

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

АЗАРКИН Максим Юрьевич

**МНОЖЕСТВЕННОЕ РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ В
АДРОН-АДРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ
БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА**

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Дрёмин Игорь Михайлович
ФГБУ науки Физический институт
им. П. Н. Лебедева Российской
академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Зотов Николай Петрович
ведущий научный сотрудник НИИЯФ
МГУ,

доктор физико-математических наук

Курепин Алексей Борисович

Зав. лабораторией, ИЯИ РАН

НИЦ "Курчатовский институт" ФГБУ

Ведущая организация: "Государственный Научный Центр
Российской Федерации Институт
Теоретической и Экспериментальной
Физики"

Защита состоится 7 декабря 2015 года в 12:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при Физическом Институте им. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИАН или на сайте <http://www.lebedev.ru/>.

e-mail: postmaster@lebedev.ru

Автореферат разослан «___» _____2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.04

доктор физико-математических наук

А. В. Серов

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность работы

Неупругие адронные процессы представляют значительный интерес в современной физике элементарных частиц. Их изучение на протяжении уже нескольких десятилетий дает основные сведения о самых фундаментальных законах природы. Однако исследование и интерпретация экспериментальных данных становятся все более и более сложной задачей. Партоновая структура высокоэнергетических адронов представляет довольно сложную систему, вычислить которую в квантовой хромодинамике (КХД) [1] из первых принципов пока не представляется возможным. Она оказывает непосредственное влияние на множественность рожденных в столкновении частиц как с малыми p_T , так и с большими, то есть и на жесткие процессы (в том числе рождение бозона Хиггса). Поэтому исследование процессов множественного рождения частиц затрагивает широкий круг физических процессов, обнажает связи между ними. Однако существует множество явлений, без учета которых установление этих связей и интерпретация результатов будут проблематичны. К таким явлениям, например, относятся непертурбативный процесс адронизации кварков и глюонов, явление глюонной радиации, которая может проявляться как в пертурбативном, так и непертурбативном секторах КХД, возможные коллективные эффекты. Всестороннее изучение протон-протонных (pp) столкновений, приводящих ко множественному рождению частиц, способно значительно прояснить картину их взаимодействий.

В настоящей диссертации используются данные, полученные в эксперименте CMS (Compact Muon Solenoid) [2] на Большом Адронном Коллайдере (сокр. БАК, на англ. Large Hadron Collider) [3], и касаются измерений процессов множественного рождения частиц в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. В результате проведенных измерений были обнаружены отклонения от предсказаний моделей. Наиболее значительные из них проявились при высокой множественности заряженных частиц в событии.

Отдельным направлением физики высоких энергий являются экспери-

менты по столкновению релятивистских ядер. Главная их цель – исследование свойств рожденной в столкновениях релятивистских ядер материи с экстремально высокой плотностью энергии. Такое состояние вещества в рамках теории большого взрыва могло существовать в первые мгновения жизни нашей Вселенной. Образование нового сверхплотного состояния вещества предсказывается [4, 5] статистической КХД для сильновзаимодействующих систем с достаточно высокой температурой ($T > 200$ МэВ). Такая температура достигается при плотностях энергии $\varepsilon = 1$ ГэВ/ $\Phi\text{м}^3$. На ускорителе RHIC, например, в столкновениях ядер золота при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ плотность энергии в 5 раз превышает значение, необходимое для образования нового состояния вещества, которое принято отождествлять с кварк-глюонной плазмой (КГП) [5]. Поэтому уже первые результаты экспериментов на RHIC [6], [7], [8] продемонстрировали, что столкновения ядер не могут быть описаны тривиальной суперпозицией бинарных pp взаимодействий. Среди основных результатов, наблюдаемых на RHIC, можно выделить следующие: коллективная азимутальная анизотропия частиц, специфические двух- и трехчастичные корреляции, эффект гашения струй, подавление выхода адронов с высокими поперечными импульсами в сравнении с протон-протонными столкновениями. В настоящей диссертации представлены измерения коллективной азимутальной анизотропии заряженных частиц в столкновениях ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ по данным эксперимента CMS. Стоит специально отметить, что энергия столкновения ядер возросла более, чем на порядок в сравнении с ускорителем RHIC, а плотность энергии достигла $\varepsilon = 10$ ГэВ/ $\Phi\text{м}^3$.

1.2 Цели диссертационной работы

Целью данной работы является экспериментальное исследование процессов множественного рождения частиц в протон-протонных и ядроядерных (PbPb) столкновениях при энергиях БАК, а также их интерпретация:

1. Измерение характеристик множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ как функции мно-

жественности заряженных частиц в столкновении (N_{ch}).

2. Анализ экспериментальных данных, установление связей между различными характеристиками множественного рождения частиц и прицельным параметром pp столкновений.
3. Поиск и исследование механизма, ответственного за угловые корреляции в большом интервале псевдобыстрот, обнаруженные в протон-протонных столкновениях с высокой множественностью заряженных частиц.
4. Измерение характеристик азимутальной анизотропии, в частности эллиптического потока [9, 10] (v_2), заряженных частиц в PbPb столкновениях при $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2,76$ ТэВ. С целью получения полной картины измерения должны быть выполнены методами, имеющими различную чувствительность к флуктуациям начального состояния и непотоковым корреляциям.

1.3 Новизна работы

К моменту написания диссертации начал свою многолетнюю работу Большой Адронный Коллайдер, способный достичь на порядок больших энергий, чем предыдущие ускорители. Настоящая диссертационная работа основана на данных эксперимента CMS, одного из наибольших на БАК, и посвящена изучению процессов множественного рождения частиц в столкновениях протонов и тяжелых ионов, для которых энергии столкновения в системе центра масс составили 7 ТэВ и 2,76 ТэВ на пару нуклонов соответственно.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

1. Впервые многие из свойств протон-протонного столкновения исследованы как функции N_{ch} : средний p_T заряженных частиц, как всех в событии, так и принадлежащих струям и фоновому событию в отдельности, средний p_T струй, реконструированных из заряженных частиц, структура струй, множественность струй. То есть все заря-

женные частицы рассортированы в зависимости от (вероятного) механизма их происхождения на внутрискруйные и фоновые.

2. Показана связь между разнообразными характеристиками множественного рождения частиц в pp столкновениях: в частности, между характеристиками рождения адронов с малыми p_T и жесткими процессами, а также прицельным параметром. Так, было обнаружено свойство универсальности жестких сигналов как функции N_{ch} , имеющее существенное значение для понимания картины пространственного взаимодействия протонов.
3. Измерены характеристики PbPb столкновений, эллиптический поток и средние импульсы заряженных частиц, при энергии в системе центра масс 2,76 ТэВ на пару нуклонов, что в 14 раз превышает энергию, доступную для аналогичных измерений на других ускорителях. Такое расширение энергетического диапазона позволяет заключить, что наблюдается логарифмический рост интегрального значения v_2 с ростом энергии столкновения для близких систем.

1.4 Научная и практическая ценность

1. Примененный подход к анализу событий pp столкновения, исследование многих его характеристик как функций N_{ch} , позволяет выделить роли отдельных механизмов и процессов. Таким образом, становится возможным значительно более эффективно совершенствовать модели pp взаимодействий как на основе уже проведенных автором измерений, так и за счет применения его в дальнейшем, в том числе на экспериментах БАК при новых энергиях.
2. Показанные связи между различными характеристиками множественного рождения частиц в pp столкновениях позволяют существенно уточнить роли отдельных механизмов и тем самым представляют большой интерес для развития Монте-Карло моделей. Стоит подчеркнуть, что события с высокими N_{ch} дают существенный вклад

в сечения жестких процессов, что делает их исследование востребованным и в других областях физики высоких энергий.

3. Возможность получения угловых корреляций в большом интервале псевдобыстрот в рамках струнного механизма адронизации указывает направление дальнейшего развития моделей. В силу многих упрощений, в особенности о поперечной структуре протона, допущенных в моделях Монте-Карло генераторов, роль этого механизма подавлена в рождении таких корреляций в угоду описания других характеристик pp взаимодействий. Так, рост $\langle p_T \rangle$ заряженных частиц при увеличении N_{ch} обусловлен фактически только механизмом так называемого цветового пересоединения, укорачивающего длину струн.
4. Измеренные характеристики PbPb столкновений, эллиптический поток и средние импульсы заряженных частиц, при энергии в системе центра масс 2,76 ТэВ на пару нуклонов, налагают существенные ограничения на теоретические модели взаимодействия релятивистских тяжелых ионов. Полученные данные могут быть использованы при создании новых и усовершенствовании уже существующих Монте-Карло генераторов событий столкновений релятивистских тяжелых ионов.

1.5 Защищаемые положения

1. Измерены характеристики протон-протонных столкновений при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ как функции множественности рожденных заряженных частиц: средний p_T заряженных частиц, как всех в событии, так и принадлежащих струям и фоновому событию в отдельности, средний p_T струй, реконструированных из заряженных частиц, структура струй, множественность струй. Выявлено сильное расхождение (до 2–3 раз) данных и предсказаний Монте-Карло генераторов для p_T спектра струй в области $N_{ch} > 80$.
2. Была показана возможность рождения протяженных в большом интервале псевдобыстрот угловых корреляций, обнаруженных в

протон-протонных столкновениях с высокой множественностью, с помощью струнного механизма адронизации генератора событий PYTHIA.

3. Установлена связь между многими характеристиками множественного рождения частиц и прицельным параметром (b) pp столкновений. Обнаружено явление универсальной связи между множественностью адронов с малыми p_T и множественностью жестких процессов.
4. Измерены характеристики азимутальной анизотропии, в частности эллиптического потока заряженных частиц, в PbPb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Измерения проведены в широком кинематическом интервале, $0,3 < p_T < 20$ ГэВ/ c , $|\eta| < 2,4$, и в 12 классах центральности от 0 до 80%, и выполнены четыремя различными методами, имеющими различную чувствительность к флуктуациям начального состояния и непотоковым корреляциям.

1.6 Личный вклад автора

Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. В частности, в работах по анализу данных эксперимента CMS автором были написаны программные коды для выполнения отбора и реконструкции событий столкновений адронов, для проведения вычислений искомым величин, включая их коррекции на детекторные эффекты, а также проведены исследования систематических ошибок. Автор принимал активное участие в подготовке материала к публикации для статьи [A3], а также играл ведущую роль в подготовке материала и работе над статьей [A2]. С 2010 года автор участвовал в разнообразных работах по поддержанию функционирования как самого эксперимента, так и его программного обеспечения. В работах [A1, A4], связанных с интерпретацией данных, большая часть вычислений и Монте-Карло моделирований были выполнены автором настоящей диссертации.

1.7 Публикации

Список публикаций по теме диссертации включает 4 работы [A1, A2, A3, A4], опубликованные в ведущих реферируемых журналах.

1.8 Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях MPI @ LHC 2013(Антверпен, Бельгия), MPI @ LHC 2014 (Краков, Польша).

1.9 Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 162 страниц с 63 рисунками и 15 таблицами. Список литературы содержит 173 наименования.

2 Краткое содержание работы

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается важность и актуальность исследуемых проблем.

В главе 1 освещены основные механизмы протон-протонного взаимодействия при высоких энергиях, используемые в настоящее время в Монте-Карло генераторах событий и значимые для физических процессов, исследуемых в диссертации.

В главе 2 приведена краткая информация об эксперименте CMS [2], установленном на ускорителе БАК. Именно полученные в этом эксперименте данные лежат в основе настоящей диссертационной работы.

Ключевую роль, определившую устройство детектора, играет мощное магнитное поле, необходимое для точного измерения импульса мюонов и других заряженных частиц высоких энергий. Данное требование предопределило использование сверхпроводящего соленоида. На рис. 1 показано устройство детектора CMS, из которого видно, что сверхпроводящий соленоид размещен в центральной части детектора и имеет 13 м в длину и 6 м

в диаметре. Номинальное значение создаваемого поля – 4 Тл.

Внутреннее пространство соленоида достаточно большое и способно вместить в себя внутренний трекер и всю калориметрическую систему детектора. Размер внутреннего трекера составляет 5,8 м в длину и 2,6 м в диаметре. Он состоит из 10 слоев силиконовых микроstriповых детекторов, которые обеспечивают хорошую точность измерений треков и 3 слоев силиконовых пиксельных детекторов, расположенных близко к точке столкновения пучков, что позволяет измерять прицельные параметры треков и находить вторичные вершины, главным образом возникающие вследствие распада нестабильных частиц. Внутренний трекер покрывает интервал псевдобыстроты $|\eta| < 2,5$ и позволяет измерять заряженные частицы с $p_T \gtrsim 100$ МэВ/с. Разрешение по поперечному импульсу составляет около 0,7 % при 1 ГэВ/с, а прицельный параметр заряженной частицы может быть измерен с разрешением 100 мкм. Большая часть измерений, проведенных в диссертации, использует информацию с внутреннего трекера.

Электромагнитный калориметр сделан из кристаллов вольфрамата свинца (PbWO_4) и покрывает интервал псевдобыстрот $|\eta| < 3$. Электромагнитный калориметр окружен адронным калориметром, состоящим из латунных пластин и сцинтилляторов и покрывающим интервал псевдобыстрот $|\eta| < 3$. Покрытие до $|\eta| < 5$ обеспечивается передним адронным калориметром (HF), состоящим из кварцевых волокон и железных прослоек, сигналы с которого использованы для отбора и классификации событий PbPb столкновений. Еще большее геометрическое покрытие обеспечивается специализированными калориметрами CASTOR, ZDC и трековой системой TOTEM. Более подробно эти системы описаны в [2].

В главе 3 представлены исследования характеристик множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ как функции множественности заряженных частиц: средний p_T заряженных частиц, как всех в событии, так и принадлежащих струям и фоновому событию в отдельности, средний p_T струй, реконструированных из заряженных частиц, структура струй, множественность струй. Таким образом, все заряженные частицы рассортированы в зависимости от (вероятного) механизма их происхождения на внутрискруйные и фоновые. Подход к

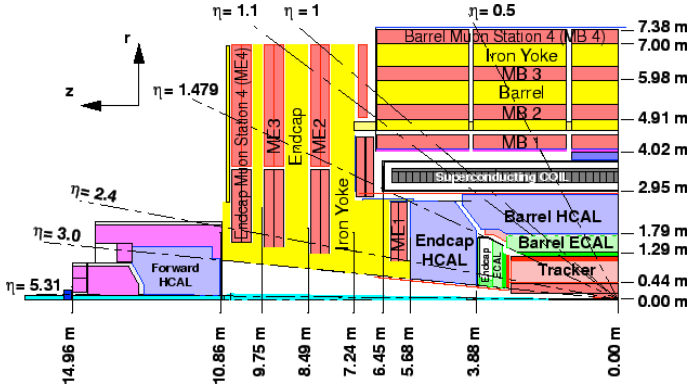


Рис. 1: Профиль детектора CMS, показывающий расположение его ключевых систем, детальное описание которых можно найти в [2].

анализу экспериментальных данных следующей:

- Пространство событий разделено на интервалы в соответствии с множественностью заряженных частиц. Множественность определена как число стабильных ($ct > 10$ мм) заряженных частиц с $p_T > 0,25$ ГэВ/с и $\eta < 2,4$. Классы множественности, средняя множественность в классе и соответствующие числа событий показаны в таблице 1.
- В каждом событии, используя только заряженные частицы, с помощью ак_T-алгоритма [11] находятся струи. В работе было показано, что радиус струи 0,5 является оптимальным с точки зрения разделения частиц, принадлежащих фоновому событию и струям. Только струи с $p_T > 5$ ГэВ/с и $\eta < 1,9$ использованы для исследований внутренней структуры струи.
- Частицы, которые не принадлежат струям, рассматриваются как фоновые.

В результате проведенных измерений можно заключить, что характеры зависимостей от N_{ch} всех исследуемых величин обусловлены главным

Таблица 1: Классы множественности, средняя множественность в классе и соответствующее число событий. Множественность N_{ch} определена как число стабильных заряженных частиц с $p_T > 0,25$ ГэВ/с и $|\eta| < 2,4$.

Класс множественности	Средняя множественность $\langle N_{\text{ch}} \rangle$	Число событий
$10 < N_{\text{ch}} \leq 30$	18.9	2 795 688
$30 < N_{\text{ch}} \leq 50$	38.8	1 271 987
$50 < N_{\text{ch}} \leq 80$	61.4	627 731
$80 < N_{\text{ch}} \leq 110$	90.6	105 660
$110 < N_{\text{ch}} \leq 140$	120	11 599

образом двумя возможностями увеличения множественности. С одной стороны, как и ожидалось, средние поперечные импульсы всех заряженных частиц, струй, множественность струй растут с N_{ch} вследствие роста числа (полу)жестких партонных взаимодействий во все более центральных соударениях. С другой стороны, средние поперечные импульсы внутрискруйных частиц падают с ростом N_{ch} , так как возрастающая множественность частично обусловлена тем, что партоны фрагментируют во всё большее число более мягких адронов. Таким образом, события с высокими N_{ch} являются результатом двух противоположных тенденций: возрастающее число все более жестких партонных взаимодействий, приводящих к (мини)струям, и смягчение фрагментации, что приводит к большему числу частиц, принадлежащих струям.

Детальное сравнение экспериментальных данных и предсказаний Монте-Карло генераторов выявило множество расхождений. В целом РYTHIA [12,13] (в особенности РYTHIA 6 Z2*) описывает данные значительно лучше, чем HERWIG [14]. Особый интерес представляет сильное расхождение (см. рис. 2) данных и предсказаний для p_T спектра струй в области $N_{\text{ch}} > 80$. В этом интервале струи более мягкие и их множественности меньше, чем предсказано РYTHIA. Это объясняет бóльшую сферичность, наблюдаемую в экспериментальных данных в сравнении с предсказаниями [15]. Монте-Карло генераторы также не способны хорошо описать p_T спектр внутрискруйных частиц и структуру струи. Хотя эти расхожде-

ния не столь велики, как для p_T спектра струй, и сравнимы с различиями между предсказаниями разных Монте-Карло моделей, но имеют систематический характер. Средний поперечный импульс внутрискруйных частиц, наблюдаемый в данных, больше при малых N_{ch} и меньше при больших N_{ch} в сравнении с предсказаниями. Схожая картина наблюдается и для пространственной структуры струи: при малых N_{ch} струя более узкая, а при больших N_{ch} одинакова или даже шире, в сравнении с предсказаниями. В то же время, характеристики фонового события хорошо воспроизводятся большинством генераторов событий во всех интервалах множественности.

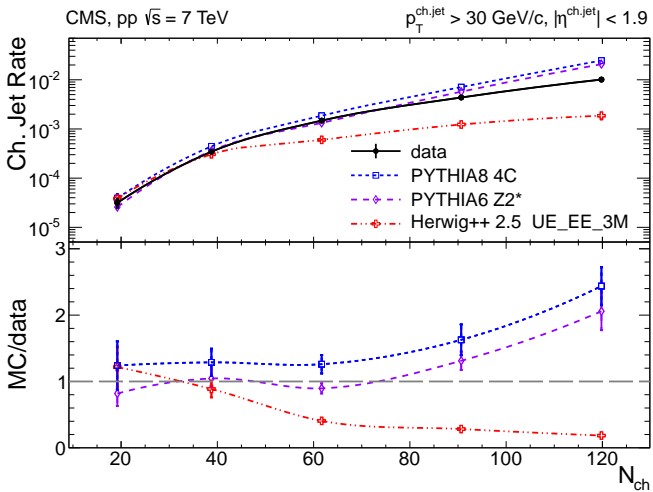


Рис. 2: Множественность струй с $p_T > 30$ ГэВ/с, составленных из заряженных частиц, как функция N_{ch} .

В главе 4 исследовалось явление хребтообразной структуры, обнаруженной в pp столкновениях с высокой множественностью заряженных частиц [16] при анализе двухчастичной корреляции в пространстве $(\Delta\eta, \Delta\varphi)$. Эта новая для pp столкновений корреляция не воспроизводится наиболее распространенными в настоящий момент генераторами событий, тем не менее она может проявляться в событиях с большими N_{ch} в результате механизма разрыва цветных струн. Возможность возникновения рождения

протяженных в большом интервале псевдобыстрот угловых корреляций, была продемонстрирована с помощью струнного механизма генератора событий PYTHIA 6 (см. рис. 3). Подобный эффект пока не учтен корректно в Монте-Карло генераторах событий или даже подавлен для улучшения описания остальных характеристик множественного рождения частиц в pp столкновениях. Важную роль в этом может играть используемый в генераторах событий механизм цветowych пересоединений [17], который стремится минимизировать суммарную длину всех струн в событии. Вероятность пересоединения в нем увеличивается с ростом количества партонных взаимодействий. Это может объяснять тот факт, что PYTHIA воспроизводит хребтообразную структуру при $\Delta\phi = 0$ только при низких множественностях. Таким образом, с большой долей вероятности можно все же утверждать, что цветные струны ответственны за данный тип корреляций.

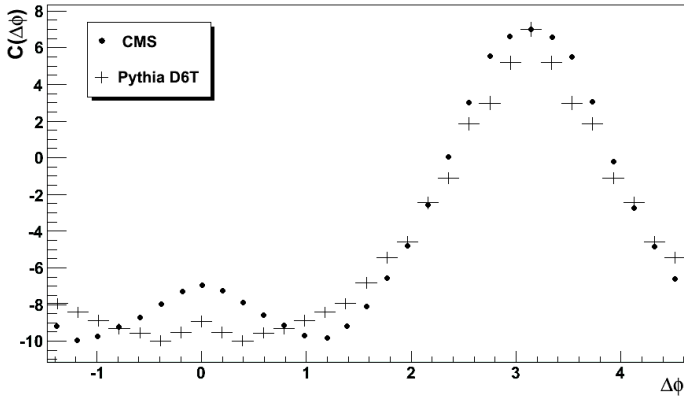


Рис. 3: Проекция корреляционных функций на ось $\Delta\phi$ для $2, 0 < \Delta\eta < 4, 8$. Корреляционная функция определена так же, как в [18]. Экспериментальные данные сравнены с предсказаниями PYTHIA 6.

В главе 5 установлена связь между многими характеристиками множественного рождения частиц и прицельным параметром pp столкновений. Так, сопоставляя вероятность возникновения столкновения с данным прицельным параметром, полученную из анализа упругих процессов [19, 20], с вероятностью событий с множественностью больше определенной [21],

можно получить соответствие между прицельным параметром и множественностью [22]. На рис. 5 показана зависимость прицельного параметра от множественности. Очевидно, что эта зависимость не может быть справедливой при высоких множественностях, так как изменение площади перекрытия ограничено, а распределение по множественности имеет очень длинный хвост. Из рис. 5 видно, что $N_{\text{ch}}(p_T > 0.5 \text{ GeV}/c, |\eta| < 2, 4) \geq 35$ фактически соответствует $b \leq 0,4$ Фм. Хотя вероятность событий $N_{\text{ch}}(p_T > 0.5 \text{ GeV}/c, |\eta| < 2, 4) > 35$ всего лишь 5 %. В то же время измеренные значения N_{ch} достигают ≈ 100 . Понятно, что такие высокие значения, в трижды большие, чем при $b = 0,4$ Фм, не могут быть обеспечены лишь 8 % приростом площади перекрытия протонов в случае абсолютно лобового столкновения.

При энергиях БАК все столкновения с $b \leq 0,3 \div 0,4$ Фм становятся с подавляющей вероятностью абсорбирующими. К тому же половина всех взаимодействий глюонов с x выше 10^{-3} , которые приводят к наблюдаемым струям в конечном состоянии, происходит при прицельном параметре налетающих друга на друга протонов не выше $b \leq 0,6$ Фм. Такие столкновения протонов, затрагивающие их центральную часть, приводят к событиям с высокой множественностью. Таким образом, измерение характеристик рождения струй как функции множественности является прекрасным инструментом для изучения внутренней структуры протона. На основе результатов, представленных в главе 3 и опубликованных в [23], можно вычислить вклад разных интервалов множественности в рождение струй (см. рис. 4 (а,б)). Видно, что события с высокими N_{ch} хоть обладают малой вероятностью, но дают существенный вклад в сечение рождения струй и других жестких процессов.

Используя результаты измерений, представленные в главе 3 и опубликованные в [23], было вычислено отношение R средней множественности струй $\langle N_j \rangle$ при данном N_{ch} к $\langle N_j \rangle$ во всех событиях для разных порогов по поперечному импульсу (см. рис. 6). Основываясь на этих вычислениях, показано, что стандартной геометрической картины взаимодействия достаточно для описания событий с множественностью $N_{\text{ch}}(p_T > 0,25 \text{ ГэВ}/c) < 70$ (или $N_{\text{ch}}/\langle N_{\text{ch}} \rangle \lesssim 3,0$) при 7 ТэВ. Максимальные измеренные значе-

ния R (до 6–7) и множественности ($N_{\text{ch}}(p_T > 0,25 \text{ ГэВ}/c) = 140$) лежат за пределами, определяемыми лишь геометрией столкновения, и указывают на наличие взаимодействий протонов в конфигурациях, где глюонная плотность существенно выше средней. Обнаруженный ранее эффект хребта [16] наблюдался в аналогичных событиях. Значения R , полученные для струй, показывают очень неплохое согласие с аналогичными измерениями для J/ψ и D -мезонов, проведенными экспериментом ALICE, что продемонстрировано на рис. 6. Это говорит в пользу того, что выход жестких процессов определяется в наибольшей степени начальным состоянием протонов.

Для расширения и углубления знаний по пространственной картине взаимодействия протонов, описанные выше измерения желательно продолжить до больших значений множественности и для процессов с более высокими p_T . Будет ли наблюдаться рост выхода струй, происходящих от глюонов $x > 0.05$, и в какой степени с ростом множественности? Ответ на данный вопрос был бы очень полезен для оценки фонов при исследовании редких процессов, лежащих за пределами стандартной модели.

К тому же исследования свойств жестких процессов необходимо произвести как функции множественности фонового события. Это существенно улучшило бы точность вычислений, проведенных в данной работе, и позволило бы более категорично говорить о роли отдельных механизмов множественного рождения частиц. Интересным также является и изучение протонных столкновений с множественностью меньше средней. В таких событиях, которые случаются при больших b , основную роль играет однопомеронный обмен. Поскольку свойства Померона не зависят от b , то R должно выполаживаться при низких N_{ch} .

В главе 6 представлено исследование азимутальной анизотропии, в частности эллиптического потока, заряженных частиц в PbPb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76 \text{ ТэВ}$, а также проведены сравнения с аналогичными результатами при более низких энергиях. Измерения проведены в широком кинематическом интервале, $0,3 < p_T < 20 \text{ ГэВ}/c$, $|\eta| < 2,4$, и в 12 классах центральности от 0 до 80%, и выполнены четырьмя различными методами, имеющими различную чувствительность к флуктуациям начального состо-

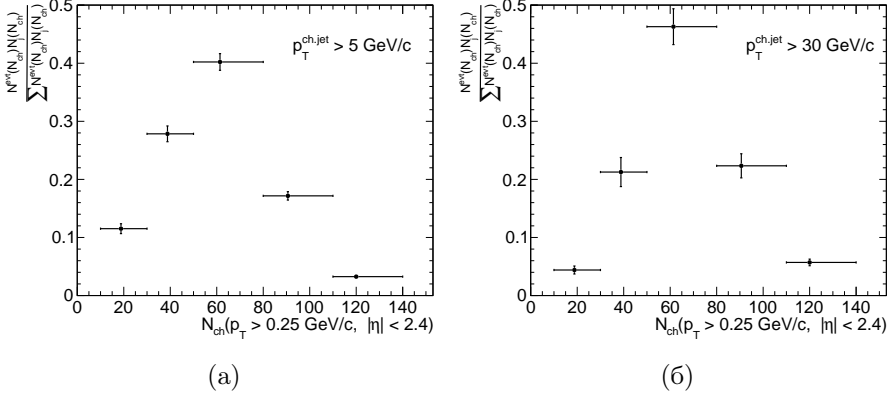


Рис. 4: Инклюзивное рождение струй, составленных из заряженных частиц, в разных интервалах N_{ch} : (а) – для струй с $p_T^{\text{ch,jet}} > 5 \text{ ГэВ}/c$, (б) – для струй с $p_T^{\text{ch,jet}} > 30 \text{ ГэВ}/c$.

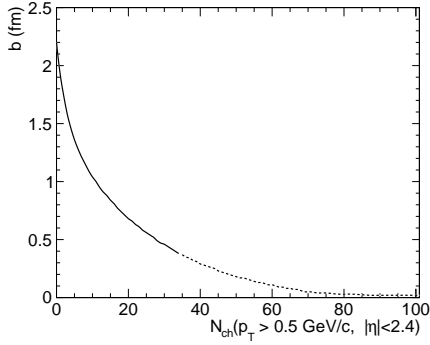


Рис. 5: Зависимость прицельного параметра от N_{ch} . N_{ch} определено как число заряженных стабильных частиц с $p_T > 0,5 \text{ ГэВ}/c$ и $|\eta| < 2,4$. Зависимость после $N_{\text{ch}} > 35$ не корректна, поскольку такие события фактически центральные.

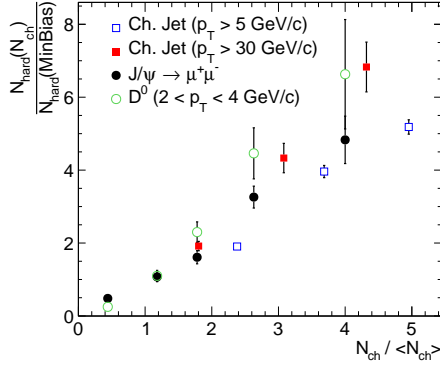


Рис. 6: Относительный выход, R , жестких процессов как функция $N_{ch}/\langle N_{ch} \rangle$, где при подсчете N_{ch} не учитываются частицы от данных жестких процессов.

яния и непотоковым корреляциям. Тщательное систематическое сравнение результатов, полученных этими методами, дает возможность видеть дополнительные детали картины столкновения ультрарелятивистских тяжелых ядер. Представленные результаты измерения $v_2(p_T)$ несут информацию о непотоковых корреляциях и флуктуациях эксцентриситета области взаимодействия в начальном состоянии. Для того чтобы лучше увидеть влияние этих эффектов, зависимости $v_2(p_T)$, полученные методами с разной чувствительностью к ним [24–29], представлены на рис. 7. Метод двухчастичных кумулянтов наиболее всего подвержен влиянию непотоковых корреляций, поскольку пары частиц, используемые для вычисления, находятся в одном узком интервале псевдобыстрот. Метод плоскости события обладает аналогичным недостатком, если не применять специальных процедур. В данном анализе частицы, используемые для определения плоскости события и вычисления потока, разделены как минимум 3 единицами псевдобыстроты. Различия между этими двумя методами заметны в наибольшей степени при высоких p_T и для периферических столкновений, где вклад струй в корреляции становится доминирующим.

Было обнаружено, что параметр эллиптической анизотропии $v_2(p_T)$

для заряженных частиц $|\eta| < 0,8$ увеличивается с ростом p_T вплоть до $p_T \approx 3$ ГэВ/ c , а затем уменьшается в интервале $3 < p_T < 10$ ГэВ/ c . Для заряженных частиц с $10 < p_T < 20$ ГэВ/ c зависимость выходит на плато в пределах погрешностей измерений, значительно возрастающих с p_T . Исследование азимутальной анизотропии заряженных частиц с высокими p_T может быть использовано для получения информации об энергетических потерях партона, движущегося в среде. Формы зависимостей $v_2(p_T)$, измеренные в этой работе по данным CMS, аналогичны измеренным в экспериментах на ускорителе RHIC. Лишь при малых p_T был обнаружен умеренный рост значения коэффициента эллиптического потока на 5–15% для данных LHC по сравнению с RHIC, несмотря на 14-кратное увеличение $\sqrt{s_{NN}}$. Интегральное значение v_2 , измеренное в интервале $|\eta| < 0,8$, в полуцентральных столкновениях (с центральностью 20–30%) растет примерно логарифмически с $\sqrt{s_{NN}}$, что показано на рис. 8. Увеличение на 20–30%, обнаруженное на LHC в сравнении с самыми высокими энергиями RHIC, главным образом обусловлено ростом среднего p_T заряженных частиц. Интегральное значение v_2 увеличивается с ростом центральности столкновения (см. рис. 9) до 40–50%, после чего наблюдается спад. Значения же $\langle p_T \rangle$ наоборот возрастают с N_{part} вплоть до $N_{\text{part}} \approx 150$ и далее насыщаются, что означает схожесть условий замораживания системы в широком диапазоне центральности столкновений (0–35%).

Специально стоит отметить, что измерения v_2 , проведенные всеми четырьмя методами, деленные на эксцентриситет или кумулянтные моменты, определенные в рамках тех же методов, дают очень схожие результаты. Нарушение такого скейлинга наблюдается лишь в самых центральных и периферических столкновениях (центральность выше 50%). Деленное на эксцентриситет v_2 при центральных быстротах ведет себя прямо пропорционально плотности частиц, обнаруживая универсальный скейлинг для разнообразных сталкивающихся систем и различных энергий столкновений, проявившийся на RHIC и LHC. Обнаружено, что значения $v_2(\eta)$ слабо зависят от псевдобыстроты в центральных столкновениях, хотя в периферических $v_2(\eta)$ демонстрирует медленный спад с ростом $|\eta|$. Результаты, изложенные в данной главе, предоставляют новые данные для дальнейше-

го развития теоретических моделей релятивистских ядро-ядерных столкновений и могут быть использованы для определения начальных состояний системы, степени термализации, а также транспортных свойств материи, рожденной в столкновениях тяжелых ионов.

В заключении сформулированы основные результаты, а именно:

- Измерены характеристики множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ как функции множественности заряженных частиц: средний p_T заряженных частиц, как всех в событии, так и принадлежащих струям и фоновому событию в отдельности, средний p_T струй, реконструированных из заряженных частиц, структура струй, множественность струй.

Сравнение экспериментальных данных и предсказаний Монте-Карло генераторов выявляет множество расхождений. Особый интерес представляет сильное различие (до 2-3 раз) данных и предсказаний для p_T спектра струй в области $N_{ch} > 80$. Это объясняет большую сферичность, наблюдаемую в экспериментальных данных в сравнении с предсказаниями [15]. Полученные результаты особенно важны для улучшения существующих моделей генераторов частиц и углубления понимания механизмов множественного рождения частиц при энергиях БАК.

- Показана возможность рождения протяженных в большом интервале псевдобыстрот угловых корреляций, обнаруженных в протон-протонных столкновениях с высокой множественностью, с помощью струнного механизма адронизации генератора событий PYTHIA.
- Показана связь между разнообразными характеристиками множественного рождения частиц в pp столкновениях: в частности, между характеристиками рождения адронов с малыми p_T и жесткими процессами, а также прицельным параметром. Множественности ($N_{ch}/\langle N_{ch} \rangle \gtrsim 3$) лежат за пределами геометрической модели и указывают на наличие взаимодействий протонов в конфигурациях, где

глюонная плотность существенно выше средней. Обнаружено явление универсальной связи между множественностью адронов с малыми p_T и множественностью жестких процессов: относительный выход R , полученный для струй с разными порогами по p_T , находится в хорошем согласии с аналогичными измерениями для J/ψ , D-мезонов.

- Измерены характеристики азимутальной анизотропии, в частности эллиптического потока заряженных частиц, в PbPb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Измерения проведены в широком кинематическом интервале, $0,3 < p_T < 20$ ГэВ/ c , $|\eta| < 2,4$, и в 12 классах центральности от 0 до 80%, и выполнены четырьмя различными методами, имеющими различную чувствительность к флуктуациям начального состояния и непотоковым корреляциям. Наблюдается логарифмический рост интегрального значения v_2 с ростом энергии столкновения для близких систем.

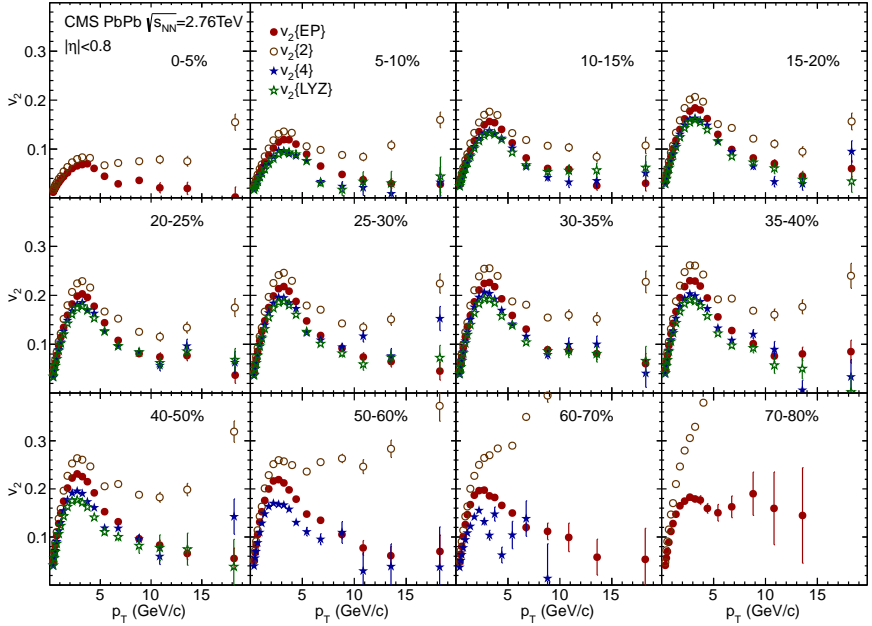


Рис. 7: Сравнение четырех различных методов измерения $v_2(p_T)$ для заряженных частиц в интервале $|\eta| < 0,8$ в 12 классах центральности, обозначенных на рисунке.

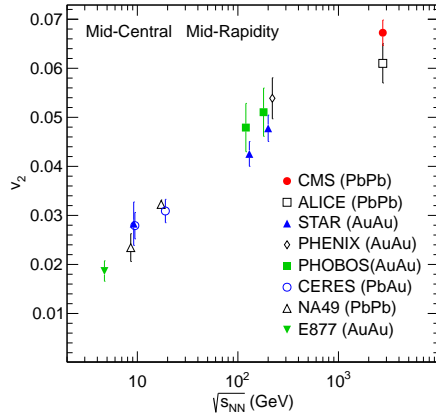


Рис. 8: Интегральное v_2 в событиях с центральностью 20–30%, полученное в разных экспериментах и при разных $\sqrt{s_{NN}}$: ALICE [30], STAR [31], PHENIX [32], PHOBOS [33–35], NA49 [36], E877 [37], и CERES [38]. Погрешности измерений CMS и ALICE являются квадратичной суммой статистических и систематических ошибок. Для остальных экспериментов приведены только статистические погрешности.

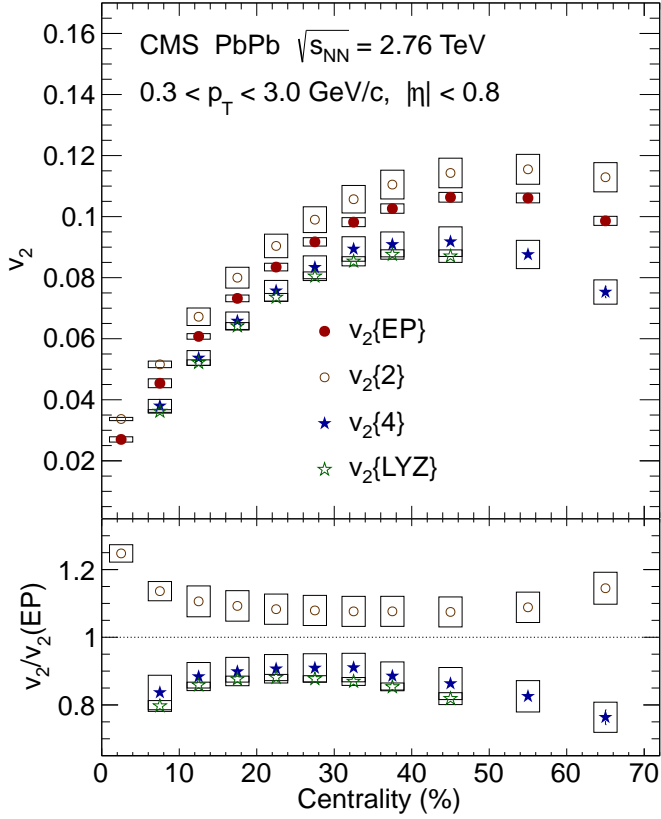


Рис. 9: Верхняя часть рисунка: интегральное значение v_2 как функция центральности для частиц, лежащих в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 0,8$. Нижняя часть рисунка: значения трех методов, поделенные на значения, полученные методом плоскости события.

3 Список публикаций автора по теме диссертации

- {A1} M. Yu. Azarkin, I. M. Dremin and A. V. Leonidov, “Soft ridge in proton-proton collisions” // *Mod. Phys. Lett. A* **26** (2011) 963
- {A2} M. Yu. Azarkin and CMS Collaboration, “Jet and underlying event properties as a function of charged-particle multiplicity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV” // *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2674
- {A3} M. Yu. Azarkin and CMS Collaboration, “Measurement of the elliptic anisotropy of charged particles produced in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV” // *Phys. Rev.C* **87** (2013) 1, 014902
- {A4} M. Yu. Azarkin, I. M. Dremin and M. Strikman, “Jets in multiparticle production in and beyond geometry of proton-proton collisions at the LHC” // *Phys. Lett. B* **735** (2014) 244

Список литературы

- [1] Yu. L. Dokshitzer, V. A. Khoze, A. H. Mueller, and S. I. Troyan, “Basics of Perturbative QCD”. Editions Frontières, 1991.
- [2] CMS Collaboration, “The CMS experiment at the CERN LHC”, *JINST* **3** (2008) S08004.
- [3] L. Evans and P. Bryant, “LHC Machine”, *JINST* **3** (2008) S08001.
- [4] J. I. Kapusta, “Quantum chromodynamics at high temperature”, *Phys. Lett. B* **148** (1979) 461.
- [5] E. V. Shuryak, “Quark-gluon plasma and hadronic production of leptons, photons and pions”, *Phys. Lett. B* **78** (1978) 150–153.
- [6] J. Harris, “Results from the STAR Experiment”, in *Proc.Quark Matter 2001*. New York, USA, 2001.
- [7] W. Zajc, “Results from the PHENIX Experiment”, in *Proc.Quark Matter 2001*. New York, USA, 2001.

- [8] C. Roland, “First Results from the PHOBOS Experiment at RHIC”, in *Proc. Quark Matter 2001*. New York, USA, 2001. [arXiv:0105043](#).
- [9] J.-Y. Ollitrault, “Anisotropy as a signature of transverse collective flow”, *Phys. Rev. D* **46** (1992) 229.
- [10] A. M. Poskanzer and S. A. Voloshin, “Methods for analyzing anisotropic flow in relativistic nuclear collisions”, *Phys. Rev. C* **58** (1998) 1671.
- [11] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, “The anti- k_T jet clustering algorithm”, *JHEP* **04** (2008) 063.
- [12] T. Sjöstrand, S. Mrenna, and P. Skands, “PYTHIA 6.4 physics and manual”, *JHEP* **05** (2006) 026.
- [13] R. Corke and T. Sjöstrand, “Interleaved parton showers and tuning prospects”, *JHEP* **03** (2011) 032.
- [14] S. Gieseke et al., “Herwig++ 2.5 Release Note”, (2011). [arXiv:1102.1672](#).
- [15] ALICE Collaboration, “Transverse sphericity of primary charged particles in minimum bias proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV”, *Eur. Phys. J. C* **72** (2012) 2124.
- [16] CMS Collaboration Collaboration, “Observation of Long-Range Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC”, *JHEP* **09** (2010) 091.
- [17] T. Sjöstrand, “Colour reconnection and its effects on precise measurements at the LHC”, in *Proceedings, 48th Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions*, pp. 247–251. 2013. [arXiv:1310.8073](#).
- [18] PHOBOS Collaboration, “Cluster Properties from Two-Particle Angular Correlations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV and 410 GeV”, *Phys. Rev. C* **75** (2007) 054913.

- [19] I.M. Dremin, V.A. Nechitailo, “Proton periphery activated by multiparticle dynamics”, *Nucl. Phys. A* **916** (2013) 241–248.
- [20] И. М. Дремин, “Область взаимодействия протонов высоких энергий”, *УФН* **185** (2015) 65.
- [21] CMS Collaboration, “Charged particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.36$ and 7 TeV”, *JHEP* **01** (2011) 079.
- [22] M. Yu. Azarkin, I.M. Dremin, and M. Strikman, “Jets in multiparticle production in and beyond geometry of proton-proton collisions at the LHC”, *Phys. Lett. B* **735** (2014) 244–249, [arXiv:1401.1973](https://arxiv.org/abs/1401.1973).
- [23] CMS Collaboration, “Jet and underlying event properties as a function of charged-particle multiplicity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013), no. 12, 2674.
- [24] N. Borghini, P. M. Dinh, and J.-Y. Ollitrault, “Flow analysis from multiparticle azimuthal correlations”, *Phys. Rev. C* **64** (2001) 054901.
- [25] R. S. Bhalerao, N. Borghini, and J.-Y. Ollitrault, “Analysis of anisotropic flow with Lee-Yang zeroes”, *Nucl. Phys. A* **727** (2003) 373.
- [26] J.-Y. Ollitrault, A. M. Poskanzer, and S. A. Voloshin, “Effect of flow fluctuations and nonflow on elliptic flow methods”, *Phys. Rev. C* **80** (2009) 014904.
- [27] R. S. Bhalerao and J.-Y. Ollitrault, “Eccentricity fluctuations and elliptic flow at RHIC”, *Phys. Lett. B* **641** (2006) 260.
- [28] PHOBOS Collaboration, “Importance of correlations and fluctuations on the initial source eccentricity in high-energy nucleus-nucleus collisions”, *Phys. Rev. C* **77** (2008) 014906.
- [29] Z. Qiu and U. W. Heinz, “Event-by-event shape and flow fluctuations of relativistic heavy-ion collision fireballs”, *Phys. Rev. C* **84** (2011) 024911.
- [30] ALICE Collaboration, “Elliptic Flow of Charged Particles in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 252302.

- [31] STAR Collaboration, “Identified particle production, azimuthal anisotropy, and interferometry measurements in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV”, *Phys. Rev. C* **81** (2010) 024911.
- [32] PHENIX Collaboration, “Scaling Properties of Azimuthal Anisotropy in Au+Au and Cu+Cu Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 162301.
- [33] PHOBOS Collaboration, “Centrality and pseudorapidity dependence of elliptic flow for charged hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, *Phys. Rev. C* **72** (2005) 051901.
- [34] PHOBOS Collaboration, “Pseudorapidity and Centrality Dependence of the Collective Flow of Charged Particles in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 222301.
- [35] PHOBOS Collaboration, “System Size, Energy, Pseudorapidity, and Centrality Dependence of Elliptic Flow”, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 242302.
- [36] PHOBOS Collaboration, “Directed and elliptic flow of charged pions and protons in Pb+Pb collisions at 40A and 158A GeV”, *Phys. Rev. C* **68** (2003) 034903.
- [37] E877 Collaboration, “Energy and charged particle flow in 10.8A GeV/c Au+Au collisions”, *Phys. Rev. C* **55** (1997) 1420.
- [38] CERES Collaboration, “New results from CERES”, *Nucl. Phys. A* **698** (2002) 253.