

На правах рукописи

Дрожжова Татьяна Александровна

**Исследование флуктуаций числа  
нуклонов-участников и отбор событий  
по центральности в экспериментах по  
столкновениям ультрарелятивистских ядер**

Специальность

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель: Феофилов Григорий Александрович,  
кандидат физико-математических наук,  
заведующий лабораторией физики сверхвысоких энергий СПбГУ

Официальные оппоненты: Арефьева Ирина Ярославна,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Математический институт им. В.А. Стеклова РАН,  
отдел теоретической физики, ведущий научный сотрудник.

Ратников Федор Дмитриевич,  
кандидат физико-математических наук,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»,  
Научно-учебная лаборатория методов анализа  
больших данных, старший научный сотрудник.

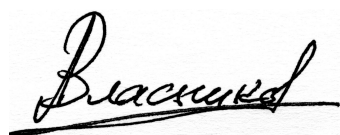
Ведущая организация: Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова

Защита состоится « 28 » июня 2018 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.16 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199004, Санкт-Петербург, Средний проспект В. О., д. 41/43, Институт наук о Земле, ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте СПбГУ  
<http://disser.spbu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.232.16



Власников Александр Константинович

## Актуальность темы

Современная теория сильных взаимодействий – квантовая хромодинамика, предсказывает существование особого состояния материи, в состоянии асимптотической свободы (деконфайнмента), так называемой кварк-глюонной плазмы (КГП). Изучение свойств кварк-глюонной плазмы чрезвычайно важно, поскольку оно тесно связано с решением ряда фундаментальных проблем, например таких, как эволюция Вселенной во времена порядка  $10^{-11}$  с после момента Большого взрыва и барионная асимметрия Вселенной. В настоящее время проводится целый ряд экспериментов по ультрарелятивистским ядро-ядерным столкновениям, в которых должны воспроизводиться условия возникновения КГП. Прежде всего, это эксперимент ALICE на Большом адронном коллайдере (LHC, БАК) в Европейском центре ядерных исследований (CERN), где в 2015 году достигнута энергия столкновения в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ для протон-протонных столкновений и  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ на нуклон-нуклонную пару для тяжело-ионных столкновений [1]. Также продолжают работать эксперимент на неподвижной мишени NA61/SHINE на ускорителе SPS в CERN и тяжело-ионный коллайдер RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории, где исследуются различные области на фазовой диаграмме барионной материи в состоянии деконфайнмента. Для подобных целей, в том числе, строится коллайдер протонов и тяжелых ионов NICA в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна).

Ключевую роль при изучении свойств КГП играет анализ экспериментальных данных. Его результаты зависят не только от контролируемых параметров — энергии, типа и размера сталкивающихся участников (ядер или протонов), но и от параметров, случайно меняющихся от события к событию. Один из таких параметров – это центральность столкновения. Он определяет размер области перекрытия сталкивающихся ядер, что, несомненно, влияет на свойства образованной материи. Столкновение считается тем более центральным, чем меньшее значение имеет прицельный параметр. Измерение прицельного параметра на эксперименте невозможно, поэтому центральность столкновений на эксперименте определяется косвенно. Чем центральнее столкновение, тем больше число нуклонов-участников. В большинстве экспериментальных исследований для отбора событий в качестве наблюдаемой величины, косвенно связанной с центральностью столкновения, используется множественность рождающихся частиц. Однако, сильные флуктуации данной величины, возникающие от события к событию в силу определенных физических причин, препятствуют достаточно точному определению числа нуклонов-участников столкновения в каждом событии, что критично в экспериментах направленных на поиск эффектов, связанных с флуктуациями наблюдаемых величин.

Измерение флуктуаций и корреляций таких величин, как множественность рождающихся частиц, средний поперечный импульс, остаточный электрический и барионный заряд и др., позволяет изучать область фазовой диаграммы КХД вблизи фазового перехода от адронного газа к состоянию деконфайнмента, а также кирального фазового перехода. Для корректной интерпретации данных по флуктуациям и корреляциям в таких исследованиях необходимо минимизировать так называемые “тривиальные” или “объемные” флуктуации, связанные с событийным отбором класса столкновений, где присутствует разброс событий по прицельному параметру и/или числу нуклонов-участников, что будет являться нежелательным фоном для исследуемых флуктуаций.

### Предпосылки к данной работе

В первой части данной работы описывается метод измерения множественности заряженных частиц, и представляются новые результаты, полученные на эксперименте ALICE при новой энергии ( $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ), достигнутой на коллайдере в ноябре 2015 года. Одним из первых результатов 2010 года на БАК с энергией на нуклон-нуклонную пару в системе центра масс ( $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ) для столкновений ядер свинца, стало измерение множественности заряженных частиц в среднем интервале по псевдобыстроте ( $|\eta| < 0.5$ ). Псевдобыстротой называется величина

$$\eta = -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right] = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{|\vec{p}| + p_z}{|\vec{p}| - p_z} \right),$$

где  $\theta$  – это угол между направлением импульса частицы  $\vec{p}$  и осью пучка  $z$ , а  $p_z$  – это продольная компонента импульса.

Эти результаты дополнили уже известную картину зависимости плотности рожденных заряженных частиц от энергии, полученную прежде на нескольких экспериментах (ALICE, CMS, ATLAS, PHOBOS, PHENIX, BRAHMS, STAR, NA50, UA5, ISR) и показали, что зависимость плотности множественности рожденных заряженных частиц на пару участников для ядро-ядерных столкновений имеет более быстрый рост с увеличением энергии, чем для нуклон-нуклонных.

Кроме того, была измерена множественность заряженных частиц в средней псевдобыстроте как функция центральности и представлена на графике в виде, позволяющем сравнить поведение различных сталкивающихся систем. Множественность была нормирована на среднее число пар нуклонов-участников, вычисленных с использованием модели Глаубера. В качестве параметра центральности, для каждого класса использовалось среднее число участников. Аппроксимация полученной зависимости дала возможность установить связь между периферическими столкновениями ядер и нуклон-нуклонными столкновениями. При сравнении данных эксперимента ALICE по множественности как функции числа

участников с аналогичной функцией, вычисленной в различных феноменологических моделях, было выявлено хорошее согласование моделей и экспериментальных данных для столкновений при  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ. Однако имелись некоторые расхождения между предсказаниями разных моделей с экспериментом, что наложило дополнительные условия на параметры моделей.

Для изучения флуктуаций и поиска тонких эффектов необходимо точно определить параметры измерений, при которых флуктуации измеряемых величин будут минимальны. Задача важна для понимания и анализа эффекта начального состояния при изучении дальних корреляций, осуществляемого в настоящий момент в Лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ для двух экспериментов - NA61/SHINE и ALICE, проводимых в Европейском центре ядерных исследований (CERN). Это явилось мотивацией к разработке метода минимизации фоновых флуктуаций, рассмотренного во второй части данной диссертации.

## Цели и задачи работы

**Основной целью** работы является изучение флуктуаций измеряемых величин (множественность, число нуклонов-участников) и определение центральности событий с дальнейшей их классификацией в экспериментах по столкновению ультрарелятивистских ядер.

Основные **задачи** диссертации:

1. Создание генератора событий Монте-Карло на основе модели Глаубера. Реализация подсчета множественности рожденных заряженных частиц в созданном генераторе событий на основе двухкомпонентной модели. Реализация моделирования столкновений тяжелых и легких ядер в генераторе событий Монте-Карло с учетом особенностей распределения ядерной плотности (применение распределения Вудса-Саксона для тяжелых и формулы гармонического осциллятора для легких ядер).
2. Реализация моделирования столкновений протон-ядро при энергии 5.02 ТэВ с помощью генератора событий HIJING, учитывающим некоторые коллективные эффекты в ядро-ядерных столкновениях. При сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными, провести исследование зависимости выхода множественности рожденных частиц от величины параметра HIJING – так называемого gluon shadowing (глюонного экранирования), который контролирует в модели общую величину глюонного экранирования при малых значениях Бьеркеновской переменной  $x$  и связан с распределением плотности глюонов в тяжелом ядре.
3. Разработка метода минимизации фоновых флуктуаций измеряемых величин. Исследование поведения среднего числа участников и их среднеквад-

ратичного отклонения с изменением ширины класса центральности для центральных, полупериферических и периферических столкновений для ядро-ядерных (для легких и тяжелых ядер) и протон-ядерных столкновений при энергии SPS и LHC.

4. Определение центральности столкновения для феноменологических и экспериментальных данных. Проверка метода минимизации фоновых флуктуаций измеряемых величин на моделированных данных, с влиянием установки ALICE на результаты анализа, реализованного с помощью программы моделирования установки GEANT. В качестве входных данных рассматриваются феноменологические данные, полученные коллаборацией при использовании генератора событий HIJING для столкновения ядер свинца при энергии 2.76 ТэВ.
5. Реализация подсчета множественности рожденных заряженных частиц в различных быстройных окнах на эксперименте ALICE для независимого определения центральности в случаях, когда измеряемая величина, анализируемая в классах центральности, построена из сигналов VZERO, принятого коллаборацией для определения центральности по множественности.
6. Рассмотреть возможность введения новых эстиматоров (в частности сигнала дифракционного детектора AD) для определения центральности на эксперименте ALICE. Отладка подсчета множественности рожденных частиц на простом примере протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ.
7. Калибровка центральности на эксперименте ALICE, необходимая для равномерного распределения множественности в процентные значения по центральности, поэтому важна разработка и модернизация универсального программного кода (для протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений) для определения множественности и калибровки центральности на эксперименте ALICE.
8. Калибровка центральности для новых данных, получаемых коллаборацией ALICE, для столкновения ядер свинца при энергии 5.02 ТэВ. Применение подсчета множественности и отбора по центральности столкновений на примере расчета плотности множественности заряженных частиц в интервале средней скорости при отборе самых центральных столкновений, а также определение зависимости плотности множественности от числа-нуклонов участников.

**Актуальность темы исследования** определяется ее тесной связью с современными действующими экспериментами по релятивистским столкновениям ядер: ALICE и NA61/SHINE, а также ее возможной ориентацией на физическую программу эксперимента MPD на коллайдере NICA в ОИЯИ (Дубна), который

планируется осуществить в ближайшее время. Метод, разработанный в данной диссертации, является универсальным. Его применение позволит минимизировать фоновые флуктуации выбором оптимальной ширины классов центральности, что является критически важным при анализе флуктуаций и поиске тонких эффектов. Инструментарий, использованный для калибровки центральности в эксперименте ALICE, представленный в настоящей работе, применим для протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений, в отличие от того, что использовался коллаборацией ранее.

## Научная новизна и практическая ценность

Разработка нового метода определения центральности началась в связи с анализом дальних корреляций, который проводится сотрудниками Лаборатории физики сверхвысоких энергий СПбГУ. Для этого анализа критичным становится уменьшение фоновых флуктуаций измеряемых величин. Метод, представленный в настоящей диссертации, делает возможным определение предельной значимой степени минимизации фоновых (или объемных) флуктуаций. Он позволяет вести оценку флуктуаций нуклонов-участников в классах центральности для разных сортов ядер при различных энергиях на примере энергий LHC (Большого адронного коллайдера) и SPS (Супер-протонного синхротрона). Данный метод позволяет оценить, до какой степени возможна минимизация фоновых флуктуаций измеряемых величин, а также определить значение ширины класса центральности, после которого более детальное рассмотрение событий, при сужении класса центральности не ведет за собой улучшение разрешения измерений (дальнейшего уменьшения фоновых флуктуаций измеряемых величин).

Калибровка и определение центральности столкновения была реализована для эксперимента ALICE. Автор принимал активное участие в разработке программы для осуществления калибровки центральности столкновений, которые в дальнейшем были внедрены в библиотеки AliROOT, и теперь широко используются членами коллаборации для анализа данных.

Автор не только модернизировал и оптимизировал используемые программы, но также реализовал возможность измерения множественности и центральности на дифракционном детекторе AD эксперимента ALICE, который был введен в эксплуатацию во второй половине периода сбора данных RUN-II. Этот детектор позволил расширить диапазон по быстройте ( $4.8 < \eta < 6.3$ ,  $-7.0 < \eta < -4.9$  и улучшил способность определения дифракционных событий в протон-протонных и ионных столкновениях за счет добавления счетчиков частиц для малых углов вылета частиц вблизи оси пучка в псевдобыстротном диапазоне. В отличие от детектора VZERO, который подвержен радиационной деградации, детектор AD

является более стабильным. Средняя множественность рожденных частиц, которую может измерить детектор VZERO, падает со временем в одном периоде набора данных, а показатели AD не меняются.

Корреляции множественности в разных диапазонах по псевдобыстроте с использованием детектора VZERO, AD и SPD были обнаружены уже на протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ, на которых производилась настройка анализа. Это дает возможность использовать детектор AD для подсчета центральности столкновений в быстротном диапазоне  $4.8 < \eta < 6.3$ ,  $-7.0 < \eta < -4.9$  при столкновениях ядер.

Измерения множественности заряженных частиц в диапазоне средних псевдобыстрот ( $|\eta| < 0.5$ ) являются первыми исследованиями в столкновениях тяжелых ядер при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ на нуклон-нуклонную пару в системе центра масс.

Для 5% центральных событий при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ было проведено сравнение с данными, полученными ранее для энергии  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ для систем нуклон-нуклон, нуклон-ядро, ядро-ядро. Использование среднего числа пар нуклонов-участников, вычисленного из модели Глаубера, позволило провести сравнение измеренной множественности между этими различными сталкивающимися системами.

Результаты калибровки центральности для столкновений ядер свинца при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ были добавлены в библиотеку AliROOT, что позволяет использовать их участникам эксперимента ALICE для различного рода анализа данных с отбором событий по центральности. Разработанные с участием автора программы для подсчета множественности (AliMultSelection) и калибровки центральности (AliMultSelectionCalibrator) являются универсальными, как для протон-ядерных, так и для ядро-ядерных столкновений. Они были добавлены в библиотеку AliPhysics в AliROOT и будут использоваться для калибровки центральности будущих наборов данных на эксперименте ALICE.

**Апробация работы.** Представленные в работе результаты докладывались на совещаниях коллабораций ALICE и NA61/SHINE, на научных семинарах Лаборатории физики высоких энергий СПбГУ, кафедры физики высоких энергий СПбГУ и кафедры ядерно-физических методов исследования СПбГУ. Кроме того, все изложенные в настоящей диссертации результаты были представлены автором на следующих конференциях и научных школах:

1. Ettore Majorana International School of Subnuclear Physics, Erice, 06/2016,
2. Tatiana Drozhzhova, Alberica Toia DPG (Deutsche Physikalische Gesellschaft), 03/2016, Дармштадт, Германия,



3. Tatiana Drozhzhova, Grigory Feofilov, Vladimir Kovalenko, Andrey Seryakov, Санкт-Петербург, *LXV* International Conference “Nucleus 2015”
4. Quark Confinement and the Hadron Spectrum XI , СПб, 09/2014
5. The XXI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics”, Дубна, 09/2014,
6. The Second Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics, Индия, 10/2014,
7. Ettore Majorana International School of Subnuclear Physics, Erice, 2014,
8. доклад на коллаборационном совещании NA61/NA49, Дубна 2014,
9. 2nd Russian-Spanish Congress Particle and Nuclear Physics at all Scales and Cosmology 2013, СПб
10. MCnet School 2012, ЦЕРН, Швейцария,
11. Ettore Majorana Erice School 2012, Сицилия,
12. CERN, Summer student report at 2011 workshop of NA61/SHINE collaboration,
13. International Student Conference “Science and progress”, DAAD, СПб 2010.

**Личный вклад автора** В период подготовки диссертации ее автор являлся непосредственным участником: 1) эксперимента NA61/SHINE по столкновению ионов на фиксированной мишени (на ускорителе SPS), 2) эксперимента ALICE (на LHC) в ЦЕРН и принимал участие в сеансах сбора данных, калибровке, контроле качества и анализе данных в этих экспериментах.

Вклад автора диссертации в калибровку данных по центральности, полученных в эксперименте ALICE при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ с конца 2015 года до начала 2016 года, а также в разработку и отладку программ для калибровки и определения центральности в этом эксперименте, оказался решающим. В частности, автором обеспечена возможность использования нового детектора AD для подсчета множественности в дальних быструтных окнах и определения центральности. Результаты проведенной работы по калибровке центральности используются во всех измерениях ALICE, где необходима классификация событий по центральности столкновения.

Постановка задачи о разработке способа отбора классов центральности с целью уменьшения флуктуаций для измерения плотности начального состояния была предложена Лабораторией физики сверхвысоких энергий СПбГУ. Автор лично занимался этой задачей. Разработка и реализация данного метода, все вычисления выполнены автором самостоятельно.

## Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем составляет 109 страниц, включая 4 таблицы, 47 рисунков и список цитированной литературы из 72 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются основные задачи, научная новизна и практическая ценность работы, приводится краткое содержание отдельных частей.

В первой главе вводится определение основных понятий, которые используются при описании столкновений релятивистских ядер: нуклонов-участников, нуклонов-спектаторов, центральности, прицельного параметра и их связь с экспериментальными данными (§1.1). Приводится обоснование целесообразности сравнения экспериментальных и модельных данных. Представлен обзор модели Глаубера. Рассматривается геометрическое представление столкновений для нуклон-нуклонных, нуклон-ядерных и ядро-ядерных столкновений.

*Прицельный параметр* – вектор  $\vec{b}$ , ортогональный направлению пучка, связывающий центры двух сталкивающихся ядер в проекции на поперечную плоскость. Его направление показывает ориентацию плоскости реакции, а длина характеризует *центральность* столкновения: чем меньше его значение, тем столкновение считается *более центральным*, при большем значении столкновения приобретают *периферический характер*. Нуклоны ядра мишени, которые претерпели столкновения с нуклонами из налетающего ядра, будем называть *нуклонами-участниками*, и “*ранеными*” нуклонами. Те, которые не участвовали во взаимодействии, будем называть *нуклонами-спектаторами*. Экспериментально измеряемые величины, косвенно характеризующие центральность – это множественность рожденных частиц, измеряемая детекторами с аксептансом в среднем интервале псевдобыстроты, и энергия спектаторов, обычно измеряемая калориметрами на больших (по модулю) псевдобыстротах. Множественность рожденных частиц может быть вычислена и в моделях, что дает возможность проводить сравнение экспериментально измеренных величин и аналогичных распределений, вычисленных в моделях.

Под относительными *флуктуациями* переменной  $x$  (§1.2) будем понимать величину

$$\omega_x = \frac{\sigma_x^2}{\langle x \rangle} = \frac{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}{\langle x \rangle}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x^2$  – среднеквадратичное отклонение (RMS),  $\sigma_x^2$  – дисперсия величины  $x$ ,  $\langle x \rangle$  – среднее значение величины.

*Модель Глаубера* (§1.3) рассматривает ядро-ядерные столкновения как процесс множественных независимых нуклон-нуклонных столкновений. В модели Глаубера распределение нуклонов в ядрах имеет случайный характер, определяемый

профилем ядерной плотности, а элементарные нуклон-нуклонные столкновения характеризуются полным неупругим сечением рассеяния  $\sigma_{in}$ . Модель Глаубера применительно к pA и AA столкновениям позволяет вычислить среднее число и дисперсию бинарных нуклон-нуклонных столкновений и нуклонов-участников. Она дает наглядную геометрическую картину, но не предполагает наличие коллективных эффектов, в ней все сводится к отдельным независимым нуклон-нуклонным столкновениям. Также приведен краткий обзор моделей, учитывающих сохранение энергии в элементарных ядро-ядерных взаимодействиях с учетом подобных эффектов (модифицированная модель Глаубера [2], генератора HIJING и неглауберовской модели столкновений [3]).

**Во второй главе** описывается техническая сторона эксперимента ALICE.

В частности, представлено краткое описание детекторов ALICE (см. рис 1), используемых для измерения множественности заряженных частиц. Приводится описание детекторной системы ITS (§2.2.1), включая ее конструкцию и метод восстановления первичной вершины столкновения, описание процедуры восстановления треков рожденных частиц.

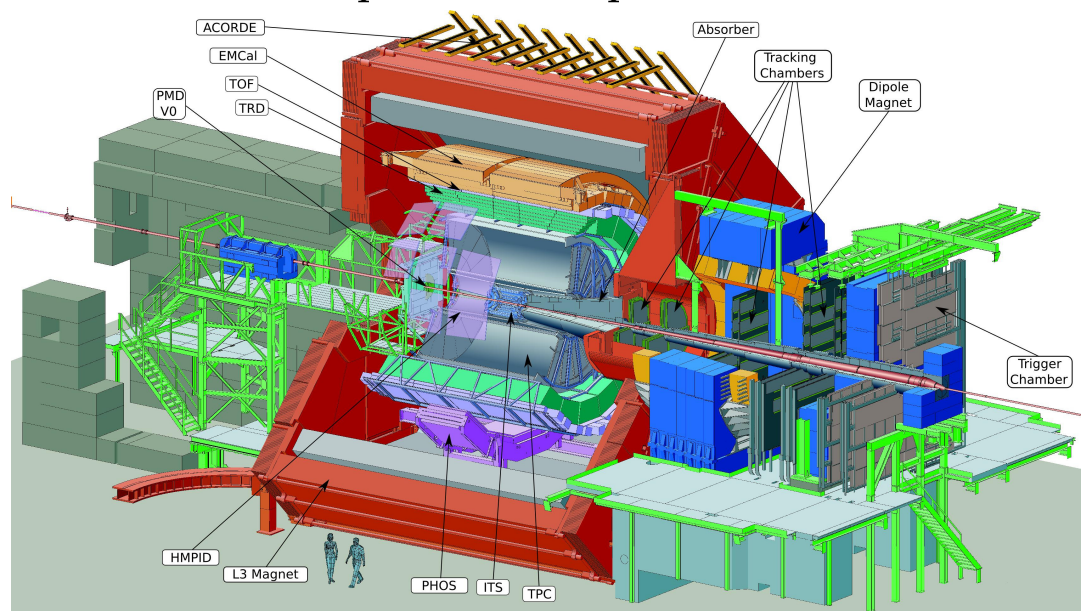


Рис. 1: Схематическое изображение детекторной системы эксперимента ALICE [4].

В (§2.2.2) для детекторной системы VZERO, располагающейся в переднем диапазоне по псевдобыстроте по обе стороны установки ALICE, приведено описание ее конструкции, а так же особенности триггеринга (отбора) событий при энергии 5.02 ТэВ с использованием данного детектора. В (§2.2.3) приведено описание дифракционного детектора AD, недавно установленного на эксперименте ALICE, расширившего псевдобыстротный диапазон эксперимента  $4.8 < \eta < 6.3$ ,  $-7.0 < \eta < -4.9$  для изучения множественности заряженных частиц, что способствует расширению возможности отбора событий по центральности как для изучения протон-ядерных, так и ядро-ядерных столкновений.

**Третья глава** посвящена определению центральности на эксперименте ALICE.

В (§3.1) описывается экспериментальная оценка центральности разными детекторными системами ALICE в разных кинематических областях: внутренним трековым детектор (ITS) и времяпроекционной камерой (TPC), детектором VZERO и калориметром нуля (ZDC), фиксирующим нуклоны-спектаторы (§3.1.1).

В (§3.1.2) описан метод определения центральности в эксперименте ALICE на примере сигнала детекторной системы VZERO. На (рис. 2) представлено minimum



bias распределение сигнала в VZERO. В области периферических событий с центральностью более 90% не учитывается из-за возрастающего там вклада от электромагнитных взаимодействий [5].

Полное сечение рассеяния определяют по фитирующей функции к распределению множественности заряженных частиц, построенному с помощью модели Глаубера (см рис. 2, красная линия). Множественность в модели Глаубера определена через двухкомпонентное представление с тремя параметрами, которые выбираются из условия минимальности  $\chi^2$  фита [5]. Полный интеграл от данной функции определяет полное число событий, по отношению к которому и выполняется разбиение на интервалы (классы) центральности. Точка, в которой фит и данные начинают расходиться, называется “якорной” точкой (anchor point) [A2].

В (§3.1.3) приведено сравнение разрешения различных детекторов для определения центральности столкновения в эксперименте ALICE. §3.1.4 описывает процедуру калибровки центральности. Рассмотрена возможность определения множественности и центральности с помощью нового детектора AD. Приведено сравнение корреляций амплитуд сигналов в разных диапазонах по псевдобыстроте в SPD и AD в сравнении с SPD и VZERO на примере протон-протонных столкновений при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, на котором производилась отладка процедуры подсчета множественности заряженных частиц в разных быструтных окнах. Описана техническая реализация процесса калибровки центральности. Готовые результаты, отражающие перевод значений измеренной множественности рожденных частиц в данном детекторе в процентное соотношение по центральности, записываются в доступный для дальнейшего анализа ROOT файл, который сохраняется после в библиотеку AliROOT и доступен для всех участников эксперимента ALICE для применения при анализе данных, требующего более детального отбора событий по центральности. Описана реализация контроля качества данных и оценки стабильности сигнала с течением времени.

**В четвертой главе** описана процедура измерения множественности заряженных частиц в среднебыструтном диапазоне ( $|\eta| < 0.5$ ) на эксперименте ALICE с использованием коротких сегментов треков – треклетов (§4.1). В §4.2 для энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ приведены основные результаты, полученные коллаборацией ALICE с использованием подсчета множественности и калибровки центральности,

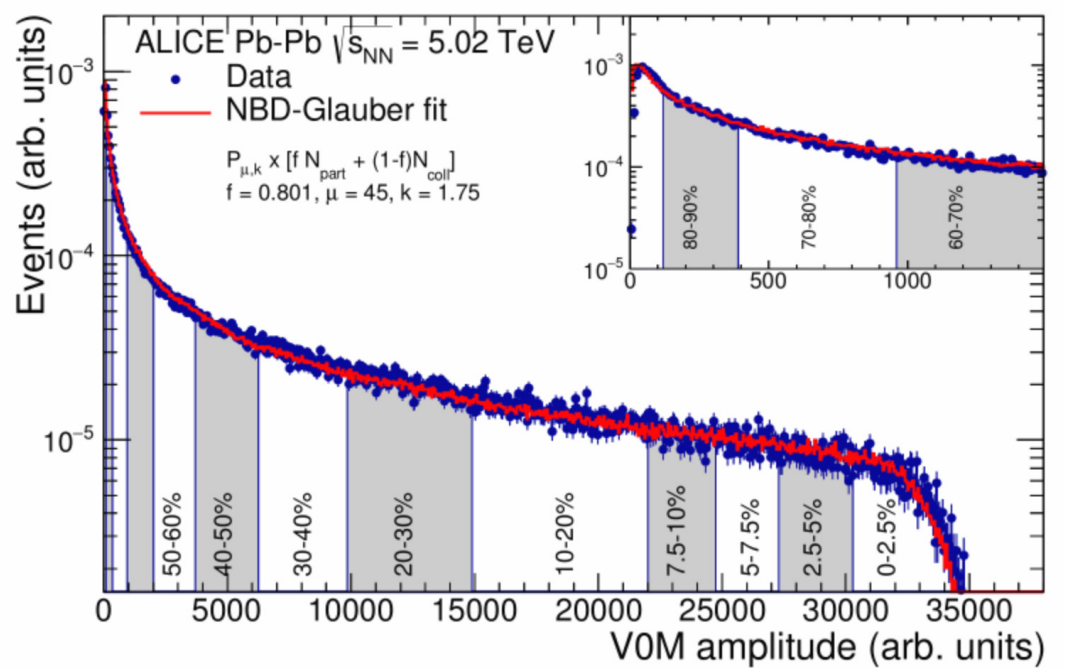


Рис. 2: Распределение амплитуды сигнала VZERO для столкновений ядер свинца при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ [5].

выполненных автором. В §4.2.1 для  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ приведено значение плотности множественности рожденных частиц. Для сравнения с ранее проведенными экспериментами результаты нормированы на среднее число пар нуклонов-участников (вычисленное в каждом классе центральности с помощью модели Глаубера). Значение для 5% центральных событий сравнивается (см рис. 3 (а)) как с результатами для более низких энергий столкновения тяжелых ядер, так и с результатами для более легких систем (pp, pA). Новые результаты – значения множественности рожденных частиц в центральных столкновениях, полученные коллаборацией ALICE при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ, не меняют характер зависимости, они вносят лишь небольшое уточнение в значение параметра  $b$  и подтверждают закономерность, обнаруженную для  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ. Тот факт, что значения найденные на ALICE для p+Pb [6] и PHOBOS для d+Au [7] ложатся на кривую соответствующую нуклон-нуклонным столкновениям, показывает, что сильное возрастание множественности для ядро-ядерных столкновений связано не только с множественными парными столкновениями нуклонов-участников, так как протон в нуклон-ядерных столкновениях также претерпевает столкновения с множеством нуклонов. В §4.2.2 проведено сравнение множественности заряженных частиц, измеренной для  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ в различных классах центральности как для ядро-ядерных, так и для нуклон-ядерных столкновений с результатами, полученными ранее коллаборацией ALICE при энергии ( $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ). Как видно из графика (см. рис 3 (б)) (и отношения множественности для двух представленных энергий), результаты отличаются на 20%, а форма зависимости с увеличением энергии не изменилась. Множественность монотонно убывает с переходом от более центральных (большое число нуклонов-участников) к более периферическим (малое число нуклонов-участников) столкновениям. Как видно из фитирования полученных данных для ядро-ядерных столкновений, при переходе к самым периферическим столкновениям наблюдается устремление множественности к значению, измеренному для столкновений нуклонов и ядер, что говорит о нивелировании когерентного характера взаимодействия нуклонов в ядре с уменьшением количества взаимодействующих нуклонов. В §4.2.3 проведено сравнение результатов с модельными расчетами (см рис. 3 (в)). Измеренная зависимость множественности заряженных частиц в интервале  $|\eta| < 0.5$  накладывает ограничения на модели, описывающих сильновзаимодействующую материю.

**В пятой главе** изложен метод выбора интервалов центральности, который дает возможность минимизации фоновых (объемных) флуктуаций наблюдаемых величин. В §5.1 описана связь эксперимента и модели Глаубера, приводится описание процедуры Монте-Карло моделирования модели Глаубера с двухкомпонентной моделью для определения множественности. В §5.2 указаны параметры генераторов и особенности описания плотности распределения нуклонов внутри ядра

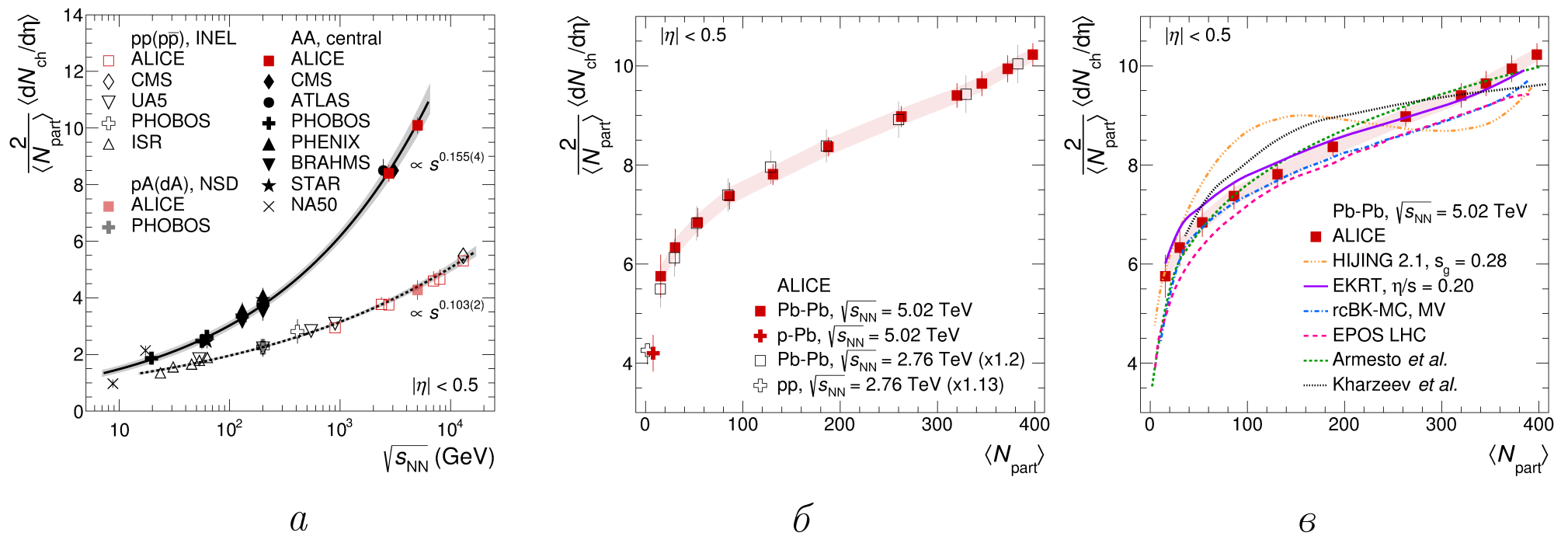


Рис. 3: *а*: Величина  $\frac{2}{\langle N_{part} \rangle} \langle dN_{ch}/d\eta \rangle$  для центральных Pb-Pb и Au-Au столкновений как функция  $\sqrt{s}$  в сравнении с pp и p-A (d-A) столкновений. Линии показывают степенную зависимость: сплошная – с показателем 0.155 для A-A столкновений, пунктирная – 0.103 для pp столкновений. Затененные области – ошибки на извлеченные степенные законы. Данные по центральным Pb-Pb столкновениям, измеренные в CMS и ATLAS на  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ, сдвинуты по горизонтали [A2]. *б*: Величина  $\frac{2}{\langle N_{part} \rangle} \langle dN_{ch}/d\eta \rangle$  для Pb-Pb столкновений при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ в диапазоне от 0 до 80% центральности как функция  $\langle N_{part} \rangle$  для каждого класса центральности. Для данных Pb-Pb нескореллированные ошибки обозначены “усами” (доверительным интервалом), а скореллированные ошибки представлены серой областью. Для сравнения с результатами по p-Pb ( $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ), Pb-Pb и pp столкновений ( $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ), умноженные на коэффициент 1.2 (1,13 соответственно), вычисленный из степенного закона  $s_{NN}^{0.155}$  для центральных столкновений [A2]. *в*: Величина  $\frac{2}{\langle N_{part} \rangle} \langle dN_{ch}/d\eta \rangle$  для Pb-Pb столкновений при  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ для 0-80% центральных столкновений как функция  $\langle N_{part} \rangle$  в каждом классе центральности [A2] в сравнении с модельными расчетами [8, 9].

(распределение Вудса-Саксона для тяжелых ядер, формула гармонического осциллятора для легких). В §5.3 для генератора событий HIJING рассмотрено влияние параметра глюонного экранирования на значение плотности множественности рожденных заряженных частиц в быстротном окне  $|\eta| < 2$ , а также на множественность и на число нуклонов-участников на примере протон-ядерного столкновения при энергии 5.02 ТэВ (см. рис 4).

В §5.4 приводится описание метода и его реализация на примере моделирования столкновений ионов свинца при энергии 2.76 ТэВ (см. рис 5). При моделировании по принципу Монте-Карло  $N_{part}$  известно точно. Это позволяет непосредственно произвести вычисления, необходимые для определения оптимальной ширины классов центральности.

Таким образом, для того, чтобы оптимально выбрать ширину классов центральности: – строится распределение числа событий по множественности, – множественности сопоставляется центральность, – события разбиваются на классы по центральности (см. рис 5 а),

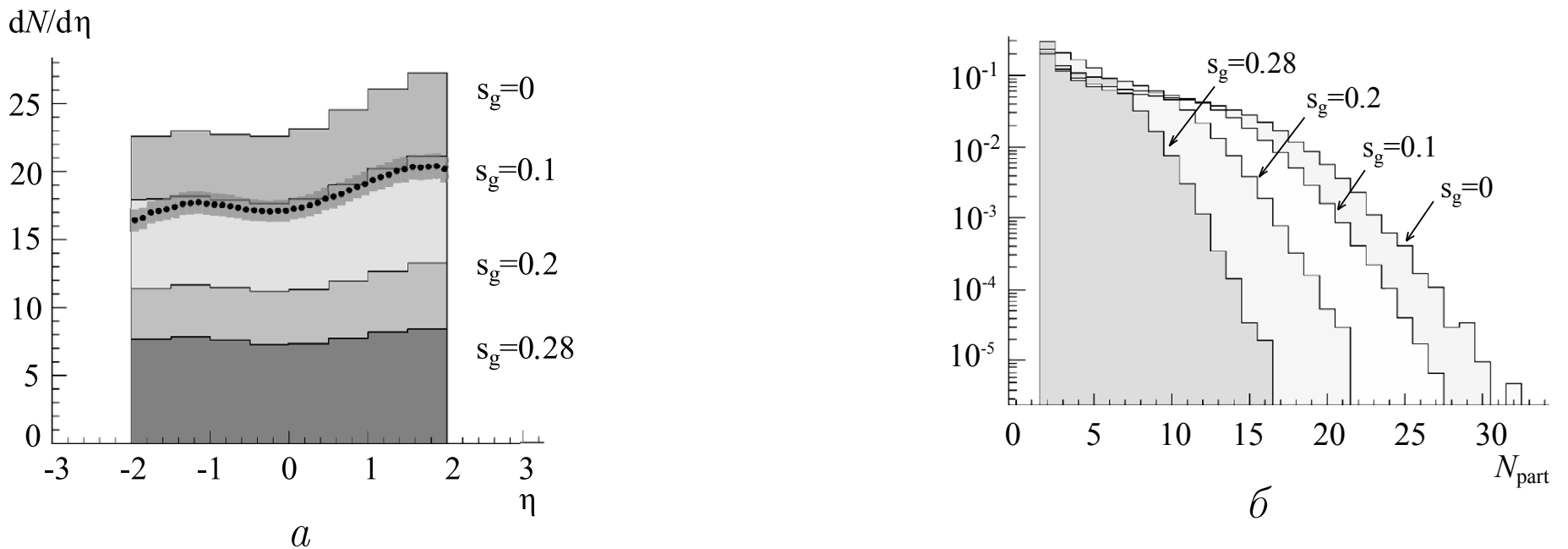


Рис. 4: p-Pb столкновения при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ. *а*: Линии – быстрое распределения заряженных частиц для p-Pb столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ рассчитанные в HIJING 1.38 [10] для разных значений параметра глюонного экранирования  $s_g$ ; точки - экспериментальные данные [6]) [A1, A5]. *б*: Результаты расчетов HIJING 1.38 [10], выполненные в данной работе для распределений по числу  $N_{part}$  для p-Pb столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ для разных значений параметра глюонного экранирования  $s_g$  [A1, A5].

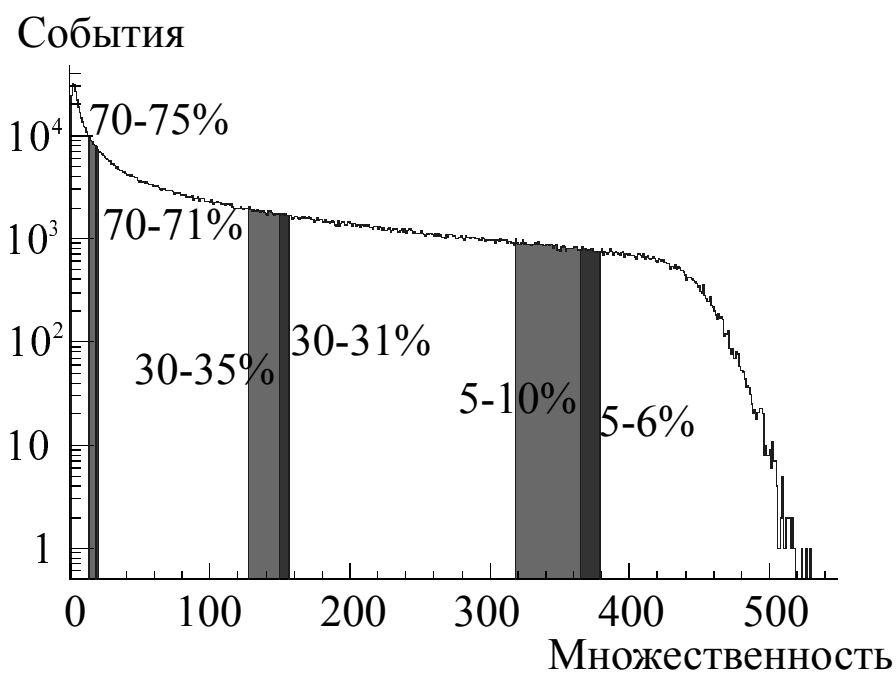
- строится зависимость дисперсии  $N_{part}$  в классе от его ширины (см. рис 5 б, в).
- оптимальная ширина находится из условия появления плато (см. рис 5 г).

В §5.5 показана реализация и применимость метода на примере моделирования ядро-ядерных, протон-протонных столкновений при энергии ЛНС (2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ соответственно), и столкновениях, как тяжелых (Pb), так и легких ионов (Be), при энергии SPS. Приведена реализация определения классов центральности по прицельному параметру и по множественности заряженных частиц. Показано влияние ширины класса центральности на среднее значение измеряемой величины, а также его среднеквадратичное отклонение. Разделение событий в столкновениях легких ядер на мелкие классы по множественности возможно, однако, пособытийно в таких классах число участников будет определено с большими разбросом (рис. 6). Рассмотрены результаты моделирования столкновений с помощью генератора событий на основе модели Глаубера для ядро-ядерных столкновений, генератора событий HIJING для столкновений протон-ядро, а также генератора событий HIJING с откликом установок детектора ALICE с помощью программы моделирования GEANT, что дает возможность ввести влияние установки на результаты анализа.

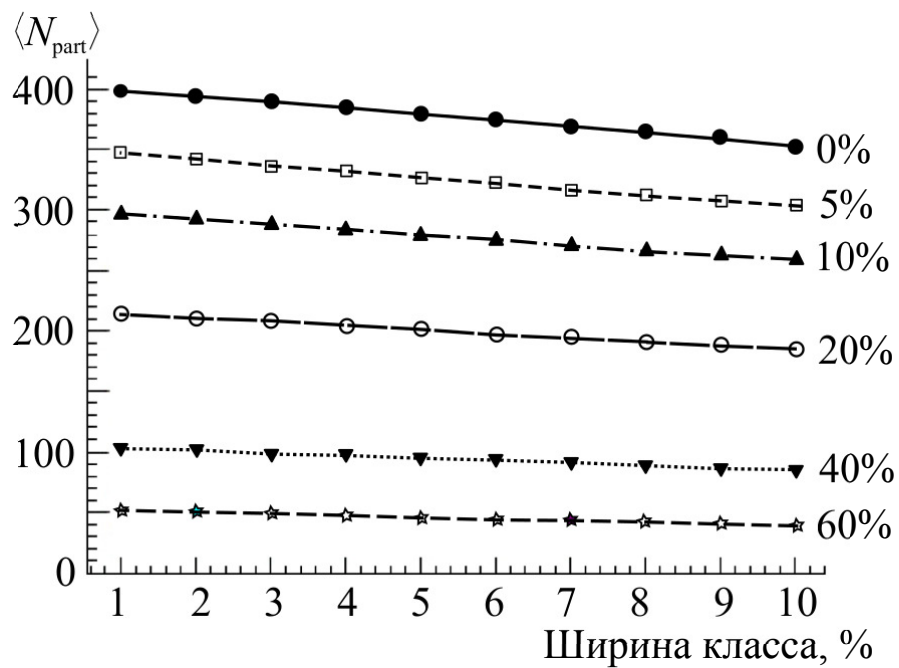
Представленный в работе метод позволяет подойти к вопросу о разбиении множества событий на классы центральности последовательно, используя среднеквадратичное отклонение числа участников для различной центральности в поиске точек выхода на плато, когда дальнейшее сужение интервала центральности не приводит более к уменьшению флуктуаций исследуемой величины (см рис. 5).

**В заключении** приведены основные результаты диссертации и рассмотрена их применимость для современных экспериментов.

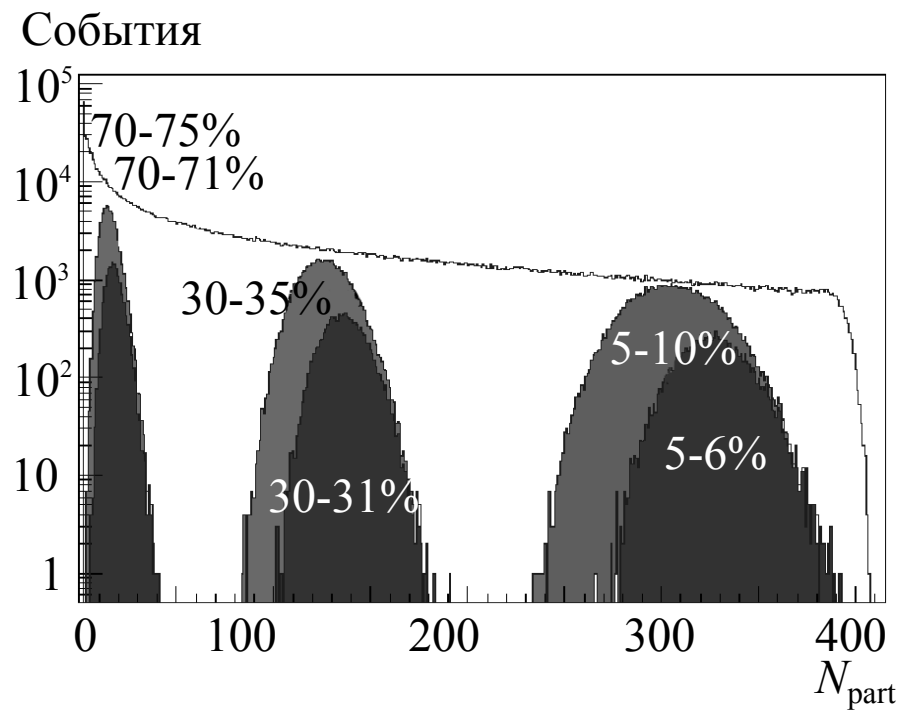




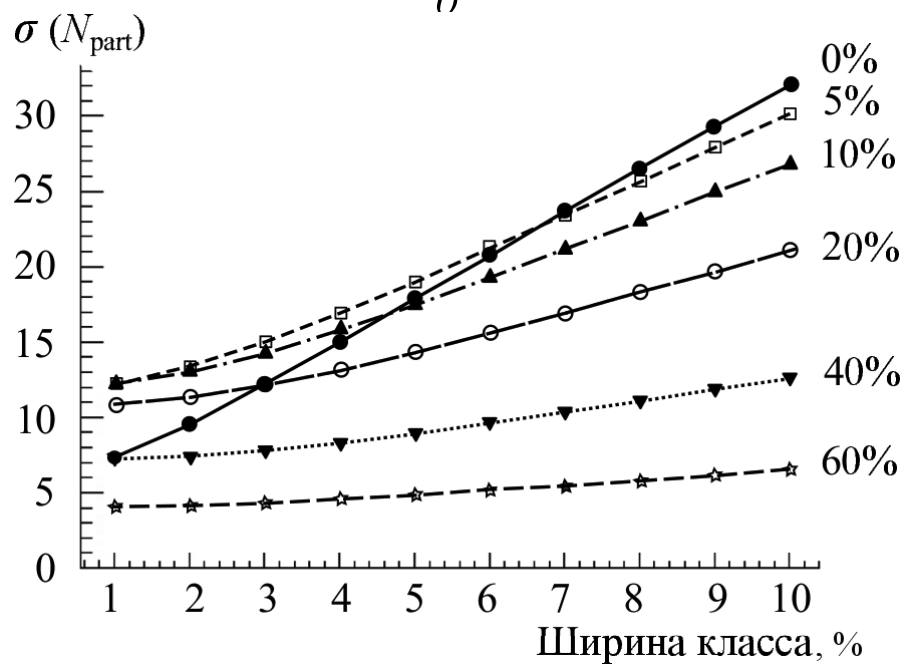
*a*



*б*



*в*

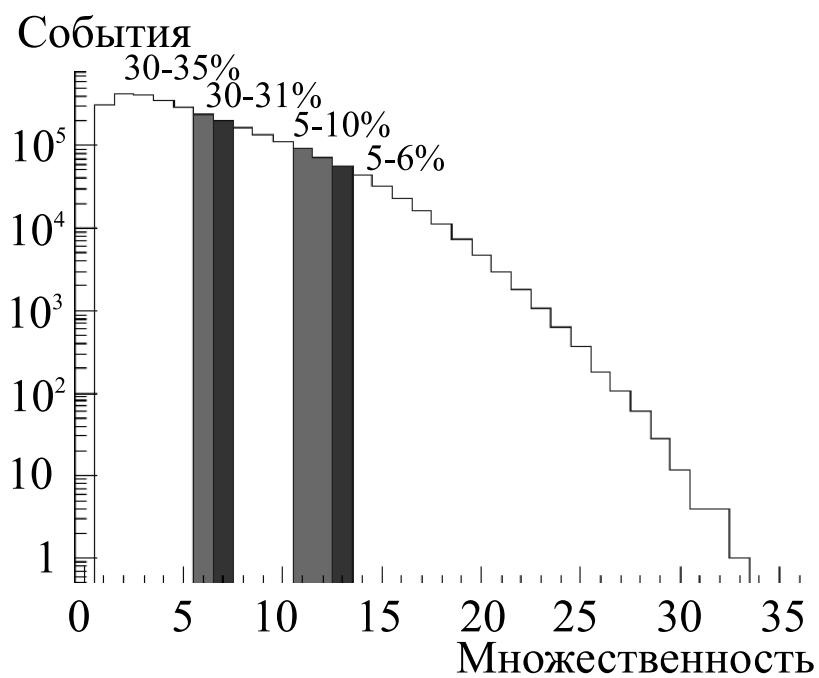


*г*

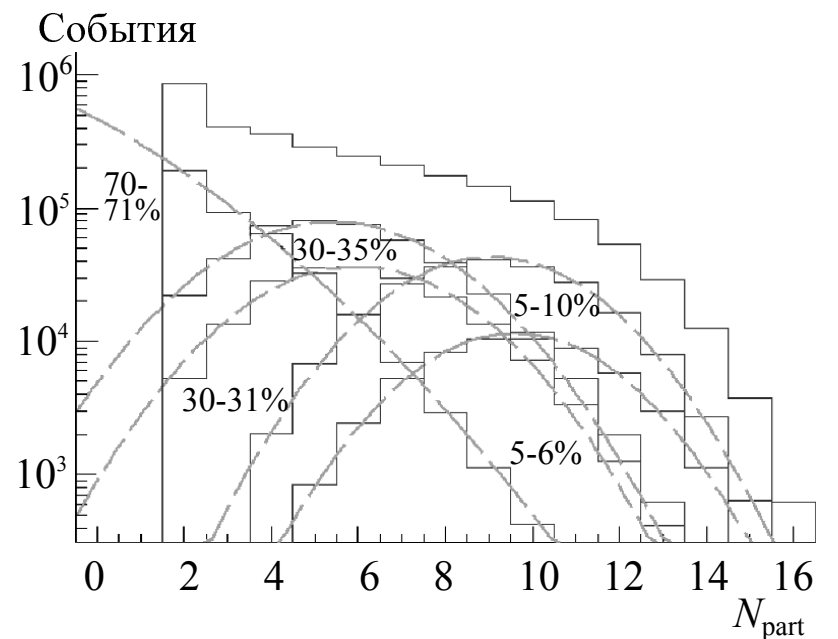
Рис. 5: Отбор событий по множественности для Pb-Pb столкновений при энергии  $\sqrt{s}=2.76$ ТэВ [A1,A5] (Монте Карло модель Глаубера [A5]). *a*: Распределение событий по множественности в Pb-Pb столкновении при 2.76ТэВ. *б*: Распределения событий по числу нуклонов-участников, соответствующее выбранным классам по множественности. *в*: Pb-Pb 2.76ТэВ, Зависимость среднего числа нуклонов-участников  $N_{part}$  для различных значений классов множественности столкновений (указана нижняя границе от 0 % для центральных и до 60 % для периферических столкновений) в зависимости от ширины класса множественности (1%, 2%, 3%...10%). *г*: Pb-Pb 2.76ТэВ, Зависимость величины RMS для  $N_{part}$  для различных значений множественности столкновений (указана нижняя граница класса по множественности от 0 % для центральных и до 60 % для периферических столкновений) в зависимости от ширины класса (1%, 2%, 3%...10%).

В эксперименте ALICE на основании откалиброванной центральности измерена плотность множественности заряженных частиц в центральной области быстрот как функция центральности. Это легло в основу измерения плотности множественности заряженных частиц в диапазоне средних псевдобыстрот, которые стали самыми первыми исследованиями в столкновениях тяжелых ядер при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ на нуклон-нуклонную пару в системе центра масс, ранее не доступных на эксперименте в диапазоне псевдобыстроты  $|\eta| < 0.5$  для 80% центральных событий.





*a*



*б*

Рис. 6: Отбор событий по множественности для  $\text{Be}^7\text{-Be}^9$  столкновений при энергии  $\sqrt{s}=17$  ГэВ (Монте Карло модель Глаубера [A5]). *a*: Распределение событий по множественности в  $\text{Be}^7\text{-Be}^9$  столкновении при  $\sqrt{s}=17$  ГэВ *б*: Распределения событий по числу нуклонов-участников, соответствующее выбранным классам по множественности.

Результаты являются первыми новыми наблюдениями при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ и будут использованы в подготовке эксперимента ALICE после апгрейда БАК. Разработанные программы для подсчета множественности (AliMultSelection) и калибровки центральности (AliMultSelectionCalibrator) являются универсальными как для протон-ядерных, так и для ядро-ядерных столкновений. Они, а также результаты калибровки центральности для столкновений ядер свинца при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ, были добавлены в библиотеки AliROOT, что позволяет использовать их участникам эксперимента ALICE для различного рода анализа данных с отбором событий по центральности.

Был разработан универсальный метод оценки флуктуаций нуклонов участников в классах центральности для разных сортов ядер при различных энергиях на примере энергий LHC (Большого Адронного коллайдера) и SPS (Супер-Протонного Синхротрона). При этом отбор классов центральности происходит в условиях, приближенных к экспериментальным. Данный метод позволяет оценить до какой степени возможна минимизация фоновых (объемных) флуктуаций измеряемых величин, а также определить значение ширины класса центральности, после которого более детальное рассмотрение событий при сужении класса центральности не ведет за собой улучшение разрешения измерений.

Данный метод может применяться для любых экспериментов по столкновению ультрарелятивистских ядер, где необходим отбор событий по центральности столкновения. Полученная качественная картина позволяет значительно уменьшить погрешность измеряемых величин, что, в свою очередь, критично в экспериментах направленных на поиск эффектов, связанных с их флуктуациями.

## Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан метод минимизации фоновых флуктуаций наблюдаемых величин в ультррелятивистских столкновениях ядер, основанный на выборе ширины класса центральности, при котором среднеквадратичное отклонение с дальнейшим сужением класса остается неизменным. Данный метод является универсальным для разных сталкивающихся систем.
2. Данный метод уменьшения фоновых флуктуаций апробирован на модели Глаубера с двухкомпонентным описанием множественности заряженных частиц, а также на генераторе событий HIJING для случаев ядро-ядерных и протон-ядерных столкновений при энергиях LHC (2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ) и SPS (16.8 ГэВ и 17.3 ГэВ), для легких ( ${}^7\text{Be}$  -  ${}^9\text{Be}$ ) и тяжелых ядер (Pb).
3. Данный метод применен к монте-карловским данным, полученным с учетом транспорта в Geant 3 и отклика детектирующих систем установки ALICE, для столкновений ионов свинца при энергии 2.76 ТэВ. В результате, для условий реального эксперимента установлены пороги сужения классов центральности, минимизирующие фоновые флуктуации, связанные с вариацией числа нуклонов-участников.
4. В рамках эксперимента ALICE проведена калибровка процедуры определения центральности с введением новых эстиматоров для столкновений ядер свинца при энергии 5.02 ТэВ на нуклон. На основании откалиброванных данных измерена плотность множественности заряженных частиц в центральной области быстрот как функция центральности.

**Публикации.** Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 6 рецензируемых печатных изданиях [A1-A6], индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus, и отражены в материалах конференции [A7]:

- A1. T. A. Drozhzhova, V. N. Kovalenko, A. Yu. Seryakov and G. A. Feofilov, “Centrality and multiparticle production in ultrarelativistic nuclear collisions”, Phys. Atom. Nucl. 79, no. 5, 737 (2016) [Yad. Fiz. 79, no. 5, 508 (2016)].
- A2. J. Adam, T. Drozhzhova, et al. (ALICE Collaboration), “Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s}=5.02$  TeV”, Phys. Rev. Lett. 116, 222302 (2016).
- A3. J. Adam, T. Drozhzhova, et al. (ALICE Collaboration), “Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV”, Phys. Lett. B 772 (2017) 567-577.
- A4. Tatiana Drozhzhova for ALICE collaboration, “Centrality and collision event-plane determination in ALICE at the LHC”, Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012061.

- A5. Tatiana Drozhzhova, “Determination of classes of events in multiplicity and its relevance to centrality in high energy Pb-Pb and p-Pb collisions in different MC models”, PoS(Baldin ISHEPPXXII) 070, (2015).
- A6. Tatiana Drozhzhova, Grigory Feofilov, Vladimir Kovalenko, Andrey Seryakov, “Geometric properties and charged particles yields behind Glauber model in high energy pA and AA collisions”, PoS(QFTHEP2013) 053, (2013).
- A7. T. Drozhzhova, “Fluctuations of a number of wounded nucleons and binary NN collisions in nucleus-nucleus interactions in a fixed target experiment”, Proceedings of International Student Conference “Science and progress”, St. Petersburg, 2010.

### Цитируемая литература

1. R. Snellings, “The ‘little bang’ at RHIC and at the LHC”, *Proceedings, Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics: Manchester, UK, August 8-12, 2011*, J. Phys. Conf. Ser. **381**, 012019 (2012).
2. G. Feofilov and A. Ivanov, “Number of nucleon-nucleon collisions vs. energy in modified Glauber calculations”, J. Phys. Conf. Ser. **5**, 230–237 (2005).
3. V. Kovalenko and V. Vechernin, “Model of pp and AA collisions for the description of long-range correlations”, PoS **ISHEPP2012**, 077 (2012), arXiv:1212.2590 [nucl-th].
4. K. Aamodt *et al.* (ALICE Collaboration), “The ALICE experiment at the CERN LHC”, JINST **3**, S08002 (2008).
5. A. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), “Centrality determination of Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with ALICE”, Phys. Rev. C **88** (2013), 10.1103/PhysRevC.88.044909, arXiv:1301.4361 [nucl-ex].
6. B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), “Pseudorapidity density of charged particles in  $p + Pb$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV”, Phys. Rev. Lett. **110**, 032301 (2013), arXiv:1210.3615 [nucl-ex].
7. B. Back *et al.* (PHOBOS Collaboration), “Pseudorapidity distribution of charged particles in  $d + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV”, Phys. Rev. Lett. **93**, 082301 (2004), arXiv:nucl-ex/0311009 [nucl-ex].
8. H. Niemi, K. J. Eskola, and R. Paatelainen, “Event-by-event fluctuations in a perturbative QCD + saturation + hydrodynamics model: Determining QCD matter shear viscosity in ultrarelativistic heavy-ion collisions”, Phys. Rev. C **93**, 024907 (2016), arXiv:1505.02677 [hep-ph].
9. T. Pierog, I. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, “EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider”, Phys. Rev. C **92**, 034906 (2015), arXiv:1306.0121 [hep-ph].
10. X.-N. Wang and M. Gyulassy, “HIJING: A Monte Carlo model for multiple jet production in  $p p$ ,  $p A$  and  $A A$  collisions”, Phys. Rev. D **44**, 3501–3516 (1991).