

*На правах рукописи*

Светличный Александр Олегович

Свойства спектаторной материи  
в столкновениях релятивистских ядер

1.3.15 —

Физика атомных ядер и элементарных частиц,  
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук

**Научный руководитель:**

*Пшеничнов Игорь Анатольевич*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Ларионов Алексей Борисович*, доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, ведущий научный сотрудник.

*Снигирев Александр Михайлович*, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, отдел экспериментальной физики высоких энергий, лаборатория сильных взаимодействий, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: [www.inr.ru](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.163.01  
кандидат физ.-мат. наук

*Демидов Сергей Владимирович*

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы и степень её разработанности.** Изучение столкновений релятивистских ядер [1, 2] занимает центральное место в физике атомных ядер, элементарных частиц и высоких энергий. Известно, что в таких столкновениях горячая и плотная материя образуется в области перекрытия сталкивающихся ядер, называемой областью партисипантов, где температура, по разным оценкам, достигает значений в сотни МэВ. Именно этой области уделяется наибольшее внимание в теоретических и экспериментальных исследованиях. Оставшаяся часть сталкивающихся ядер, представленная невзаимодействующими нуклонами-спектаторами и называемая поэтому спектаторной материей, разогревается заметно меньше, до температур порядка нескольких МэВ, и слабо отклоняется от начального направления пучка ядер. В настоящей диссертации систематически изучается следующий ряд характеристик спектаторной материи: множественности образования различных ядерных фрагментов, суммарная множественность нейтронов и протонов; множественности нейтронов и протонов по отдельности и их отношение, заряды образовавшихся ядерных фрагментов и суммарный заряд фрагментов.

Стоит подчеркнуть, что в столкновениях ультрарелятивистских ядер относительно холодная спектаторная материя остается малоизученной. Это связано с особенностями экспериментов при высоких энергиях, в которых тяжелые ядерные фрагменты-спектаторы вылетают под предельно малыми углами к оси пучка, что создает трудности для их отделения от ядер пучка и полноценной идентификации их массы и заряда. Можно ожидать, что в зависимости от прицельного параметра столкновения (расстояния между центрами ядер в момент их наибольшего сближения) определённая часть спектаторных нуклонов остается связанной в ядерные фрагменты-спектаторы, которые также вылетают вперёд, сопровождаемые свободными спектаторными нуклонами. В работе [3] изучались множественности образовавшихся ядер водорода, ядер гелия или фрагментов промежуточной массы ( $3 \leq Z \leq 30$ ) в зависимости от полного связанного во фрагментах заряда  $Z_b = \sum_{frag.} Z_i$ .

В этой работе отмечался эффект универсальности ядерной фрагментации, заключающийся в том, что слабо меняются с увеличением энергии столкновений для комбинации данного ядра-снаряда и различных ядер-мишеней. Возникает вопрос, в какой степени такая универсальность сохранится при росте начальной энергии столкновений в системе центра масс в пересчете на нуклон-нуклонную пару от  $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$  ГэВ (Super Proton Synchrotron или SPS) до  $\sqrt{s_{NN}} \sim 5$  ТэВ (Large Hadron Collider или LHC). Действительно, сечение нуклон-нуклонного взаимодействия показывает слабую логарифмическую зависимость от  $\sqrt{s_{NN}}$  [4], поэтому незначительно меняется в исследованной в работах [3,5,6] области энергий ядер  $\sim 0.6-10$  ГэВ/нуклон. Однако, сечение нуклон-нуклонного взаимодействия возрастает почти вдвое при переходе от энергии SPS к энергии LHC, следовательно, нельзя исключить нарушения универсальности характеристик фрагментации в столь широком диапазоне энергий.

Изучение спектаторной материи, образующейся в столкновениях релятивистских лёгких ядер, представляет отдельный интерес, поскольку малый объем спектаторной материи увеличивает вероятность получить настолько большую энергию возбуждения в пересчете на нуклон-спектатор, которая достаточна для мультифрагментного распада [3, 5, 7] этой материи. Стоит отметить, что ядра  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  в основном состоянии имеют существенную примесь состояний с  $\alpha$ -кластерной структурой. Фрагментация лёгких релятивистских ядер в ядерной фотоэмульсии изучалась в ряде экспериментов, см., в частности, работу [8], в которой наблюдаемые события фрагментации  $^{16}\text{O}$  с образованием двух и более  $\alpha$ -частиц связывались с проявлением  $\alpha$ -кластерной структуры  $^{16}\text{O}$ . Вместе с тем всестороннего теоретического анализа таких процессов с учетом кластерной структуры ядер не проводилось как при низких, так и при высоких энергиях.

В настоящее время выполняется несколько экспериментов по изучению столкновений ядер высоких энергий на больших экспериментальных установках. Несмотря на разнообразие используемых экспериментальных методов, большинство экспериментальных установок оснащено детекторами, позволяющими

регистрировать летящие вперёд частицы. Такие детекторы называются передними адронными калориметрами Forward Hadronic Calorimeters (FHCAL) или калориметрами нулевого угла — Zero Degree Calorimeters (ZDC). Получаемые от ZDC данные используются или будут использоваться для определения центральности столкновения [9–11] и плоскости реакции [12]. Следовательно, представляется исключительно актуальным создание современных моделей ядро-ядерных столкновений, которые достоверно описывают как состав, так и кинематические характеристики образующихся в ядро-ядерных столкновениях спектаторных нуклонов и фрагментов. В частности, такие модели абсолютно необходимы для вычисления акцептанса и эффективности ZDC в отношении регистрации спектаторных нуклонов и фрагментов.

Разработан целый ряд моделей ядерных реакций [13–15], которые, помимо взаимодействий частиц с ядрами, успешно описывают ядро-ядерные столкновения, включая эволюцию файерболла и множественное рождение частиц в области партисипантов. Но только некоторые из таких моделей, в частности, модель Quantum Molecular Dynamics (QMD) [16] детально описывают эволюцию относительно холодной ядерной материи (включая спектаторную) в ходе ядро-ядерного столкновения и предсказывают образование в конечном состоянии ядерных фрагментов наряду со свободными нуклонами. Помимо QMD, можно отметить модели Dubna Cascade Model – Statistical Multifragmentation Model (DCM-SMM) [17] и Fritiof (FTF) [18] из библиотеки Geant4, основанные на модели внутриядерного каскада. Как показано в работе [19], выходы спектаторных нейтронов на Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) в моделях UrQMD+SMM и FTF могут различаться втрое, так как они используют различные предположения о формировании и распаде спектаторных фрагментов. Следует подчеркнуть, что именно неопределённость в вычислении энергии возбуждения спектаторной материи вносит существенные неопределённости в моделирование распада такой материи на фрагменты и свободные нуклоны. Использование вышеупомянутых моделей с адекватной параметризацией распределения первичных фрагментов по массе и энергии возбуждения [3,6] позволяет описать состав спек-

таторной материи, образующейся при сравнительно небольших кинетических энергиях сталкивающихся ядер. Однако, ультрарелятивистские энергии остаются вне их границ применимости.

Достоверное определение начальных условий в столкновении ядро-ядро и их связь с измеряемыми в эксперименте величинами критически важны для исследований взаимодействий ядер: пространственная анизотропия файерболла впоследствии трансформируется в анизотропию импульсов частиц в конечном состоянии. Для определения величины прицельного параметра  $b$  в экспериментах по столкновениям релятивистских ядер часто используется информация о спектаторах, получаемая с ZDC [9–11]. В этом случае сопоставление измеренных характеристик спектаторов и результатов их достоверного моделирования позволит разработать наиболее совершенные методы определения центральности ядро-ядерных столкновений в эксперименте.

Таким образом, для достоверного определения аксептанса и эффективности передних калориметров, для определения прицельного параметра события в эксперименте посредством сравнения сигналов калориметров и результатов моделирования необходима модель, которая достоверно описывает образование спектаторной материи в столкновениях релятивистских и ультрарелятивистских ядер различной массы – от легких до тяжелых.

**Общей целью и задачами** данной диссертации являются:

1. Создание модели, описывающей образование спектаторной материи в столкновениях релятивистских и ультрарелятивистских ядер, и её реализация на языке C++.
2. Изучение состава спектаторной материи в столкновениях ядер  $^{197}\text{Au}$  при энергиях колайдера NICA в зависимости от прицельного параметра и определение различных характеристик, чувствительных к прицельному параметру столкновений.
3. Исследование спектаторной материи в ультрацентральных  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  столкновениях на SPS и LHC и  $^{238}\text{U}$ – $^{238}\text{U}$  столкновениях на RHIC с учётом эффектов ядерной структуры сталкивающихся ядер.

4. Разработка нового метода определения параметров поверхностного нейтронного слоя посредством регистрации спектаторных нейтронов и протонов в ультрацентральных столкновениях релятивистских ядер.
5. Исследование влияния  $\alpha$ -кластерной структуры ядра  $^{16}\text{O}$  на состав спектаторной материи в столкновениях  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ .

**Методология и методы исследования.** В данной работе используется предположение о двухстадийном механизме взаимодействия релятивистских ядер: abrasion-ablation. Моделирование столкновения ядер и вычисление объема спектаторной материи проводится с помощью модели Глаубера. Для вычисления энергии возбуждения спектаторного перфрагмента используется формула Эриксона и феноменологическая аппроксимация, разработанная на основе экспериментальных данных коллаборации ALADIN. При моделировании предравновесного распада возбуждённой ядерной материи используется модель MST-кластеризации. Для моделирования ядерной фрагментации используются испарительная модель Вайскопфа-Ивинга, статистическая модель мультифрагментации и модель Fermi Break Up.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана модель образования спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер, которая получила название Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (AAMCC).
2. На основе результатов моделирования  $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$  столкновений на NICA найден набор наиболее чувствительных к величине прицельного параметра характеристик спектаторной материи, предложен метод определения центральности посредством измерения совокупности таких характеристик.
3. С помощью модели AAMCC показано влияние взаимной начальной ориентации несферических ядер  $^{238}\text{U}$  в их ультрацентральных столкновениях на множественности спектаторных нейтронов и асимметрию вперёд-назад этих множественностей, предложен метод выделения событий

- с различной ориентацией ядер.
4. Предложен новый метод определения параметров поверхностного нейтронного слоя ядра  $^{208}\text{Pb}$  посредством измерений сечений образования определённого числа спектаторных нейтронов и протонов в ультрацентральных  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях на SPS и LHC, показана устойчивость результатов вычислений при изменении параметров модели ААМСС.
  5. Посредством моделирования столкновений ядер  $^{16}\text{O}$  изучено влияние  $\alpha$ -кластерной структуры  $^{16}\text{O}$  на состав спектаторной материи в таких столкновениях, определены характеристики спектаторной материи, наиболее чувствительные к кластерной структуре  $^{16}\text{O}$ .
  6. Для  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$  столкновений на LHC с учетом кластеризации в  $^{16}\text{O}$  вычислены распределения по множественности спектаторных нейтронов и дейтронов, фрагментов с определённым отношением заряда к массе. Показаны особенности работы передних нейтронных калориметров в сеансах  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ , оценена вероятность взаимодействий вторичных фрагментов с близкими к  $^{16}\text{O}$  отношениями заряда к массе в таких сеансах.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые изучена широкая совокупность характеристик спектаторной материи в  $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$  столкновениях на NICA, определены наиболее чувствительные к прицельному параметру характеристики с учетом возможности их измерения в эксперименте MPD.
2. Предложен новый метод определения параметров нейтронного слоя в ядре  $^{208}\text{Pb}$  на основе регистрации спектаторных нуклонов в ультрацентральных  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях.
3. Впервые исследовано влияние  $\alpha$ -кластерной структуры ядра  $^{16}\text{O}$  на состав спектаторной материи в столкновениях  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ .
4. Впервые выполнено моделирование спектаторов от



$^{16}\text{O}$ – $^{16}\text{O}$  столкновений на ЛНС и оценена вероятность взаимодействия вторичных ядер, циркулирующих в кольце ЛНС.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что разработанная в настоящей диссертации модель Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (ААМСС) позволяет моделировать образование спектаторов в столкновениях ядер в широком диапазоне начальных энергий, что позволяет применять её для определения центральности столкновений в различных экспериментах. Исходный код модели ААМСС является открытым и доступен для использования. На основе изучения чувствительности различных характеристик спектаторной материи к величине прицельного параметра в столкновениях ядер  $^{197}\text{Au}$  можно усовершенствовать метод определения центральности столкновений в эксперименте MPD на NICA. Разработанный метод определения параметров нейтронного слоя в ядре  $^{208}\text{Pb}$  позволит уточнить его параметры посредством использования уже работающих в эксперименте ALICE передних нейтронных и протонных ZDC калориметров. Изучение влияния кластерной структуры ядра  $^{16}\text{O}$  имеет важное прикладное значение. Ядра с близкими к ядрам пучка ЛНС отношением заряда к массе проходят сквозь систему коллиматоров ЛНС и оказывают воздействие на элементы коллайдера, в частности, на сверхпроводящие магниты. Выходы таких ядер с близкими к ядрам пучка отношениями заряда к массе можно оценить с помощью модели и, как показано в настоящей диссертации, в столкновениях  $^{16}\text{O}$ – $^{16}\text{O}$  образуется заметное количество таких ядер.

**Степень достоверности результатов.** Хорошее согласие результатов модели ААМСС и экспериментальных данных по фрагментации легких и тяжелых ядер, сталкивающихся при различных энергиях, убедительно показывает возможности ААМСС для описания характеристик спектаторной материи при различных энергиях столкновений. Результаты модели ААМСС в целом хорошо описывают зависимость среднего максимального заряда спектаторного фрагмента, средней множественности фрагментов промежуточной массы, ядер водорода и гелия от суммы зарядов

фрагментов во взаимодействиях ядер  $^{197}\text{Au}$  с энергией 10А ГэВ с ядерной фотоэмульсией. Средние выходы нейтронов и протонов в ультрацентральных столкновениях ядер  $^{208}\text{Pb}$  с энергией 158А ГэВ хорошо описываются ААМСС. Данные о зависимости средней множественности нейтронов как функции прицельного параметра столкновения, полученные коллаборацией ALICE в столкновениях ядер свинца с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ, в целом согласуются с предсказаниями модели ААМСС.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлены в устных докладах на:

- LXIX Международной конференции NUCLEUS-2019, 1–5 июля 2019, ОИЯИ, Дубна;
- LXX Международной конференции NUCLEUS-2020, 11–17 октября 2020, СПбГУ, Санкт-Петербург;
- LXXI Международной конференции «NUCLEUS-2021» 20–25 сентября 2021, СПбГУ, Санкт-Петербург;
- Международной конференции «NUCLEUS-2022» 11–16 июля 2022, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
- Workshop on analysis techniques for centrality determination and flow measurements at FAIR and NICA, 24–28 августа 2020, МИФИ;
- SHINE Open Seminar, 17 September 2020, CERN;
- 63-й всероссийской конференции МФТИ с международным участием, 23–29 ноября 2020, МФТИ, Долгопрудный;
- 64-й всероссийской конференции МФТИ, 29 ноября–3 декабря 2021, МФТИ, Долгопрудный;
- Конференции Ломоносов-2020, 10–27 ноября 2020, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
- The Ninth Annual Large Hadron Collider Physics, 7–12 June 2021, CERN;
- X Межинститутской молодежной конференции «Физика элементарных частиц и космология – 2021», 19–20 апреля 2021, МФТИ, Москва;
- Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» 12–23 апреля 2021,

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;

- European Physical Society conference on high energy physics 2021, 26–30 July 2021, on-line;
  - The 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 29 November 2022 – 2 December 2022, Moscow
- А также на совещаниях Geant4 Technical Forum.

**Личный вклад.** Содержание диссертации и выносимые на защиту основные положения отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автор принимал непосредственное участие в решении следующих задач:

- разработка программного кода модели Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (AAMCC) с использованием исходного кода модели Glauber Monte Carlo (Glauber MC) и библиотеки Geant4;
- разработка модели предравновесной фрагментации спектаторной материи на основе MST-кластеризации;
- анализ чувствительности характеристик спектаторной материи к центральности столкновений в столкновениях ядер  $^{197}\text{Au}$ ;
- моделирование ультрацентральных столкновений ядер  $^{208}\text{Pb}$  при энергиях SPS и LHC и ядер  $^{238}\text{U}$  при энергии RHIC;
- разработка методов оценки параметров нейтронного слоя  $^{208}\text{Pb}$  посредством регистрации спектаторных нуклонов в ультрацентральных столкновениях;
- создание кода для генерации положений нуклонов в ядре  $^{16}\text{O}$  с учётом внутриядерной кластеризации на языке Julia;
- моделирование столкновений ядер  $^{16}\text{O}$  и анализ влияния внутриядерной кластеризации на состав спектаторной материи.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 публикациях, из которых 10 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК [A1–A10], а 3 — в сборниках трудов конференций [A11–A13].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 116 страниц с 37 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 117 наименований.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее общая цель и конкретные задачи, аргументирована научная новизна исследований и показаны научная и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту основные результаты, сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

**Первая глава** представляет разработанную в диссертации модель образования спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер — Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (ААМСС). Модель ААМСС предполагает двухстадийный механизм взаимодействия ядер. На первой стадии моделируется удаление нуклонов из начальных ядер с помощью модели Глаубера в реализации Glauber Monte Carlo. Моделирование выполняется с учётом тонких деталей структуры сталкивающихся ядер — отдельных радиальных распределений внутриядерных нейтронов и протонов, отличия формы некоторых ядер от сферической. Результатом первой стадии моделирования является разделение нуклонов сталкивающихся ядер на нуклоны-партисипанты и нуклоны-спектаторы. Непровзаимодействовавшие нуклоны-спектаторы формируют спектаторные префрагменты.

На второй стадии моделируется распад возбуждённой ядерной материи — спектаторного префрагмента. Для определения энергии возбуждения префрагмента доступны три варианта вычисления энергии возбуждения. Первый из них использует формулу Эриксона: средняя энергия возбуждения на нуклон  $\langle \varepsilon^* \rangle$  как функция относительного размера префрагмента  $\alpha = A_{pf}/A$  для этого варианта задаётся формулой (1), где  $E_{\max} = 40$  МэВ — максимальная энергия дырочного состояния.

$$\langle \varepsilon^* \rangle = E_{\max} \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha(1-\alpha+A^{-1})} \quad (1)$$

Во втором варианте используется эмпирическая параметризация коллаборации ALADIN [7]. Средняя энергия возбуждения на нуклон как функция относительной массы префрагмента задается формулой (2), где  $\varepsilon_0$  — параметр модели равный 4 МэВ для лёгких ядер с  $A \leq 20$  и 11.5 МэВ для тяжёлых ядер с  $A > 20$ .

$$\langle \varepsilon^* \rangle = \varepsilon_0 \sqrt{1-\alpha} \quad (2)$$

Было найдено, что вычисления энергии возбуждения префрагмента по формуле Эриксона завышают её в центральных и полуцентральных столкновениях, а параметризация ALADIN, переоценивает её в периферических столкновениях. Для решения этой проблемы была построена гибридная параметризация [A4], в которой переключение с формулы Эриксона на параметризацию ALADIN происходит в точке  $\alpha_{\text{sw}}$ , определяемой исходя из условий непрерывности средней энергии возбуждения.

Дополнительно для моделирования предравновесного разделения префрагментов может быть запущен алгоритм MST-кластеризации, в результате работы которого пространственно протяженные префрагменты разделяются на несколько возбуждённых фрагментов [A4]. Основным параметром модели MST-кластеризации является максимальное расстояние  $d$  между нуклонами в кластере, которое зависит от энергии возбуждения префрагмента  $\varepsilon^*$ :

$$d = \begin{cases} d_0, & \varepsilon^* < \varepsilon_s \\ d_0 \cdot (\varepsilon^* / \varepsilon_s)^{\gamma/3}, & \varepsilon^* > \varepsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

где  $d_0 = 2.17$  фм — параметр кластеризации для нормальной ядерной плотности,  $\gamma = -1.02 \pm 0.1$  и  $\varepsilon_s = 2.17 \pm 0.23$  МэВ были определены из экспериментальных данных.

Для моделирования равновесной фрагментации возбужденных ядерных фрагментов используются испарительная модель Вайскопфа-Ивинга, модель статистической мультифрагментации SMM и модель Fermi Break-Up из библиотеки Geant4.

Результаты разработанной в диссертации модели ААМСС сравнивались с экспериментальными данными по выходам спектаторных нуклонов и ядерных фрагментов в широком диапазоне энергий столкновений  $\sqrt{s_{NN}}$  — от  $\sim 2$  ГэВ до  $\sim 5$  ТэВ. В качестве примера на рисунке 1 показано сравнение результатов ААМСС с экспериментальными данными по фрагментации ядер  $^{197}\text{Au}$ . Модель хорошо описывает зависимость среднего максимального заряда спектаторного фрагмента  $\langle Z_{\max} \rangle$ , средней множественности фрагментов промежуточной массы  $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$  с  $3 \leq Z \leq 30$ , ядер водорода и гелия,  $\langle N_{Z=1} \rangle$  и  $\langle N_{Z=2} \rangle$ , от суммы зарядов фрагментов  $Z_{b3}$  или  $Z_{\text{bound}}$ , которая коррелирует с прицельным параметром столкновения. Результаты первой главы опубликованы в работах [A1, A3, A4].

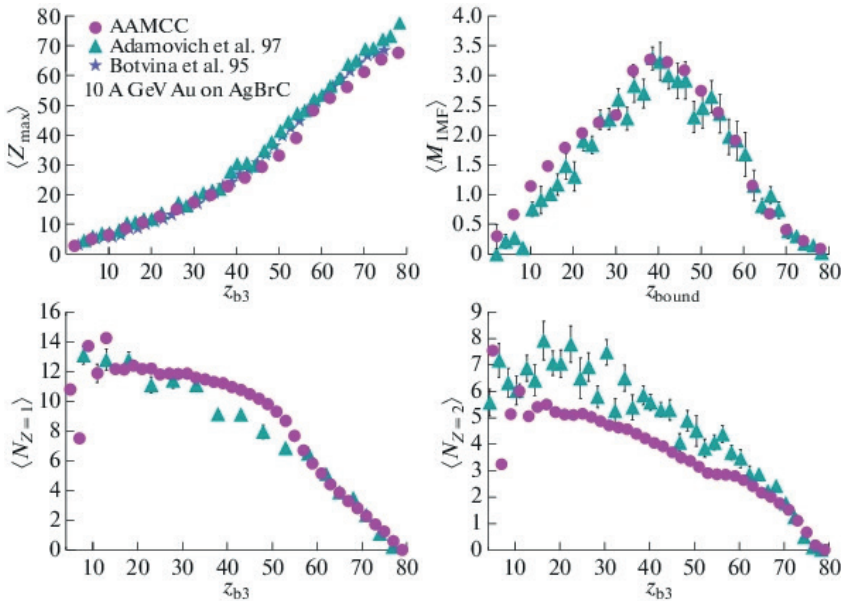


Рис. 1. Средний максимальный заряд спектаторного фрагмента  $\langle Z_{\max} \rangle$ , средняя множественность фрагментов промежуточной массы  $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$  с  $3 \leq Z \leq 30$ , средние числа ядер водорода и гелия,  $\langle N_{Z=1} \rangle$  и  $\langle N_{Z=2} \rangle$ , образующихся при фрагментации  $^{197}\text{Au}$  в зависимости от суммы зарядов фрагментов  $Z_{b3}$  или  $Z_{\text{bound}}$ . Кружки — результаты ААМСС, треугольники — экспериментальные данные [6, 7]. Рисунок из работы [A3]

**Вторая глава** посвящена исследованию с помощью модели ААМСС фрагментации релятивистских ядер различных центральных, при различных энергиях столкновения. В работе [А5] была исследована зависимость состава спектаторной материи от энергии сталкивающихся релятивистских ядер путём сравнения  $\langle Z_{\max} \rangle$ ,  $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ ,  $\langle N_{Z=1} \rangle$  и  $\langle N_{Z=2} \rangle$ , в столкновениях ядер  $^{208}\text{Pb}$  при энергиях SPS,  $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$  ГэВ, и LHC,  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ. Было обнаружено, что в центральных столкновениях средние числа ядер водорода различаются при энергиях SPS и LHC. Обсуждается возможность изучения ядерной фрагментации на современных коллайдерах тяжелых ионов, таких как LHC и RHIC, и исследуется состав спектаторных фрагментов как функция числа бинарных нуклон-нуклонных столкновений. Для изучения ядерной фрагментации в столкновениях ультрарелятивистских ядер предлагается с помощью ZDC измерять количество спектаторных нуклонов и отношение количества протонов к количеству нейтронов в зависимости от количества бинарных нуклон-нуклонных столкновений в событии, которое может быть извлечено из измерений множественности в центральной области быстрот, выполненных другими детекторами.

Во второй главе также изучаются различные характеристики спектаторной материи, которые могут быть доступны для изучения в эксперименте MPD на NICA: числа спектаторных дейтронов и  $\alpha$ -частиц, асимметрия вперед-назад числа спектаторных нуклонов, число заряженных фрагментов на спектаторный нуклон. На основе теоремы Байеса вычислены апостериорные вероятности принадлежности события к определенным классам центральности  $C_i$ :

$$P(C_i|N) = P(C_i)P(N|C_i)/P(N), \quad (4)$$

и отмечены характеристики  $N$ , специфические для них. В качестве примера на рисунке 2 представлены вероятности события с определёнными числами спектаторных дейтронов и частиц, с определённой асимметрией впередназад чисел спектаторных нейтронов и нуклонов принадлежать к определённому классу центральности. Как видно из рисунка 2, использование только одной характери-

стики не позволяет однозначно отнести событие к определённому классу центральности, однако, как показано в работе [A2], использование совокупности характеристик позволит точнее определять центральность столкновения. Результаты второй главы опубликованы в работах [A2, A5].

**Третья глава** посвящена систематическому изучению состава спектаторной материи в ультрацентральных столкновениях релятивистских ядер.

В ультрацентральных столкновениях спектаторная материя имеет особенную форму тонкого полумесяца и поэтому может терять связность в процессе предравновесного распада. Для учёта

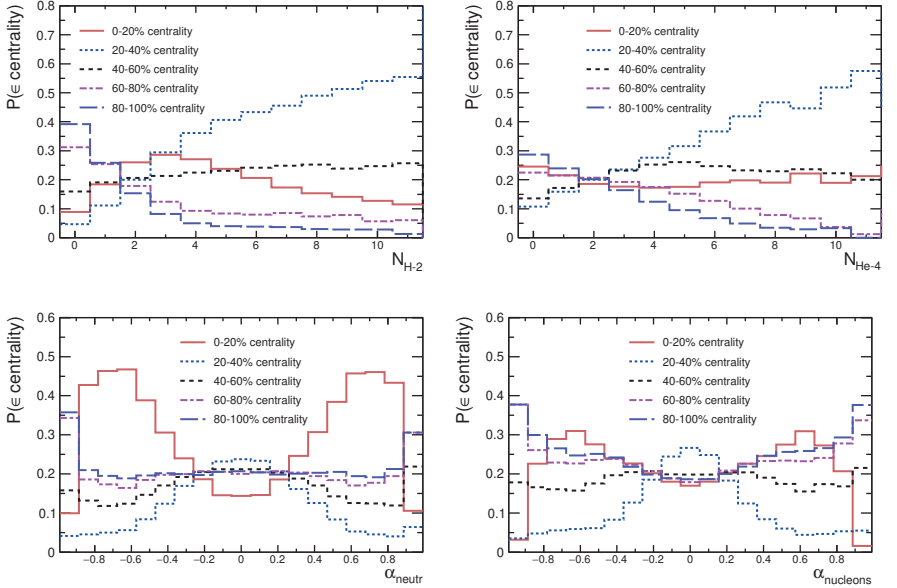


Рис. 2. Вероятность того, что событие с данным числом дейтронов  $N_{H-2}$  (слева, сверху) или  $\alpha$ -частиц  $N_{He-4}$  (справа, сверху) будет принадлежать к определенному интервалу центральности: 0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80% или 80–100%. Вероятность столкновения с заданным значением асимметрии вперед-назад чисел свободных спектаторных нейтронов  $\alpha_{neutr}$  (слева, внизу) и нуклонов  $\alpha_{nucleons}$  (справа, внизу) принадлежать определенному интервалу центральности: 0–20%, 20–40%, 40–60%, 60–80% или 80–100%. Результаты ААМСС даны для  $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ. Рисунки из работы [A2]



такого быстрого механизма разделения префрагмента используется представленная в первой главе модель MST-кластеризации. Результаты изучения центральных столкновений  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  опубликованы в работе [A7]. Особенностью ядра  $^{208}\text{Pb}$  и других тяжелых ядер является наличие обогащенного нейтронами поверхностного слоя (Neutron Skin (NS)), толщину которого принято характеризовать разницей среднеквадратичных радиусов  $\Delta r_{np} = \sqrt{\langle r_n^2 \rangle} - \sqrt{\langle r_p^2 \rangle}$  распределений внутриядерных нейтронов и протонов, которая имеет типичные значения  $\Delta r_{np} = 0.1 - 0.3$  фм. Параметры NS непосредственно связаны с энергией симметрии ядерной материи, однако современные теории и эксперименты по изучению NS существенно расходятся в оценках  $\Delta r_{np}$ . В работах [A6, A11] систематически изучено влияние NS на состав спектаторной материи в ультрацентральных столкновениях релятивистских ядер  $^{208}\text{Pb}$ . В расчетах с помощью ААМСС использованы шесть различных профилей нейтронных и протонных распределений в  $^{208}\text{Pb}$ , обозначенных в работе [A6] как NFB-8, NL1, Pbpnrw, PREX, PREX1 и PREX2, при которых  $\Delta r_{np}$  меняется от 0.115 фм до 0.321 фм. Вычисления показали, см. таблицу 1, что средние числа нейтронов и протонов в ультрацентральных  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях изменяются мало, несмотря на трехкратные изменения  $\Delta r_{np}$  с шестью разными профилями.

Таблица 1. Средние числа спектаторных нейтронов  $\langle N_n \rangle$ , протонов  $\langle N_p \rangle$  и дейтронов  $\langle N_d \rangle$  в ультрацентральных ( $b = 2$  фм)  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 17.21$  ГэВ, измеренные коллаборацией NA49 [20] и рассчитанные с помощью ААМСС с различными профилями ядерной плотности. Таблица из работы [A6]

	$\Delta r_{np}$ , фм	$\langle N_n \rangle$	$\langle N_p \rangle$	$\langle N_d \rangle$
NFB-8	0.115	12.45	6.82	0.87
NL1	0.321	13.88	6.44	0.77
Pbpnrw	0.15	12.73	6.74	0.85
PREX	0.283	13.59	6.42	0.80
PREX1	0.283	13.79	6.49	0.78
PREX2	0.283	13.41	6.32	0.82
NA49		$9.0 \pm 1.8$	$7.0 \pm 1.4$	0.5

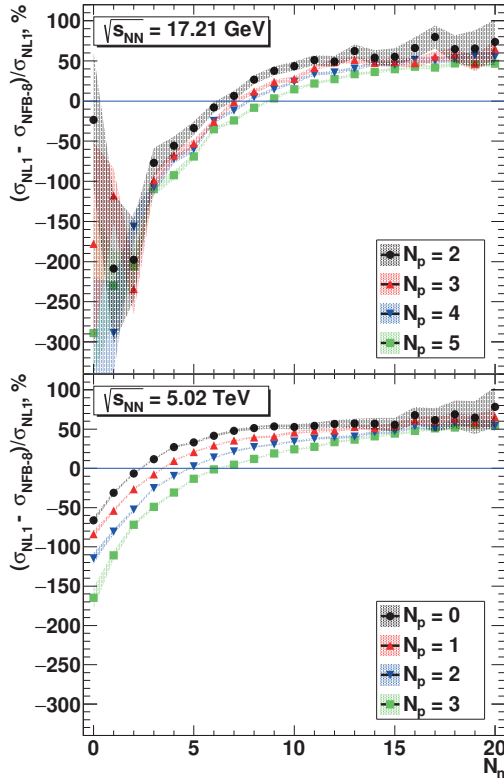


Рис. 3. Относительная разница между сечениями  $\sigma(N_n, N_p)$  эмиссии заданного числа spectatorных нейтронов  $N_n$ , сопровождаемых определенным числом spectatorных протонов  $N_p$ , рассчитанными с профилями NL1 и NFB-8 в  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях с центральностью 0–5%. Верхняя панель: при  $\sqrt{s_{NN}} = 17.21$  ГэВ для  $N_p = 2, 3, 4, 5$ . Нижняя панель: при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ для  $N_p = 0, 1, 2, 3$ . Затененные полосы представляют статистические неопределенности расчетов. Рисунок из работы [A6]

Однако вычисленные с помощью ААМСС сечения  $\sigma(N_n, N_p)$  эмиссии заданного числа spectatorных нейтронов  $N_n$ , сопровождаемых определенным числом spectatorных протонов  $N_p$ , оказались весьма чувствительны к величине  $\Delta r_{np}$ . В качестве примера на рисунке 3 представлена относительная разница между сечениями  $\sigma(N_n, N_p)$ , рассчитанными с профилями NL1 и NFB-8 в  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях для центральности 0–5% на SPS и LHC. Следует отметить значительную разницу (до –250%) меж-

ду сечениями, вычисленными с профилями NL1 и NFB-8 для обеих энергий столкновений. При этом, относительное изменение сечения  $\sigma(N_n, N_p)$  оказывается заметно меньше (менее 20%) при изменении других параметров модели, таких как  $d_0$ , или способ учета формы нуклона в модели Глаубера. На основе проведённых вычислений  $\sigma(N_n, N_p)$  в работе [А6] был предложен новый метод оценки параметров нейтронного слоя в экспериментах по ядро-ядерным столкновениям путем сравнения вычисленных сечений с измеренными.

В третьей главе также исследуются ультрацентральные столкновения ультрарелятивистских деформированных ядер  $^{238}\text{U}$ . Показывается, что в зависимости от начальной взаимной ориентации сталкивающихся ядер существенно меняются распределения нейтронов по множественности и параметр асимметрии множественности нейтронов вперед-назад. Показывается, что в асимметричных tip-body столкновениях ядер  $^{238}\text{U}$ - $^{238}\text{U}$  среднее число нейтронов увеличивается с увеличением параметра деформации. Предложен метод отбора событий с определёнными ориентациями ядер на основе анализа множественностей спектаторных нейтронов, зарегистрированных с каждой стороны от точки взаимодействия ядер в коллайдере. Результаты опубликованы в работах [А6, А7, А9, А11, А12].

В четвертой главе изучается влияние  $\alpha$ -кластеризации внутриядерных нуклонов в  $^{16}\text{O}$  на спектаторы от столкновений релятивистских ядер  $^{16}\text{O}$ . Предполагается, что ядро  $^{16}\text{O}$  может быть представлено в виде суперпозиции некластеризованного и кластерного состояний, а последнее представляет собой набор четырёх кластеров, расположенных в вершинах тетраэдра. Размеры тетраэдра подбирались для соответствия известному зарядовому радиусу ядра  $^{16}\text{O}$ . Показано [А8], что выходы спектаторных  $\alpha$ -частиц и ядер  $^{12}\text{C}$  оказываются чувствительны к примеси  $\alpha$ -кластеризации в ядре  $^{16}\text{O}$ . В расчетах использовались три различные параметризации формы  $\alpha$ -кластера: гауссова  $\rho_G(r) \propto \exp(-r^2/2\sigma^2)$ , Вудса-Саксона (WS)  $\rho_{\text{WS}}(r) \propto 1/(\exp\{(r - r_0)/a\} + 1)$  и гармонического осциллятора (НО)  $\rho_{\text{НО}}(r) \propto (1 + R(r^2/a^2)) \exp -r^2/r^2$ . Их параметры подбирались для описания радиального распределения плотности свободной

$\alpha$ -частицы. Для вычислений с  $^{16}\text{O}$  без кластеризации применялись распределения плотности нуклонов, используемые в модели Glauber Monte Carlo и соответствующие модели гармонического осциллятора для этого ядра.

Сравнение результатов ААМСС с экспериментальными данными по фрагментации ядер  $^{16}\text{O}$  на лёгких ядрах фотоэмульсии показало, что вклад кластерных состояний в  $^{16}\text{O}$  можно оценить на уровне 30%, а расчеты с параметризациями распределений плотности гармонического осциллятора и Вудса-Саксона для  $\alpha$ -кластеров примерно одинаково согласуются с данными. Кроме этого, сравнение показало, что для столкновений лёгких ядер при вычислении энергии возбуждения префрагмента следует использовать параметризацию ALADIN с параметром  $\varepsilon_0 = 4$  МэВ в соответствии с меньшей средней энергией связи нуклонов в лёгких ядрах.

После настройки модели ААМСС моделировались столкновения  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$  на LHC с учётом  $\alpha$ -кластеризации в  $^{16}\text{O}$ . Было также исследовано влияние короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций (SRC) на состав spectatorной материи в столкновениях  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$  на LHC. На рисунке 4 показаны распределения множественности spectatorных нейтронов от столкновений  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 6.37$  ТэВ, рассчитанные с учетом SRC и 30%  $\alpha$ -кластеризации в  $^{16}\text{O}$ . Распределения  $P(N_{\text{neutr.}})$ , вычисленные с тремя упомянутыми выше вариантами конфигураций нуклонов в  $^{16}\text{O}$ , в целом согласуются друг с другом, а распределения, полученные с различными параметризациями ядерной плотности  $\alpha$ -кластеров (НО и WS), также согласуются по форме. Однако события с большим числом spectatorных нейтронов  $N_{\text{neutr.}} > 3$  существенно подавляются при учете SRC, поскольку больше нейтронов остается связанными в spectatorных ядерных фрагментах. Предсказана значительная доля событий без spectatorных нейтронов, которая может влиять на регистрацию событий в эксперименте на основе сигналов передних нейтронных калориметров. Были также вычислены распределения множественности spectatorных дейтронов, и показана чувствительность двух- и трёхдейтронных событий к наличию кластеризации в  $^{16}\text{O}$ . С помощью ААМСС были вычислены вероятности образования spectatorных фрагментов

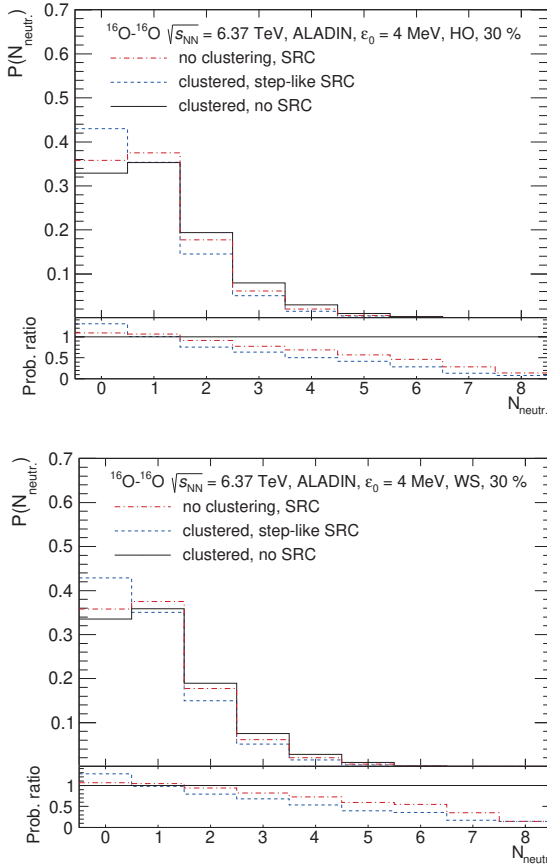


Рис. 4. Распределения множественности спектаторных нейтронов от столкновений  $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$  при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 6.37$  ТэВ, рассчитанные с учетом SRC (пунктирная красная и пунктирная синяя гистограммы) и 30%  $\alpha$ -кластеризации (пунктирная синяя и сплошная черная гистограммы) в  $^{16}\text{O}$ . Ядерная плотность в  $\alpha$ -кластерах была взята на основе модели гармонического осциллятора (слева) и распределения Вудса-Саксона (справа). Соотношения между расчетами с различными опциями представлены на нижних панелях. Рисунок из работы [A10]

с определённым отношением заряда к массе. Найдено, что некоторое количество вторичных ядер  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{14}\text{N}$  может циркулировать в ЛНС вместе с ядрами пучка и вызывать небольшое количество нежелательных  $^4\text{He}-^{16}\text{O}$ ,  $^6\text{Li}-^{16}\text{O}$ , ...  $^{14}\text{N}-^{16}\text{O}$  столкновений. Результаты опубликованы в работах [A8, A10, A13].

В **заключении** сформулированы следующие основные результаты работы. В настоящей диссертации выполнено всестороннее теоретическое исследование свойств спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер. С помощью разработанной модели ААМСС были изучены различные характеристики спектаторов в столкновениях ядер с различной центральностью, начальной энергией, а также изучено влияние эффектов ядерной структуры сталкивающихся ядер на спектаторы. Результаты были опубликованы автором в цикле работ, выполненных в ИЯИ РАН с 2018 по 2023 годы.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

- [A1] Svetlichnyi A., Pshenichnov I. Formation of Free and Bound Spectator Nucleons in Hadronic Interactions Between Relativistic Nuclei // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* — 2020. — Vol. 84. — P. 911.
- [A2] Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Using Spectator Matter for Centrality Determination in Nucleus-Nucleus Collisions // *Particles.* — 2021. — Vol. 4. — P. 227–235.
- [A3] Pshenichnov I., Kozyrev N., Nepeivoda R., Svetlichnyi A., Dmitrieva U. Properties of spectator matter in nuclear collisions at NICA // *Phys. Part. Nucl.* — 2021. — Vol. 52. — P. 591–597.
- [A4] Nepeivoda R., Svetlichnyi A., Kozyrev N., Pshenichnov I. Pre-Equilibrium Clustering in Production of Spectator Fragments in Collisions of Relativistic Nuclei // *Particles.* — 2022. — Vol. 5. — P. 40–51.
- [A5] Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Study of Nuclear Fragmentation at Heavy Ion Colliders // *Phys. Part. Nucl.* — 2022. — Vol. 53. — P. 612–620.
- [A6] Kozyrev N., Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Peeling away neutron skin in ultracentral collisions of relativistic nuclei // *Eur. Phys. J. A.* — 2022. — Vol. 58. — P. 184.
- [A7] Pshenichnov I., Kozyrev N., Svetlichnyi A., Dmitrieva U. What One Can Learn by Studying Spectator Remnants in Central Nucleus–Nucleus Collisions? // *Phys. Part. Nucl.* — 2022. — Vol. 53. — P. 335–341.
- [A8] Svetlichnyi A., Savenkov S., Nepeivoda R., Kozyrev N., Pshenichnov I. Smoking gun of nuclear clusterization in collisions of light relativistic nuclei // *Phys. At. Nucl.* — 2022. — Vol. 85. — P. 320–326.
- [A9] Kozyrev N., Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Spectator matter in the collisions of the relativistic deformed nuclei // *Phys. Part. Nucl.* — 2023. — Vol. 55. — P. 761–774.

- [A10] Svetlichnyi A., Savenkov S., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Clustering in Oxygen Nuclei and Spectator Fragments in  $^{16}\text{O}$ - $^{16}\text{O}$  Collisions at the LHC // Physics. – 2023. – Vol. 5. – P. 381–390.
- [A11] Kozyrev N., Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Pshenichnov I. Spectator nucleons in ultracentral  $^{208}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}$  collisions as a probe of nuclear periphery // PoS. – 2021. – Vol. LHCP2021. – P. 223.
- [A12] Dmitrieva U., Kozyrev N., Svetlichnyi A., Pshenichnov I. Spectator nucleons in most central collisions of heavy nuclei at NICA // AIP Conf. Proc. – 2021. – Vol. 2377. – P. 030005.
- [A13] Svetlichnyi A., Nepeivoda R., Kozyrev N., Pshenichnov I. Secondary nuclei from  $^{16}\text{O}$  fragmentation at the LHC // PoS. – 2022. – Vol. EPS-HEP2021. – P. 310.

### Список литературы

- [1] Pandav A., Mallick D., Mohanty B. Search for the QCD critical point in high energy nuclear collisions // Prog. Part. Nucl. Phys. – 2022. – Vol. 125. – P. 103960.
- [2] Busza Wit, Rajagopal Krishna, van der Schee Wilke. Heavy Ion Collisions: The Big Picture and the Big Questions // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. – 2018. – Vol. 68. – P. 339–376.
- [3] The rise and fall of multifragment production in  $^{197}\text{Au} + \text{C}$ ,  $\text{Al}$ , and  $\text{Cu}$  reactions at  $E/A = 600$  MeV / W. Trautmann, J.C. Adloff, M. Begemann-Blaich et al. // Nucl. Phys. A. – 1992. – Vol. 538. – P. 473–481.
- [4] Loizides C., Kamin J., D’Enterria D. Improved Monte Carlo Glauber predictions at present and future nuclear colliders // Phys. Rev. C. – 2018. – Vol. 97. – P. 054910.
- [5] Statistical simulation of the break-up of highly excited nuclei /A. Botvina, A. Iljinov, I. Mishustin et al. // Nucl. Phys. A. – 1987. – Vol. 475. – P. 663–686.
- [6] EMU-01/12 collaboration. Multifragmentation of Gold nuclei in the interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 GeV/nucleon // Z. Phys. A: Hadrons Nucl. – 1997. – Vol. 359. – P. 277–290.
- [7] Multifragmentation of spectators in relativistic heavy-ion reactions /A. Botvina, I. Mishustin, M. Begemann-Blaich et al. // Nucl. Phys. A. – 1995. – Vol. 584. – P. 737–756.
- [8] Channels of projectile fragmentation of  $^{16}\text{O}$  nucleus in nuclear emulsion / M. S. El-Nagdy, A. Abdelsalam, B. M. Badawy et al. // J. Phys. Commun. – 2018. – Vol. 2.
- [9] Centrality determination of Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with ALICE / B. Abelev, J. Adam, D. Adamová et al. // Phys. Rev. C. – 2013. – P. 044909.

- [10] Application of FHCAL for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment / Vadim Volkov, Marina Golubeva, Fedor Guber et al. // *Particles*. – 2021. – Vol. 4. – P. 236–240.
- [11] Klochkov, Selyuzhenkov I, for the CBM collaboration. Centrality determination in heavy-ion collisions with the CBM experiment // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 798. – P. 012059.
- [12] The Construction and Parameters of Forward Hadron Calorimeter (FHCAL) at MPD/NICA / D Finogeev, M Golubeva, F Guber et al. // *KnE Energy*. – 2018. – Vol. 3. – P. 149.
- [13] Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions / S.A.Bass, M. Belkacem, M. Bleicher et al. // *Prog. Part. Nucl. Phys.*–1998. – Vol. 41. – P. 255–369.
- [14] Cassing W., Bratkovskaya E.L. Hadronic and electromagnetic probes of hot and dense nuclear matter // *Phys. Rep.* – 1999. – Vol. 308. – P. 65–233.
- [15] Transport-theoretical description of nuclear reactions / O. Buss, T. Gaiatos, K. Gallmeister et al. // *Phys. Rep.* – 2012. – Vol. 512. – P. 1–124. – Transport-theoretical Description of Nuclear Reactions.
- [16] Aichelin Jörg. “Quantum” molecular dynamics — a dynamical microscopic n-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions // *Physics Reports*.–1991.–Vol. 202. – P. 233–360.
- [17] Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM / M. Baznat, A. Botvina, G. Musulmanbekov et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* – 2020. – Vol. 17. – P. 303–324.
- [18] Uzhinsky V. V. The Fritiof (FTF) Model in Geant4 // *International Conference on Calorimetry for the High Energy Frontier*. – 2013. – P. 260–264.
- [19] Galoyan A. S., Uzhinsky V. V. Monte Carlo event generators for NICA /MPD and CBM experiments // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2016. – Vol. 80. – P. 333–337.
- [20] Spectator Nucleons in Pb+Pb Collisions at 158 A GeV/H. Appelshäuser, J. Bächler, S.J. Bailey et al. // *Eur.Phys. J.A.*–1998. –Vol. 2.– P. 383–390.



Научное издание

Светличный Александр Олегович

Свойства спектаторной материи  
в столкновениях релятивистских ядер

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,0 Зак. № 22527 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а