВТ-интерферометрии). Экспериментальная корреляционная функция в данном методе определяется как

$$C_2(q, K) = \zeta(q, K) D_\vartheta(q, K) [D_\Phi(q, K)]^{-1}, \quad (11)$$

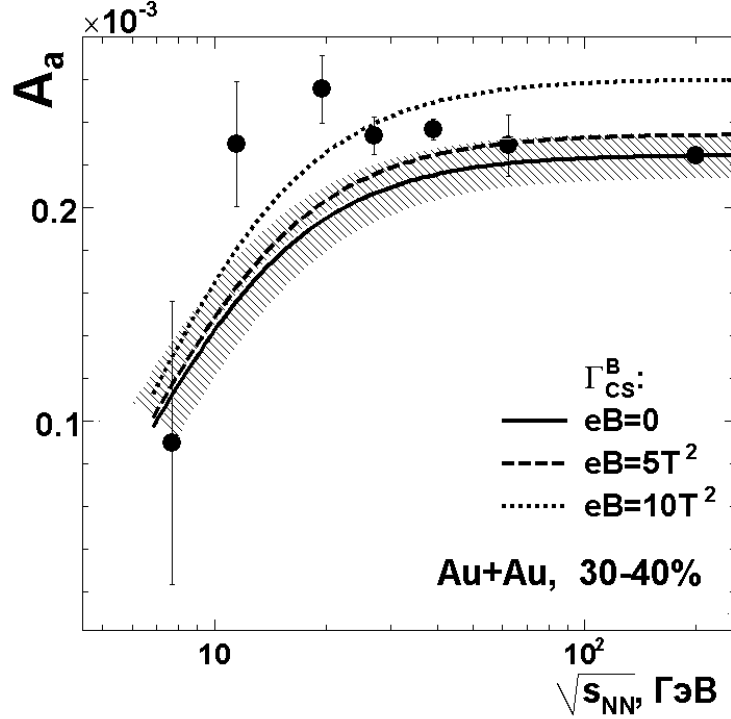


Рис. 4. Зависимость $A_a(\sqrt{s_{NN}})$. При вычислении A_a использованы экспериментальные данные из [54]. Кривые соответствуют зависимости $\Gamma_{CS}(\sqrt{s_{NN}})$, вычисленной в рамках суперсимметричной $\mathcal{N} = 4$ теории Янга–Миллса при указанных eB . Заштрихованные области для $\Gamma_{CS}^{B=0}$ определяются разбросом значений T при фиксированной энергии вследствие погрешностей параметров в зависимости $T(\sqrt{s_{NN}})$ [55].

где $p_i, i = 1, 2$ – 4-импульсы частиц пары, $q = p_1 - p_2$, $K = 0.5(p_1 + p_2)$, $D_9(q, K)$ – экспериментально измеряемое распределение по q для пар частиц из одного и того же события, $D_f(q, K)$ – фоновое распределение, $\zeta(q, K)$ формально учитывает все возможные поправки. Функция (11) чувствительна к пространственно-временной протяженности области испускания вторичных частиц. В данной работе используется система координатных осей Пратта–Бертча [56], в которой одна из осей (l) направлена вдоль оси пучка Z , вторая (o) – параллельно поперечному импульсу пары $\vec{k}_\perp$, и третья (s) – перпендикулярно первым двум. Выборка для (8в) при указанной энергии составила 2.7×10^6 событий, полученных без дополнительного отбора по центральности. Отбирались треки в области $|y| < 0.5$ и с $0.15 < p_\perp < 0.80$ ГэВ/с.

В настоящей работе изучалась форма пика корреляционной функции. В отдельных каналах реакций (1в) и (3в) при $\sqrt{s} \approx 3$ ГэВ поведение корреляционной функции не противоречит как гауссовой, так и степенной аппроксимации, характерной для самоподобного источника. Ограниченная статистика не позволяет сделать однозначных выводов о наличии / отсутствии отклонения формы $C_2(q, K)$ от гауссовой. Отклонение формы корреляционного пика в

столкновениях (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ от гауссовой изучалось с помощью сравнения результатов для следующих параметризаций:

$$C_2(q, K) = (1 - \lambda) + \lambda P(q)[1 + \mathbf{K}_2], \quad \mathbf{K}_2 = \exp\left(-\sum_{i=s,o,l} q_i^2 R_i^2\right); \quad (12a)$$

$$C_2(q, K) = (1 - \lambda) + \lambda P(q)[1 + \mathbf{K}_2] \prod_{i=s,o,l} \left[1 + \sum_{n=3}^{n_{\max}} \frac{k_{i,n}}{n! (\sqrt{2})^n} H_n(q_i R_i)\right], \quad (12б)$$

где $P(q)$ – стандартная поправка на кулоновское взаимодействие в конечном состоянии (кВКС) для сферически-симметричного протяженного источника, набор параметров $\mathcal{G}_3 \equiv \{\mathcal{G}_3^i\}_{i=1}^5 = \{\lambda, R_s, R_o, R_l, V\}$ характеризует степень хаотичности (λ) и геометрию области эмиссии на стадии застывания (радиусы R_s, R_o, R_l), соответствующий пространственный объем источника определяется как $V = (2\pi)^{3/2} \prod_{i=s,o,l} R_i$. В столкновениях (8в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ для пар $\pi^\pm \pi^\pm$ обнаружено отклонение формы пика $C_2(q, K)$ от гауссовой и улучшение качества аппроксимации при использовании (12б) по сравнению с (12а). Учет отклонения формы $C_2(q, K)$ от гауссовой оказывает наибольшее влияние на R_l и V , приводя к уменьшению оценок данных параметров по сравнению с простейшим приближением. В настоящей работе впервые получена зависимость $V(k_\perp)$. Для изучаемых столкновений (8в) наблюдается существенное уменьшение V с ростом $k_\perp$, определяемое соответствующими зависимостями для радиусов. Зависимости от $\sqrt{s_{NN}}$ были построены во всем доступном диапазоне начальных энергий для оценок параметров из $\mathcal{G}_3$, полученных для (12а). Для указанной зависимости в рамках данной работы предложено использовать нормированные значения размерных параметров из $\mathcal{G}_3$, определяемых по формулам $R_i^n = R_i/R_{\text{я}}, i = s,o,l$ и $V^n = V/V_{\text{я}}$, где $R_{\text{я}} = r_0 A^{1/3}$, $V_{\text{я}} = 4\pi R_{\text{я}}^3/3$ – радиус и объем сферически-симметричного ядра, $r_0 = (1.25 \pm 0.05)$ фм. Это позволило расширить спектр столкновений, исследуемых в рамках единого подхода. На рис. 5 представлена зависимость $V^n(\sqrt{s_{NN}})$. Не обнаружено резких изменений значений параметров из $\mathcal{G}_3$ и R_o/R_s с ростом $\sqrt{s_{NN}}$, которые были предсказаны рядом моделей в случае наличия фазового перехода первого рода в сильновзаимодействующей материи.

В заключении диссертации перечислены основные результаты и следующие из них физические выводы.

1. На основе экспериментального материала для неупругих реакций при промежуточных энергиях и созданной базы литературных данных исследованы струйные характеристики, а также их зависимости от $\sqrt{s}$ и множественности вторичных частиц.

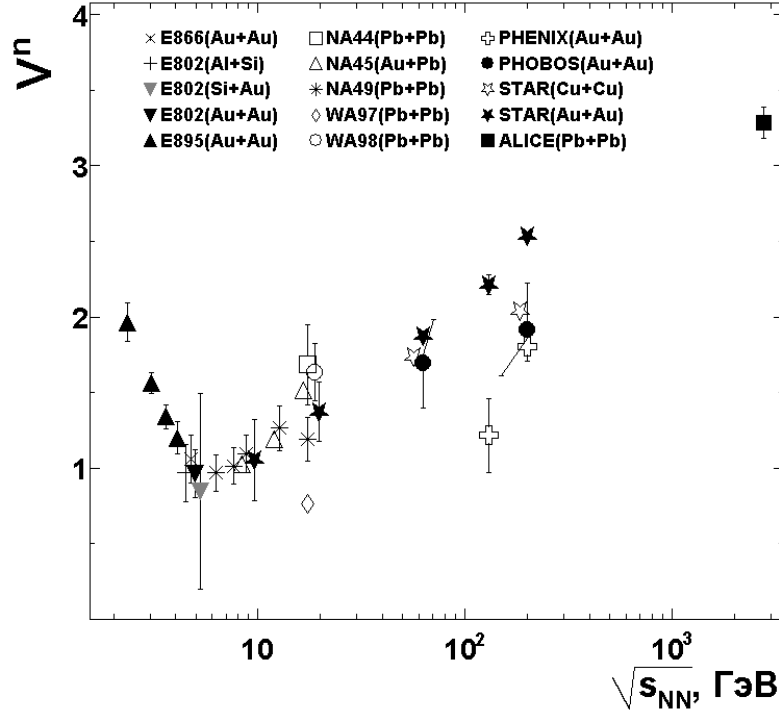


Рис. 5. Зависимость $V^n(\sqrt{s_{NN}})$ для различных ядро-ядерных столкновений при $\langle k_\perp \rangle \simeq 0.2$ ГэВ/с. Экспериментальные результаты представлены для центральных столкновений (в случае E802 для Al+Si – для событий без отбора по центральности), пар π^- мезонов (в случаях ALICE и STAR для (7в) – для $\pi^\pm\pi^\pm$ пар, E802 для Al+Si – для пар π^+ мезонов). Показаны статистические погрешности (для NA44 – полные погрешности).

1.1. Обнаружено, что при $\sqrt{s} \sim 3 - 5$ ГэВ влияние ядра приводит к существенно более изотропному распределению вторичных частиц для π^- Ne столкновений по сравнению с π^+ p взаимодействиями без образования странных частиц в конечном состоянии, росту поперечного импульса, ослаблению выстроенности и планарности события. Лидирующие частицы приводят к обратному, по сравнению с внутриядерным перерассеянием, эффекту в изменении геометрии конечного состояния в π^+ p реакции.

1.2. Впервые получена универсальная оценка нижней границы экспериментального проявления струйной структуры события в процессах множественного образования частиц: $\sqrt{s_l} \sim 3$ ГэВ.

1.3. Оригинальным методом получена оценка перенормируемой константы сильного взаимодействия при энергии равной массе Z бозона $\alpha_S(M_Z) = 0.121 \pm 0.011$ на основе зависимости среднего значения траста от начальной энергии для всех доступных типов взаимодействий, согласующаяся как с «мировым» средним, так и с результатами, которые получены другими методами.

1.4. Предложены аналитические аппроксимации для описания зависимостей традиционных коллективных переменных от начальной энергии и полу-

чены оценки значений соответствующих наблюдаемых для действующих и планируемых ускорительных комплексов.

1.5. Для различных реакций получены значения кластерной размерности пионных струй в пространстве 4-мерных скоростей. Впервые обнаружено, что для пион-протонных реакций оценки кластерной размерности имеют нецелые значения, что указывает на фрактало-подобный характер распределения пионов в фиксированной области фрагментации. Для пион-ядерных взаимодействий фрактальные свойства пионных струй выражены менее ярко.

1.6. Обнаружено, что при $\sqrt{s} \sim 3$ ГэВ происходит изменение характера зависимостей параметров мягких струй в пространстве 4-мерных скоростей от $\sqrt{s}$ с логарифмического на степенной, что, возможно, обусловлено началом экспериментального проявления кварковых степеней свободы в образовании указанных струй.

1.7. Впервые на основе изучения зависимостей динамических и геометрических параметров в пространстве 4-мерных скоростей от $\sqrt{s}$ получены оценки нижней энергетической границы экспериментального проявления кварковых степеней свободы в процессах образования мягких пионных струй. Интервал оценок, согласованный для всех рассмотренных параметров, $\sqrt{s_c} = (2.43 - 2.90)$ ГэВ.

2. Изучены коллективные эффекты на различных стадиях пространственно-временной эволюции системы вторичных частиц, образованных в столкновениях релятивистских ядер, и экспериментальные проявления топологически нетривиальной структуры вакуума КХД при конечных температурах.

2.1. В Au+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на ранней стадии эволюции системы вторичных частиц обнаружен новый эффект, заключающийся в том, что подавление существенно сильнее для струи, распространяющейся внутри объема сильновзаимодействующей материи и направленной вне плоскости реакции, и подавление слабее в случае струи, распространяющейся внутри материи в плоскости реакции. Данный результат является первым экспериментальным свидетельством корреляции степени подавления жестких адронных струй с длиной пути, проходимого ими внутри горячей сильновзаимодействующей материи.

2.2. Получены обобщенные формулы для азимутальных распределений адронных пар с учетом мягкой и жесткой компоненты эллиптического коллективного потока, а также для различных направлений испускания триггерной частицы относительно плоскости реакции.

2.3. На поздней стадии эволюции системы вторичных частиц, образованных в Au+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, методом НВТ-интерферометрии обнаружено, что учет отклонения формы корреляционной функции

от гауссовой оказывает наибольшее влияние на продольный размер и объем области эмиссии.

2.4. Для энергетической зависимости впервые предложено использовать нормированные значения НВТ-радиусов и объема области эмиссии, что позволило расширить спектр столкновений, исследуемых в рамках единого подхода. Не обнаружено резких изменений значений параметров НВТ, а также отношения R_o/R_s с ростом $\sqrt{s_{NN}}$.

2.5. Получены оценки напряженности магнитного поля, возникающего в ядро-ядерных столкновениях при различных комбинациях начальных энергий, пучков и центральностей. Для Cu+Cu и Au+Au взаимодействий при $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ и 200 ГэВ оценки достигают значений $\sim 10^{13} - 10^{15}$ Тл.

2.6. Обнаружен новый эффект асимметрии испускания электрически заряженных вторичных частиц относительно плоскости реакции в Cu+Cu и Au+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ и 200 ГэВ. Данный результат является экспериментальным указанием на возможность локального нарушения $\mathcal{P}/\mathcal{CP}$ четности в сильных взаимодействиях.

2.7. Введены понятия абсолютной и относительной асимметрии распределения зарядов в событии относительно плоскости реакции и впервые получены зависимости этих параметров от $\sqrt{s_{NN}}$. Указанные асимметрии для полуцентральных столкновений тяжелых ядер демонстрируют уменьшение при $\sqrt{s_{NN}} < 19.6$ ГэВ. В случае энергетической зависимости абсолютной асимметрии наблюдается качественное согласие с соответствующей зависимостью для скорости диффузии числа Черна – Саймонса, оцененной в рамках суперсимметричной $\mathcal{N} = 4$ теории Янга – Миллса. Зависимости абсолютной и относительной асимметрии распределения заряженных частиц относительно плоскости реакции от $\sqrt{s_{NN}}$ указывают, возможно, на существенное ослабление кирально-симметричной фазы квазисвободных цветовых зарядов в системе, образованной при промежуточных энергиях $\sqrt{s_{NN}} \lesssim 11.5$ ГэВ.

Основные публикации по теме диссертации

- [1] Михайличенко В.И., Ожороков В.А., Поносов А.К., Сергеев Ф.М. Четырехмерные характеристики множественного образования адронов в π^+p взаимодействиях при импульсе 4.2 ГэВ/с. Пионные струи. ЯФ. Т. **62**. 1999. С. 1787 (WOS: 000083602500007).
- [2] Андрияков А.Д., ... Ожороков В.А. и др. Корреляции пионов с малыми относительными импульсами. ЯФ. Т. **65**. 2002. С. 372 (WOS: 000174147300024).

- [3] *Adams J., ... Okorokov V. et al.* Azimuthal anisotropy and correlations at large transverse momenta in p+p and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. Lett. V. **93**. 2004. P. 252301 (WOS: 000225785200019).
- [4] *Adler C., ... Okorokov V. et al.* Pion interferometry in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. V. **C71**. 2005. P. 044906 (WOS: 000228764600064).
- [5] *Окорокров В.А.* Азимутальная анизотропия и образование экстремально-го состояния сильновзаимодействующей материи на RHIC. ЯФ. Т. **72**. 2009. С. 155 (WOS: 000263500700017).
- [6] *Abelev B.I., ... Okorokov V. et al.* Pion interferometry in Au+Au and Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}=62.4$ and 200 GeV. Phys. Rev. V. **C80**. 2009. P. 024905 (WOS: 000269640400051).
- [7] *Abelev B.I., ... Okorokov V. et al.* Azimuthal charged-particle correlations and possible local strong parity violation. Phys. Rev. Lett. V. **103**. 2009. P. 251601 (WOS: 000272958300007).
- [8] *Abelev B.I., ... Okorokov V. et al.* Observation of charged-dependent azimuthal correlations and possible local strong parity violation in heavy-ion collisions. Phys. Rev. V. **C81**. 2010. P. 054908 (WOS: 000278144800051).
- [9] *Campos S.D., Okorokov V.A.* Phenomenological analysis of pp and $\bar{p}p$ elastic scattering based on theoretical bounds in high-energy physics. Int. J. Mod. Phys. V. **A25**. 2010. P. 5333 (WOS: 000284358300004).
- [10] *Окорокров В.А., Поносков А.К., Сергеев Ф.М.* Коллективные и фрактальные свойства пионных струй в пространстве четырехмерных скоростей при промежуточных энергиях. ЯФ. Т. **73**. 2010. С. 2016 (WOS: 000284850300021).
- [11] *Okorokov V.A.* Event shapes for hadronic final state: experimental review. Int. J. Mod. Phys. V. **A27**. 2012. P. 1250037 (WOS: 000302313500003).
- [12] *Okorokov V.A.* Dependence of asymmetries for charge distribution with respect to the reaction plane on initial energy in heavy ion collisions. Int. J. Mod. Phys. V. **E22**. 2013. P. 1350041 (WOS: 000321395700011).
- [13] *Окорокров В.А., Поносков А.К.* Коллективные свойства конечного состояния в процессах с образованием адронных струй. ЯФ Т. **76**. 2013. С. 1292 (WOS: 000325776000007).

- [14] *Okorokov V.A.* Dependence of soft pion jet properties in the space of relative four-dimensional velocities on initial energy. *Int. J. Mod. Phys. V. A***28**. 2013. P. 1350150.
- [15] *Okorokov V.A., Sandrakova E.V.* Influence of fractal embedding in three-dimensional Euclidean space on wave propagation in electro- chromodynamics. *Univ. J. Phys. Appl. V.* **1**. 2013. P. 196.
- [16] *Окороков В.А.* Зависимость параметров зарядовой асимметрии от начальной энергии в столкновениях тяжелых ионов. *ЯФИ. Т.* **4**. 2013. С. 805.
- [17] *Михайличенко В.И., Окороков В.А., Поносов А.К., Сергеев Ф.М.* Четырехмерные характеристики и автомодельные свойства пионных струй в π^+p взаимодействиях при импульсе 4.2 ГэВ/с. Препринт ИТЭФ, № 26-98, М., 1998, 20 стр.
- [18] *Андряков А.Д., ... Окороков В.А. и др.* Корреляции пионов с малым относительным импульсом в адронных взаимодействиях при промежуточных энергиях. Препринт ИТЭФ, № 42-99, М., 1999, 24 стр.
- [19] *Okorokov V.A.* Estimations of $\mathcal{P}$ -odd correlators in heavy ion collisions at RHIC energies 62.4 – 200 GeV. arXiv: 0908.2522 [nucl-th]. 2009.
- [20] *Okorokov V.A.* Energy dependence of femtoscopy properties of pion source in nuclear collisions. arXiv: 1312.4269 [nucl-ex]. 2013.
- [21] *Okorokov V.A., Panitkin S.Yu.* Two-particle correlation measurements with STAR detector at RHIC. Proceedings of the XXXII International symposium on multiparticle dynamics, ISMD 2002. Alushta, Crimea, Ukraine, September 7 – 13, 2002. World Scientific, Singapore. 2003. P. 137.
- [22] *Okorokov V.A., Panitkin S.Yu.* Two-particle correlations at low relative momenta in STAR experiment at RHIC. Proceeding of the IV All Russian conference «Universities of Russia – fundamental researches. Physics of elementary particles and atomic nuclei». MEPhI, Moscow, Russia, January 27 – 31, 2003. Moscow, MEPhI. 2003. P. 12.
- [23] *Okorokov V.A., Filimonov K.V.* Azimuthal anisotropy in relativistic nuclear collisions and a model of compound flow. Proceedings of the VIII International workshop «Relativistic nuclear physics: from hundreds MeV to TeV», RNP 2005. Dubna, Russia, May 23 – 28, 2005. Dubna. 2006. P. 165.

- [24] *Okorokov V.A.* Collective effects in a medium and a model of compound flow in relativistic heavy ion collisions. Proceedings of the XXXIII International conference of high energy physics, ICHEP 2006. Moscow, Russia, July 26 – August 2, 2006. World Scientific. V. I. 2007. P. 389. Eds. by A. Sissakian, G. Kozlov, E. Kolganova.
- [25] *Okorokov V.A.* Pion jets at intermediate energies: fractal and collective properties in the four-dimensional velocity space. Proceedings of the XVIII International Baldin seminar on high energy physics problems, IBSHEPP 2006. Dubna, Russia, September 25 – 30, 2006. Dubna. V. I. 2008. P. 154. Eds. by A.N. Sissakian, V.V. Burov, A.I. Malakhov.
- [26] *Okorokov V.A.* Strange particle femtoscopy in relativistic heavy ion collisions: experimental overview. Proceedings of the XVIII International Baldin seminar on high energy physics problems, IBSHEPP 2006. Dubna, Russia, September 25 – 30, 2006. Dubna. V. II. 2008. P. 101. Eds. by A.N. Sissakian, V.V. Burov, A.I. Malakhov.
- [27] *Okorokov V.A.* Azimuthal anisotropy and fundamental symmetries in QCD matter at RHIC. Proceedings of the XIII International conference «Selected problems of modern physics», SPMP 2008. Dubna, Russia, June 23 – 27, 2008. Dubna. № E1,2-2009-36. 2009. P. 201. Eds. B.M. Barbashov, S.M. Eliseev.
- [28] *Михайличенко В.И., Окороков В.А., Поносов А.К., Сергеев Ф.М.* Экспериментальные данные по образованию пионных струй в неупругих пион-нуклонных взаимодействиях при промежуточных энергиях. Научная сессия МИФИ-98, 19 – 23 января 1998. Сборник научных трудов в 11 томах. Т. 3. М.: МИФИ, 1998. С. 86.
- [29] *Булеков О.В., Окороков В.А.* Анализ в пространстве 4-скоростей пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействий с образованием странных частиц. Научная сессия МИФИ-98, 19 – 23 января 1998. Сборник научных трудов в 11 томах. Т. 3. М.: МИФИ, 1998. С. 90.
- [30] *Демин П.А., Михайличенко В.И., Окороков В.А. и др.* Релятивистски-инвариантный анализ образования пионных струй в неупругих пион-протонных взаимодействиях при начальном импульсе 3.9 ГэВ/с. Научная сессия МИФИ-99, 18 – 22 января 1999. Сборник научных трудов в 13 томах. Т. 4. М.: МИФИ, 1999. С. 170.
- [31] *Андряков А.Д., ... Окороков В.А. и др.* Корреляции пионов с малым относительным импульсом в адронных взаимодействиях при промежуточ-

- ных энергиях. Научная сессия МИФИ-99, 18 – 22 января 1999. Сборник научных трудов в 13 томах. Т. 4. М.: МИФИ, 1999. С. 178.
- [32] *Andryakov A.D., ... V.A. Okorokov et al.* Pion correlations with low relative momentum under intermediate energies. Abstracts. XV Particles and nuclei international conference, PANIC1999. Uppsala, Sweden, June 10 – 16, 1999. Uppsala, 1999. P. 256.
 - [33] *Окороков В.А., Поносков А.К., Сергеев Ф.М.* Фрактальные размерности струй вторичных пионов в пион-протонных взаимодействиях при промежуточных энергиях. Научная сессия МИФИ-2000, 17 – 21 января 2000. Сборник научных трудов в 13 томах. Т. 7. М: МИФИ, 2000. С. 218.
 - [34] *Окороков В.А., Поносков А.К., Сергеев Ф.М.* Влияние резонансов на размерности пионных струй в пространстве четырехмерных скоростей. Научная сессия МИФИ-2000, 17 – 21 января 2000. Сборник научных трудов в 13 томах. Т. 7. М: МИФИ, 2000. С. 220.
 - [35] *Волков С.А., Окороков В.А., Филимонов К.В.* Азимутальная анизотропия в релятивистских ядерных столкновениях: общий случай. Научная сессия МИФИ-2005, 24 – 28 января 2005. Сборник научных трудов в 15 томах. Т. 5. М: МИФИ, 2005. С. 100.
 - [36] *Байдаров Ф.П., Окороков В.А., Филимонов К.В.* Азимутальная анизотропия в релятивистских ядерных столкновениях при асимптотически слабых непрямых корреляциях. Научная сессия МИФИ-2005, 24 – 28 января 2005. Сборник научных трудов в 15 томах. Т. 5. М: МИФИ, 2005. С. 102.
 - [37] *Байдаров Ф.П., Окороков В.А.* Моделирование корреляций с малыми относительными импульсами в парах с каонами для ядерных столкновений при энергиях RHIC. Научная сессия МИФИ-2006, 23 – 27 января 2006. Сборник научных трудов в 16 томах. Т. 5. М: МИФИ, 2006. С. 74.
 - [38] *Волков С.А., Окороков В.А.* Азимутальная анизотропия в релятивистских ядерных столкновениях: сравнение функции общего вида с экспериментом. Научная сессия МИФИ-2008, 21 – 25 января 2008. Сборник научных трудов в 15 томах. Т. 3. М: МИФИ, 2008. С. 191.
 - [39] *Окороков В.А.* Зависимость параметров зарядовой асимметрии от начальной энергии в столкновениях тяжелых ионов. Тезисы докладов. Международная сессия – конференция секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». Москва, НИЯУ МИФИ, 12 – 16 ноября 2012. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 108.

- [40] *Окороков В.А., Сандракова Е.В.* Фракталы в фундаментальной физике. Адронные струи при высоких энергиях: фрактальность и самоподобие. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2005. 232 стр.
- [41] *Окороков В.А., Сандракова Е.В.* Фракталы в фундаментальной физике. Фрактальные свойства множественного образования частиц и топология выборки. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2009. 460 стр.

Список цитированной литературы

- [42] *Hanson G., Abrams G.S., Boyarski A.M. et al.* Evidence for jet structure in hadron production by e^+e^- annihilation. Phys. Rev. Lett. V. **35**. 1975. P. 1609.
- [43] *Farhi E.* Quantum chromodynamics test for jets. Phys. Rev. Lett. V. **39**. 1977. P. 1587; *Brandt S., Dahmen H.D.* Axes and scalar measures of two-jet and three-jet events. Z. Phys. V. C1. 1979. P. 61.
- [44] *Derrick M., Fridman A., Gregory P. et al.* Comparison of jet size in $\bar{\nu}p$ with that in e^+e^- annihilation. Phys. Lett. V. **88B**. 1979. P. 177.
- [45] *Grassberger P., De Groot E.H.* Some comments on the sphericity of multi-particle states in e^+e^- collisions. Nucl. Phys. V. B**102**. 1976. P. 297.
- [46] *Балдин А.М.* Некоторые закономерности столкновений релятивистских ядер. Доклады АН СССР. Т. **222**. 1975. С. 1064.
- [47] *Baldin A.M., Didenko L.A.* Asymptotic properties of hadron matter in relative four-velocity space. Fortschr. Phys. V. **38**. 1990. P. 261; *Baldin A.M., Batyunya B.V., Gramenitsky I.M. et al.* Four-dimensional jets as universal characteristics of multiple particle production. JINR Rapid communications. № 16. 1986. P. 24; *Кулаков Б.А., Карачук Ю.* Кластерные и одночастичные распределения в АА взаимодействиях. Краткие сообщения ОИЯИ. № 4. 1997. С. 45; *Baldin A.M., Didenko L.A., Grishin V.G. et al.* Universal four-dimensional hadron jets and the observability of color charges. Preprint JINR, № E1-87-142, Dubna, 1987; *Малахов А.И., Сисакян А.Н., Сорин А.С., Вокал С.* Релятивистская ядерная физика в Объединенном институте ядерных исследований. ЭЧАЯ. Т. **38**. 2007. С. 780; *Балдин А.М., Балдин А.А.* Релятивистская ядерная физика: пространство относительных 4-скоростей, симметрии решений, принцип ослабления корреляций, подобие, промежуточные асимптотики. ЭЧАЯ. Т. **29**. 1998. С. 576.

- [48] *Voloshin S.A., Zhang Y.* Flow study in relativistic nuclear collisions by Fourier expansion of azimuthal particle distributions. *Z. Phys. V.* **C70**. 1996. P. 665.
- [49] *Voloshin S.A.* Parity violation in hot QCD: how to detect it. *Phys. Rev. V.* **C70**. 2004. P. 057901.
- [50] *Agakichiev G., Appelshäuser H., Baur R. et al.* Semihard scattering unraveled from collective dynamics by two-pion azimuthal correlations in 158A GeV/c Pb+Au collisions. *Phys. Rev. Lett. V.* **92**. 2004. P. 032301.
- [51] *Kharzeev D.E., McLerran L.D., Warringa H.J.* The effect of topological charge change in heavy ion collisions: «Event by event $\mathcal{P}$ and $\mathcal{CP}$ violation». *Nucl. Phys. V.* **A803**. 2008. P. 227.
- [52] *Bödeker D., Moore G.D., Rummukainen K.* Chern – Simons number diffusion and hard thermal loops on the lattice. *Phys. Rev. V.* **D61**. 2000. P. 056003.
- [53] *Basar G., Kharzeev D.E.* The Chern – Simons diffusion rate in strongly coupled $\mathcal{N} = 4$ SYM plasma in an external magnetic field. *Phys. Rev. V.* **D85**. 2012. P. 086012.
- [54] *Wang G.* Search for chiral magnetic effects in high-energy nuclear collisions. *Nucl. Phys. V.* **A904-905**. 2013. P. 248c; *Adamczyk L., ... Okorokov V. et al.* Fluctuations of charge separation perpendicular to the event plane and local parity violation in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC. arXiv: 1302.3802 [nucl-ex]. 2013.
- [55] *Cleymans J., Oeschler H., Redlich K., Wheaton S.* Comparison of chemical freeze-out criteria in heavy-ion collisions. *Phys. Rev. V.* **C73**. 2006. P. 034905.
- [56] *Pratt S.* Pion interferometry of quark-gluon plasma. *Phys. Rev. V.* **D33**. 1986. P. 1314; *Betrtsch G.F., Gong M., Tohyama M.* Pion interferometry in ultrarelativistic heavy-ion collisions. *Phys. Rev. V.* **C37**. 1988. P. 1896.

Подписано к печати «___» _____ 2013 г. Заказ _____ Тираж 100 экз.

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.