

*На правах рукописи*

Дмитриева Ульяна Александровна

Изучение ультрапериферических  
столкновений ядер на коллайдерах

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**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:**

*Варламов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, отдел электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер, главный научный сотрудник.

*Нигматкулов Григорий Александрович*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Офис образовательных программ Отделения ядерной физики и технологий, доцент.

**Ведущая организация:**

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 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 и на сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.119.01,  
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

## Общая характеристика работы

### **Актуальность темы исследования.**

Одним из важнейших направлений современной ядерной физики и физики элементарных частиц является изучение столкновений частиц и ядер высоких энергий. Эксперименты по столкновениям встречных пучков протонов и ядер выполняются на Большом адронном коллайдере LHC [1] (англ. Large Hadron Collider) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве, на коллайдере RHIC (англ. Relativistic Heavy Ion Collider) в Брукхэйвенской национальной лаборатории, штат Нью-Йорк. В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне создается новый ускорительный комплекс NICA (англ. Nuclotron based Ion Collider fAcility), который позволит изучать как столкновения протонов и дейтронов, так и столкновения ядер. В столкновениях тяжелых релятивистских ядер основной интерес физиков обычно сосредоточен на изучении горячего и плотного фэйрбола — сильновзаимодействующей материи в области перекрытия сталкивающихся ядер. В условиях экстремально высоких температуры и плотности энергии предсказывается возможность фазового перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму (КГП) — особое состояние вещества, в котором, как предполагается, существовала наша Вселенная в первые микросекунды после Большого взрыва. Для экспериментального подтверждения такого фазового перехода необходимо сортировать события по прицельному параметру  $b$  — расстоянию между центрами сталкивающихся ядер в плоскости, поперечной оси пучка, — или по степени центральности (англ. centrality), величина которой непосредственно связана с прицельным параметром и выводится из сравнения экспериментальных данных с результатами Монте-Карло моделирования. Сравнение разнообразных величин, измеренных в центральных событиях, с теми же величинами, измеренными в периферических столкновениях, может служить доказательством обнаружения фазового перехода адронной материи в КГП. Таким образом, программы экспериментов на коллайдерах RHIC и LHC в основном ориентированы на изучение центральных событий со значительным перекрытием ядерных плотностей, в которых доминируют сильные взаимодействия и наблюдается множественное рождение частиц в результате столкновений нуклонов-партисипантов (англ. participant — участник). Однако в последние десятилетия широко обсуждаются и ультрапериферические столкновения (УПС), где величина прицельного параметра превышает сумму радиусов сталкивающихся ядер и отсутствует их геометрическое перекрытие:  $b \geq R_1 + R_2$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы сталкивающихся ядер. В таких столкновениях ядра целиком выступают в качестве зрителей (англ. spectator — наблюдатель), и их взаимодействие имеет исключительно к электромагнитный характер [2].

Кулоновские поля сталкивающихся ядер приводят к их разрушению в УПС. Это явление известно как электромагнитная диссоциация (ЭМД) ядер. Наиболее вероятными каналами ЭМД являются эмиссия одного или несколь-

ких нуклонов с образованием единственного ядра-остатка [7]. При ультрарелятивистских энергиях ЛНС нуклоны от ЭМД будут вылетать в достаточно узкий конус с осью, совпадающей с направлением движения пучка в точке взаимодействия, что позволяет регистрировать такие нуклоны относительно компактными в поперечных размерах адронными калориметрами. Например, установка ALICE (англ. A Large Ion Collider Experiment) на ЛНС, созданная специально для изучения столкновений тяжелых ядер, снабжена передними адронными калориметрами ZDC (англ. Zero Degree Calorimeters), расположенными с обеих сторон от точки взаимодействия ядер и позволяющими регистрировать как нейтроны, так и протоны от ЭМД. Ранее коллаборацией ALICE [4] с помощью ZDC были измерены сечения эмиссии одного, двух и трех нейтронов от ЭМД в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  с энергией в системе центра масс на нуклонную пару  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$  ТэВ, и было показано, что суммарное сечение эмиссии 1–3 нейтронов составляет  $\sim 67\%$  для данной энергии столкновений. Подобный результат ( $\sim 72\%$ ) предсказывает и модель релятивистской электромагнитной диссоциации ядер RELDIS (англ. Relativistic ELeCtromagnetic DISsociation) [5], разработанная специально для описания фрагментации ультрарелятивистских ядер под действием интенсивных электромагнитных полей.

По сравнению с сечением неупругого адронного взаимодействия ядер, составляющего несколько барн, сечения ультрапериферических электромагнитных взаимодействий тяжелых ядер велики, и такие интенсивные взаимодействия ядер на ЛНС приводят к потере циркулирующих в ускорителе ядер, что существенно ограничивает светимость коллайдера и время жизни пучков в ускорителях [6]. С точки зрения стабильного функционирования коллайдера, наиболее критичными являются те электромагнитные взаимодействия, которые приводят к потерям ионов пучка за счет небольшого изменения их отношения заряда к массе, к ним, в том числе, относится и ЭМД. В результате ЭМД меняется магнитная жесткость [6], определяемая как отношение импульса  $p$  частицы к ее заряду  $p/Ze = (B\rho)$ , где  $\rho$  — радиус траектории частицы в магнитном поле  $B$ . При одновременном испускании нейтронов и протонов величина магнитной жесткости остаточного ядра может сохраняться близкой к таковой для ядер пучка, что приводит к движению остаточных ядер по траекториям, близким к траектории ядер пучка. Такие ядра могут проходить через систему коллиматоров ускорителя, предназначенных для удаления продуктов взаимодействий ядер в точках взаимодействия, и создавать радиационную и тепловую нагрузку на конструкционные элементы ЛНС [8]. В том числе, часть вторичных ядер попадает в сверхпроводящие магниты ЛНС, нагревая их, что может привести к квенчингу магнитов — потере сверхпроводимости [6, 8]. Однако на сегодняшний день ни на RHIC, ни на ЛНС образование заряженных спектаторных фрагментов не изучалось.

Сейчас активно обсуждается проект будущего кольцевого коллайдера FCC [11] (англ. Future Circular Collider), запуск которого планируется после 2040 года. В качестве одной из опций проект FCC включает в себя адрон-адронный

коллайдер FCC-hh. Обсуждается возможность протон-протонных столкновений при энергии  $\sqrt{s} = 100$  ТэВ, или в пересчете на  $^{208}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}$  столкновения [12]  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 39$  ТэВ, что в  $\sim 8$  раз выше энергии, достигнутой к настоящему моменту на ЛНС. При создании проекта FCC-hh необходимо учитывать электромагнитные процессы, как для расчета потерь светимости и тепловой нагрузки от ЭМД, так и при выборе ядер для физической программы.

Кроме процесса ЭМД, за счет кулоновского взаимодействия возможно и возбуждение низколежащих дискретных уровней ниже порога энергии эмиссии нейтрона из ядра, которое приводит к испусканию фотонов. Этот процесс подобен ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ), которая подробно изучалась в экспериментах с реальными фотонами и предложена, в частности, для неразрушающего контроля отработанного ядерного топлива. Были исследованы [13] свойства многочисленных дискретных возбужденных ядерных состояний в ядрах свинца  $^{204,206,207,208}\text{Pb}$  ниже порога эмиссии нейтронов. На ЛНС вылетающие вперёд фотоны регистрировались только в эксперименте LHCf в протон-протонных и протон-свинцовых столкновениях, но ЯРФ пока не изучалась. Такие исследования представляют междисциплинарный интерес, поскольку ядерная структура  $^{208}\text{Pb}$ , которая обычно изучается в физике низких энергий, также может быть исследована в экспериментах по физике высоких энергий как на ЛНС, так и на FCC-hh

Таким образом, теоретическое и экспериментальное изучение ЭМД и ЯРФ в УПС тяжелых ядер в коллайдерах заполняет пробел в исследованиях ультрарелятивистских столкновений, где основное внимание уделяется адронным взаимодействиям. Полученные результаты могут быть применены при создании новых ускорительных установок.

### **Общая цель и конкретные задачи работы.**

Целью работы является изучение ультрапериферических столкновений ядер на коллайдерах ЛНС, FCC-hh и NICA, а именно:

1. Моделирование УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  на ЛНС и ядер золота  $^{197}\text{Au}$  на NICA с помощью модели RELDIS для вычисления сечений образования вторичных ядер и сечений эмиссии соответствующего числа нейтронов и протонов; сравнение этих сечений.
2. Сравнение ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  и индия  $^{115}\text{In}$  для их использования в качестве ядер пучка на ЛНС и на FCC-hh с точки зрения нуклон-нуклонной светимости.
3. Моделирование процессов ядерной резонансной флуоресценции в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  при энергиях ЛНС и проектируемого коллайдера FCC-hh.
4. Создание комбинаторной модели для определения эффективности регистрации нейтронов и протонов в передних адронных калориметрах с учетом их ограниченного акцептанса.

5. Монте-Карло моделирование ЭМД ядер  $^{208}\text{Pb}$  в эксперименте ALICE на LHC для вычисления поправок на эффективность регистрации нуклонов нейтронными и протонными калориметрами ZDC и сравнение результатов моделирования с предсказаниями разработанной комбинаторной модели.
6. Вычисление сечений образования различных вторичных ядер, посредством измерения сечений эмиссии нейтронов и протонов вперёд, на основе данных собранных калориметрами ZDC в сеансах столкновений ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  на LHC.

**Научная новизна данной работы** состоит в том, что впервые был предложен способ учета ограниченного акцептанса для вычисления энерговыделения в передних адронных калориметрах; данный способ может быть использован для любых калориметров с известными для него характеристиками энергетического разрешения и акцептанса. Впервые выполнено моделирование ЭМД ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  для установки ALICE, а именно для нейтронных и протонных калориметров ZDC, и вычислены эффективности регистрации для каналов различной множественности нуклонов. Впервые были получены данные по эмиссии нейтронов и протонов на рекордной на данный момент энергии столкновений  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  ТэВ. Эти данные были получены с учетом вычисленных эффективностей регистрации нуклонов в ZDC. Впервые выполнено моделирование ЭМД ядер индия и свинца на проектируемом коллайдере FCC-hh. Впервые теоретически исследовано явление ЯРФ на коллайдерах LHC и FCC-hh.

### **Практическая ценность работы.**

Изучение ЭМД в эксперименте ALICE на LHC, помимо фундаментального научного значения, имеет практическую ценность. Во-первых, интенсивные электромагнитные взаимодействия ядер, сталкивающихся на встречных пучках LHC, приводят к потере циркулирующих в ускорителе ядер, что существенно ограничивает светимость коллайдера и время жизни пучков в ускорителях. Во-вторых, ядра с близкими к ядрам пучка LHC отношением заряда к массе проходят сквозь систему коллиматоров LHC 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 той или иной модели, однако ни прямые, ни косвенные измерения этих выходов на LHC не выполнялись. Задача измерения таких выходов становится особенно важной в свете подготовки работы LHC с увеличенной светимостью (англ. HL-LHC — High Luminosity LHC), а также при проектировании будущего коллайдера FCC-hh.

Разработанные в диссертационной работе методы вычисления эффективностей адронных калориметров могут быть использованы для анализа данных, собранных в других сеансах столкновений ядер в эксперименте ALICE на LHC, а разработанная комбинаторная модель может быть использована для любых

других установок, оснащенных передними адронными калориметрами, например, для установки MPD на строящемся коллайдере NICA в Дубне.

### **Методология и методы исследования.**

Моделирование ЭМД ядер выполнялось с помощью модели RELDIS, основанной на методе Монте-Карло и реализованной в виде компьютерного кода. Все вычисления и визуальное представление результатов реализованы путем написания компьютерного кода в пакете объектно-ориентированных программ и библиотек ROOT. Монте-Карло моделирование установки ALICE и анализ экспериментальных данных, собранных в эксперименте ALICE, выполнялись с помощью пакета объектно-ориентированных программ и библиотек AliPhysics, основанном на ROOT.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. С помощью модели Relativistic ELeCtromagnetic DISSociation (RELDIS), разработанной ранее в ИЯИ РАН И. А. Пшеничным с соавторами, вычислены сечения образования вторичных ядер, нейтронов и протонов в результате электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  в их ультрапериферических столкновениях (УПС) на LHC и ядер золота  $^{197}\text{Au}$  на NICA.
2. На основе моделирования с помощью RELDIS  $^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$  и  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  взаимодействий на коллайдерах LHC и FCC-hh исследованы выходы вторичных ядер, оценены соотношения электромагнитных и адронных событий в точках взаимодействия.
3. Вычислены дифференциальные распределения по углам вылета, энергиям и псевдобыстроте фотонов от ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ), индуцированной фотонами Вайцзеккера – Вильямса, в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  на коллайдерах LHC и FCC-hh; вычислены полные сечения ЯРФ.
4. Разработана комбинаторная вероятностная модель для вычисления энерговыделения в передних адронных калориметрах с учетом их ограниченного акцептанса при попадании в них нуклонов от ЭМД. Метод был применен к:
  - а. калориметру FHCAL эксперимента MPD (NICA, Дубна) для столкновений ядер золота  $^{197}\text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}}$  от 4 до 11 ТэВ;
  - б. передним нейтронным и протонным калориметрам ZDC эксперимента ALICE для столкновений ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  и 5.02 ТэВ.
5. На основе Монте-Карло моделирования ЭМД в  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ посредством RELDIS в пакете объектно-ориентированных программ и библиотек AliPhysics эксперимента ALICE были

вычислены поправочные коэффициенты на эффективность регистрации в ZDC событий с нейтронами и протонами определенной множественности.

6. В результате анализа экспериментальных данных по  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  столкновениям, собранных коллаборацией ALICE на LHC в 2018 году, были измерены сечения эмиссии нейтронов и протонов от ЭМД с учетом вычисленных поправок на эффективность регистрации нуклонов. С помощью RELDIS оценены выходы соответствующих вторичных ядер-остатков, образующихся в ЭМД, показано доминирование событий с малыми энергиями возбуждения.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- 59-ая научная конференции МФТИ с международным участием, Долгопрудный, МФТИ, 26.11.2016;
- VII межинститутская молодёжная конференция «Физика элементарных частиц и космология 2018», Москва, ФИАН, 09.04.2018;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, 10.04.2018;
- VII международная молодежная научная школа-конференции «Современные проблемы физики и технологий», Москва, НИЯУ МИФИ, 18.04.2018;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, 10.04.2019;
- 64-ая Всероссийская научная конференции МФТИ, Долгопрудный, МФТИ, 02.12.2021,

а также на регулярных совещаниях физической рабочей группы коллаборации ALICE по теме ультрапериферических столкновений.

### **Публикации по теме диссертации.**

Материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах [1а, 2а, 4а, 3а, 5а, 6а] и в 3 статьи в сборниках трудов конференций [8а, 9а, 10а].

### **Личный вклад автора.**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, 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:

- Моделирование ультрапериферических столкновений ядер с помощью модели RELDIS.

- Теоретическое изучение ядерной резонансной флуоресценции на LHC и FCC-hh, вывод формул и написание кода в программной среде ROOT для визуального представления результатов.
- Разработка комбинаторной модели для описания спектров энерговыделения в передних адронных калориметрах и их эволюции в зависимости от энергии пучка и аксептанса калориметра, которая дает выражения, связывающие числа испущенных и зарегистрированных нуклонов от электромагнитной диссоциации. Написание кода в программной среде ROOT для вычисления поправочных коэффициентов на эффективность регистрации нуклонов и визуального представления результатов.
- Подбор оптимальных входных параметров Монте-Карло моделирования в пакете объектно-ориентированных программ и библиотек AliPhysics, разработка методов вычисления эффективности регистрации нуклонов передними адронными калориметрами ZDC, написание кода для решения указанных задач.
- Написание кода в программной среде AliPhysics для анализа данных, собранных в эксперименте ALICE посредством калориметров ZDC.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка публикаций, списка цитированной литературы и приложения. Работа изложена на 145 страницах, включая 41 рисунок, 32 таблицы и список цитированной литературы, содержащий 78 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. В разделе представлены выносимые на защиту основные результаты, сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе** описываются методы моделирования ультрапериферических столкновений (УПС) ядер. УПС характеризуются прицельным параметром  $b$ , превосходящим сумму радиусов сталкивающихся ядер ( $b > R_1 + R_2$ ). Представлен метод виртуальных фотонов Вайцеккера – Вильямса, удобный для описания УПС, в которых не происходит перекрытия ядерных плотностей сталкивающихся ядер, а взаимодействие носит исключительно электромагнитный характер. Согласно методу Вайцеккера – Вильямса влияние лоренц-сжатого кулоновского поля первого ядра  $A_1$  на ядро  $A_2$  в системе покоя последнего можно свести к поглощению ядром-мишенью  $A_2$  одного или нескольких эквивалентных фотонов, испущенных ядром  $A_1$ . Спектр виртуальных фотонов, излучаемый ядром с зарядом  $Z_1$ , для случая ультррелятивистских столкновений

( $\gamma \gg 1$ ) дается следующим выражением:

$$n(E_\gamma) = \frac{2\alpha Z_1^2}{\pi\beta^2 E_\gamma} \left( xK_0(x)K_1(x) - \frac{x^2\beta^2}{2}(K_1^2(x) - K_0^2(x)) \right),$$

где  $x = \omega b/\gamma v = E_\gamma b/\gamma\beta\hbar c$ . Далее в первой главе перечисляются основные физические процессы, происходящие при поглощении фотонов ядрами. В результате электромагнитных взаимодействий ядра могут терять не только отдельные нейтроны, но и отдельные протоны с образованием тяжелого остатка, или же претерпевать распады на два и более фрагментов. Такие процессы называются электромагнитной диссоциацией (ЭМД) ядер.

В данной главе приводится описание модели RELDIS (Relativistic Electromagnetic DIssociation), использующей метод эквивалентных фотонов Вайцзеккера – Вильямса для описания ЭМД. Затем моделирование посредством RELDIS применяется к столкновениям ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  в их УПС на LHC и ядер золота  $^{197}\text{Au}$  на NICA. Вычисляются сечения выходов вторичных ядер и сечения эмиссии определенного числа нейтронов и протонов.

Наиболее важным является изучение образования в ЭМД ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  вторичных ядер с наибольшими сечениями образования и отношением заряда к массе близким к  $^{208}\text{Pb}$ , которые могут долгое время циркулировать вместе с ядрами пучка по близким траекториям, а при сходе с них попадать в конструкционные элементы LHC, включая сверхпроводящие магниты. На Рис. 1 (слева) представлены сечения образования некоторых изотопов свинца Pb, таллия Tl и ртути Hg в зависимости от соответствующего отношения  $Z/A$  заряда к массе.

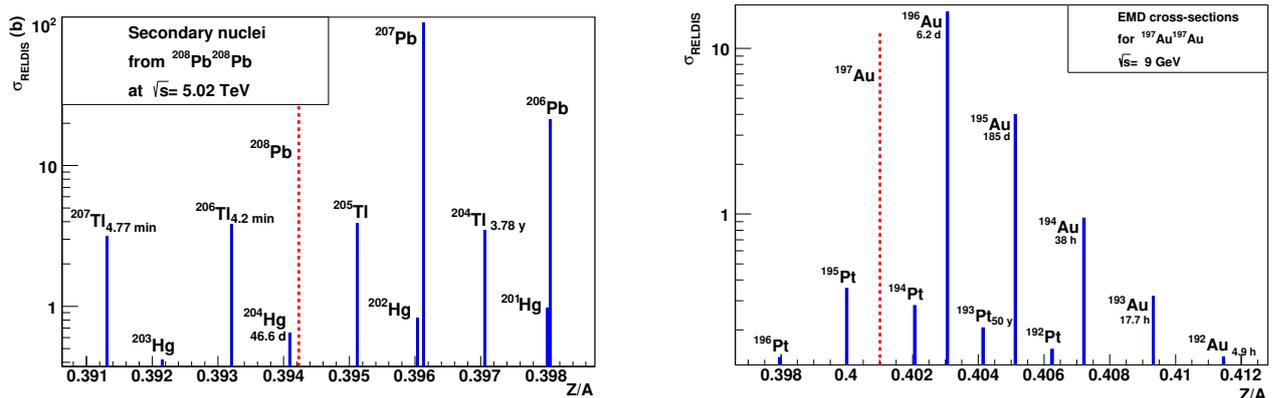


Рис. 1. Сечения образования фрагмента в зависимости от его отношения заряда к массе, предсказываемые моделью RELDIS для столкновений ядер  $^{208}\text{Pb}$  на LHC с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ [9a] (слева) и для столкновений ядер  $^{197}\text{Au}$  на NICA с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ [3a] (справа). Отношение  $Z/A$  начального ядра представлено пунктирной линией. На рисунках также приведены периоды полураспада  $t_{1/2}$  для нестабильных ядер.

RELDIS позволяет вычислять как сечения выходов различных вторичных

ядер, так и отдельные сечения выходов нейтронов и протонов, которые могут быть напрямую измерены в эксперименте ALICE на LHC посредством передних адронных калориметров ZDC (англ. Zero Degree Calorimeters). Вычисления с помощью RELDIS подтверждают возможность оценки сечений образования отдельных изотопов из измеренных сечений эмиссии соответствующего числа нейтронов и протонов. Для подтверждения данной гипотезы были вычислены значения  $\Delta A = A_{res} + N_n + N_p - 208$  (разность между суммой массового числа самого тяжелого остаточного ядра  $A_{res}$  и числами испущенных нуклонов  $N_n$  и  $A$  исходного  $^{208}\text{Pb}$ ) и  $\Delta Z = Z_{res} + N_p - 82$  (разность между суммой заряда самого тяжелого остаточного ядра  $Z_{res}$  и числа испущенных протонов  $N_p$  и  $Z$  исходного ядра  $^{208}\text{Pb}$ ) в зависимости от  $N_n$ . Согласно RELDIS, только полпроцента событий характеризуются  $\Delta A < 0$  или  $|\Delta Z| > 0$ , и в таких редких случаях остаточное ядро не может быть однозначно идентифицировано по количеству испущенных нуклонов. Однако, в большинстве событий ЭМД для оценки  $A_{res}$  и  $Z_{res}$  достаточно измерить  $N_n$  и  $N_p$ . Далее в главе сравниваются сечения образования изотопов свинца Pb, таллия Tl и ртути Hg и сечения эмиссии соответствующего числа нейтронов и протонов, обсуждается возможность оценки сечений образования данных изотопов посредством регистрации нуклонов.

RELDIS позволяет моделировать столкновения ядер как при энергиях LHC (2.76 – 5.02 ТэВ), так и при энергиях строящегося ускорительного комплекса NICA (4 – 11 ГэВ). Столкновения тяжелых ядер на NICA планируется изучать с помощью многоцелевого детектора MPD (англ. Multi-Purpose Detector). В отличие от установки ALICE, в эксперименте MPD не будет возможности регистрировать все спектаторные нуклоны от ЭМД, однако он будет оснащен передним адронным калориметром FHCAL (англ. Forward Hadron Calorimeter), предназначенным для регистрации части фрагментов-спектаторов и других продуктов взаимодействия, имеющих быстроты, близкие к скорости пучка  $^{197}\text{Au}$ . Калориметр FHCAL имеет центральное отверстие, через которое проходят встречные пучки, поэтому можно ожидать, что заметная часть продуктов ЭМД  $^{197}\text{Au}$  (их доля зависит от энергии столкновений) не попадет в FHCAL и будет взаимодействовать с элементами конструкции NICA. Посредством RELDIS были посчитаны средние множественности нейтронов, протонов и пионов ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$  и  $\pi^-$ ), испущенных в результате ЭМД для УПС ядер золота  $^{197}\text{Au}$  при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 4, 6, 9$  и 11 ГэВ на нуклотроне NICA. Данные результаты могут быть использованы для оценки воздействия вторичных частиц и ядер на компоненты NICA. Благодаря характерной зависимости  $1/E_\gamma$  спектра виртуальных фотонов Вайцзеккера – Вильямса, для столкновений на NICA доминирует поглощение фотонов с энергиями до нескольких десятков МэВ, возбуждение гигантского дипольного резонанса в  $^{197}\text{Au}$  с его последующим распадом через эмиссию нейтронов и образованием единственного тяжелого ядра-остатка, представленного различными изотопами золота. На Рис. 1 (справа) представлены сечения образования в ЭМД изотопов золота Au и платины Pt вместе с периодами полураспада  $t_{1/2}$  для нестабильных изотопов при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ столкновений

на NICA.

Результаты первой главы опубликованы в работах [3а, 5а, 9а, 10а].

**Во второй главе**, следуя работе [4а], моделирование с помощью RELDIS применяется для сравнительного анализа взаимодействий  $^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$  и  $^{115}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  на коллайдерах LHC при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ и FCC-hh при  $\sqrt{s_{NN}} = 39.4$  ТэВ.

Соотношения между уровнями адронных и электромагнитных, представленных ЭМД ядер и рождением электрон-позитронных пар (англ. Bound Free Pair Production), процессов в коллайдерах определяются соответствующими сечениями:  $\sigma_{\text{had}}$ ,  $\sigma_{\text{EMD}}$  и  $\sigma_{\text{BFPP}}$ . В работе [4а] вычислены полные адронные сечения  $\sigma_{\text{had}}$  для столкновений индия In–In и свинца Pb–Pb, соответственно, с помощью модифицированной модели abrasion-ablation и модели Глаубер Монте-Карло 3.0, а сечения электромагнитной диссоциации  $\sigma_{\text{EMD}}$  рассчитаны с помощью модели RELDIS. Различные состояния атомов для электронов, захваченных  $^{208}\text{Pb}$ , учитывались при расчете  $\sigma_{\text{BFPP}}$  на основе приближения  $\sigma_{\text{BFPP}} = A \ln \gamma_c + B$ , затем данные сечения для Pb–Pb были уменьшены на фактор  $Z^7$ , чтобы получить  $\sigma_{\text{BFPP}}$  для In–In. Все эти сечения представлены в Таблице 1 для столкновений  $^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$  и  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  на LHC и FCC-hh вместе с их суммами  $\sigma_{\text{tot}}$  в каждом случае. Как видно из Таблицы 1, сечения  $\sigma_{\text{EMD}}$  и  $\sigma_{\text{BFPP}}$  для Pb–Pb существенно больше, чем для In–In.

Таблица 1. Сечения адронного и электромагнитных взаимодействий ядер индия  $^{115}\text{In}$  и свинца  $^{208}\text{Pb}$  на коллайдерах LHC и FCC-hh. Таблица из работы [4а].

Сечение (б)	LHC		FCC-hh	
	$^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$ $\sqrt{s_{NN}} =$ 5.54 ТэВ	$^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ $\sqrt{s_{NN}} =$ 5.02 ТэВ	$^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$ $\sqrt{s_{NN}} =$ 42.6 ТэВ	$^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ $\sqrt{s_{NN}} =$ 39.4 ТэВ
$\sigma_{\text{had}}$	5.34	7.66	5.47	7.9
$\sigma_{\text{EMD}}$	40.4	211.4	53.8	284.2
$\sigma_{\text{BFPP}}$	$\sim 7.4$	271.8	$\sim 9.4$	344.
$\sigma_{\text{tot}}$	53.	491.	68.7	636.
$\sigma_{\text{had}}/\sigma_{\text{tot}}$ (%)	10	1.6	8	1.2

Сравнение сечений адронных и электромагнитных взаимодействий позволяет сделать вывод, что использование пучков ядер промежуточной массы, таких как  $^{115}\text{In}$ , имеет преимущество по величине эффективной нуклон-нуклонной светимости на коллайдерах LHC и FCC-hh.

Результаты второй главы опубликованы в работе [4а].

**В третьей главе**, следуя изложению работы [6а], на основе метода виртуальных фотонов Вайцеккера – Вильямса изучается процесс ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). ЯРФ — это процесс возбуждения ядра фотоном

$\gamma$  с последующим распадом возбужденного (резонансного) состояния с испусканием другого фотона  $\gamma'$  и образованием конечного ядра в более низколежащем состоянии. Аналогичный процесс можно наблюдать и в УПС ядер при поглощении виртуального фотонов ядром. В данной главе приводится сечение фотопоглощения  $\sigma(E_\gamma)$ , приводящего к переходу из основного состояния ядра со спином  $J_0$  в изолированное резонансное ядерное состояние с энергией  $E_r$ , полной шириной  $\Gamma_r$  и спином  $J_r$ , описываемое формулой Брейта – Вигнера. Интегральное сечение рассматриваемого возбужденного состояния с энергией  $E_r$  вычисляется как  $I(E_r) = \int dE_\gamma \sigma(E_\gamma)$ . Далее из выражений для  $I(E_r)$  и спектра виртуальных фотонов  $n_{\text{WW}}(E_\gamma)$  напрямую вычисляется сечения ЯРФ  $\sigma_{\text{NRF}}(E_r)$  в УПС для данного резонансного состояния  $E_r$ . Вариациями спектра Вайцзеккера – Вильямса  $n_{\text{WW}}(E_\gamma)$  в пределах очень малой ширины резонанса  $\Gamma_r$  можно пренебречь, а  $n_{\text{WW}}(E_\gamma)$  может быть представлен своим значением в  $E_r$  для вычисления сечения каждого резонансного состояния:

$$\sigma_{\text{NRF}}(E_r) = n_{\text{WW}}(E_r)I(E_r) = \frac{\pi}{2}n_{\text{WW}}(E_r)\Gamma_r\sigma_{\text{max}}(E_r) .$$

Вычисленные сечения ЯРФ представлены на Рис. 2. Как видно из этого рисунка, вклад низколежащих уровней усиливается, поскольку спектр Вайцзеккера – Вильямса  $n_{\text{WW}}(E_\gamma) \sim 1/E_\gamma$ . В результате, вклад первых четырех уровней ( $\sim 58\%$ ) доминирует при обеих энергиях столкновения. Сумма сечений ЯРФ для всех рассмотренных уровней составляет 4.15 б и 5.16 б, соответственно, при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  и 39.4 ТэВ.

В главе вычисляется угловое распределение фотонов, испускаемых в системе покоя ядра. Наблюдается так называемый прожекторный эффект — в лабораторной системе отсчета в случае ультрарелятивистских ядер практически все фотоны испускаются в узкий конус с раствором  $\delta\theta \sim 1/\gamma$ , ось которого направлена вдоль начального импульса ядра. Таким образом, все фотоны от ЯРФ могут быть зарегистрированы довольно компактным передним детектором. Также были вычислены распределения испущенных в процессе ЯРФ фотонов по энергии и псевдобыстроте в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  на коллайдерах ЛНС и FCC-hh. Исследовано влияние времени жизни уровня и показано, что типичное расстояние между точкой взаимодействия  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  и местом эмиссии фотона оказывается меньше ошибки определения продольного положения вершины первичного взаимодействия.

Таким образом, в Главе 3 рассмотрен процесс ЯРФ, индуцированной фотонами Вайцзеккера – Вильямса, в УПС ультрарелятивистских ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  на ЛНС и FCC-hh, а результаты были опубликованы в работах [6a] и [8a] .

**В четвертой главе** описывается разработанная автором [1a] простая вероятностная комбинаторная модель для вычисления энерговыделения в передних адронных калориметрах с учетом эффективности калориметра, которая дает удобные формулы для связи числа испущенных и зарегистрированных нуклонов. Результаты данной модели являются менее точными, чем результаты

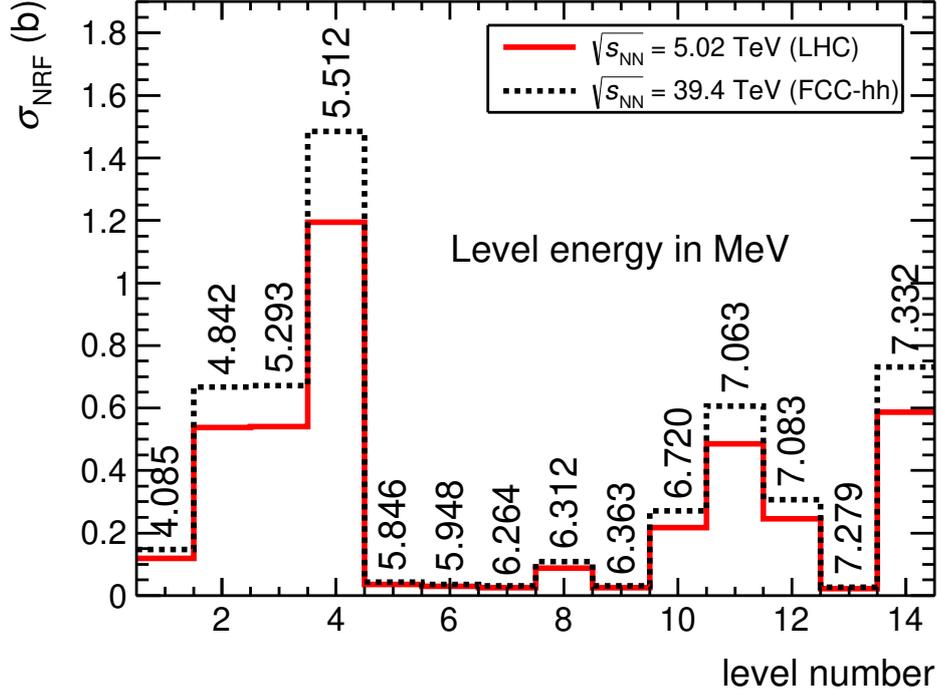


Рис. 2. Сечения ЯРФ для УПС  $^{208}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}$  на LHC и FCC-hh, соответственно, при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  ТэВ (сплошная гистограмма) и при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 39.4$  ТэВ (пунктирная гистограмма). Рисунок из работы [6a].

Монте-Карло моделирования, которые учитывают фактическую энергию пучка, геометрические размеры и положение ZDC и эффективность регистрации нуклонов, однако демонстрируют общие особенности детектирования событий эмиссии нуклонов от ЭМД с помощью передних адронных калориметров, далее для краткости называемых ZDC.

Распределение энергии в ZDC для однонуклонных событий принято характеризовать распределением Гаусса со средним  $\mu_1$ , равным энергии пучка  $E_0$ , и дисперсией  $\sigma_1$ , также зависящей от  $E_0$ . В эксперименте ALICE выходы событий с определенной множественностью извлекаются из спектров ZDC с помощью их фитирования суммой гауссианов, где каждый гауссиан, соответствующий  $i = 1, 2, \dots, 4$  нуклонов, испущенных в ЭМД, характеризуется средним значением  $\mu_i = i\mu_1$ , дисперсией  $\sigma_i = \sqrt{i}\sigma_1$  и нормировочным коэффициентом  $N_i$ , который пропорционален количеству зарегистрированных событий с  $i$  нуклонами. В случае ограниченного акцептанса ZDC, часть нуклонов либо вообще не попадает в калориметр, либо в ZDC поглощается только часть их энергии благодаря периферическому расположению ливня вторичных частиц. В данной модели количества  $n_i$  зарегистрированных событий с  $i$  нуклонами связываются с количеством исходных событий  $N_i$  с данной множественностью. Модель применена к спектрам от ЭМД, в которой доминируют одно- и двухнуклонные

события. Благодаря этому доминированию достаточно рассмотреть эмиссию от одного до четырех нуклонов, чтобы найти связь между  $n_1, n_2, n_3, n_4$  и  $N_1, N_2, N_3, N_4$  с помощью верхнетреугольной матрицы преобразований  $\mathbf{P}$ , диагональные элементы которой представляют собой вероятности  $p_{11}, \dots, p_{44}$  зарегистрировать то же число нуклонов, что и было испущено. Внедиагональные элементы  $p_{kn}$ ,  $k < n$  представляют вероятность зарегистрировать  $k$  нуклонов вместо  $n$  испущенных. Можно предположить, что вероятность  $p$  зарегистрировать нуклон остается одинаковой как в событиях с малой, так и с большой множественностью. Это условие выполняется, когда распределение поперечных импульсов нуклонов слабо зависит от множественности события, и приводит к биномиальному распределению вероятностей  $p_{kn} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$  с параметром  $p$ , где  $\binom{n}{k} = n! / (n-k)! k!$ . Чтобы получить вектор *исходного* количества  $\mathbf{N}$  событий соответствующей множественности, следует применить обратное преобразование к вектору  $\mathbf{n}$  *зарегистрированных* событий. Обратная матрица  $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{R}$  размерностью  $4 \times 4$  получается аналитически и обобщается на общий случай, когда максимальное число испущенных нуклонов составляет  $m$ . Элементы обратной матрицы вычисляются как:

$$r_{kn} = (-1)^{n-k} \binom{n}{k} \frac{(1-p)^{n-k}}{p^n}.$$

Используя полученные формулы, можно изучить влияние эффективности регистрации нуклонов в ZDC на измеряемые  $n_i$ . Исходные выходы определенного числа нейтронов и протонов  $N_i$  вычислены с помощью модели RELDIS.

Далее в Главе 4 исследуются различные конфигурации величины  $p$  от 0.4 до 1 и энергетического разрешения ZDC  $\sigma_1/\mu_1$  от 0.15 до 0.2 для нейтронного ZDC и 0.17 до 0.3 для протонного ZDC для событий ЭМД в УПС  $^{208}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}$  на LHC. Хорошее разрешение ZDC имеет решающее значение для надежных измерений числа испущенных вперед нуклонов. Это иллюстрируется спектрами энерговыделения в ZDC, показанными на Рис. 3, которые были смоделированы для более низкого разрешения. Для вероятности регистрации одиночного нейтрона и энергетического разрешения ZDC были использованы значения  $p = 0.97$  и  $\sigma_1/\mu_1 = 0.2$  для нейтронного ZDC. Для протонного ZDC было использовано более низкое разрешение  $\sigma_1/\mu_1 = 0.3$  и вероятность регистрации  $p = 0.66$ .

Как видно из Рис. 3, низкое разрешение протонного ZDC затрудняет идентификацию 2p и 3p каналов EMD даже при измерениях со 100%-ой эффективностью регистрации. Более того, пик 2p заметно плавится при снижении эффективности регистрации до  $p = 0.66$ , а вклады 3p- и 4p-каналов ЭМД становятся неотличимы от возможного плавного фонового вклада в протонные спектры энерговыделения в ZDC. Это еще раз демонстрирует эффект ошибочной идентификации многонуклонных событий как однонуклонных в измерениях с низкой эффективностью регистрации.

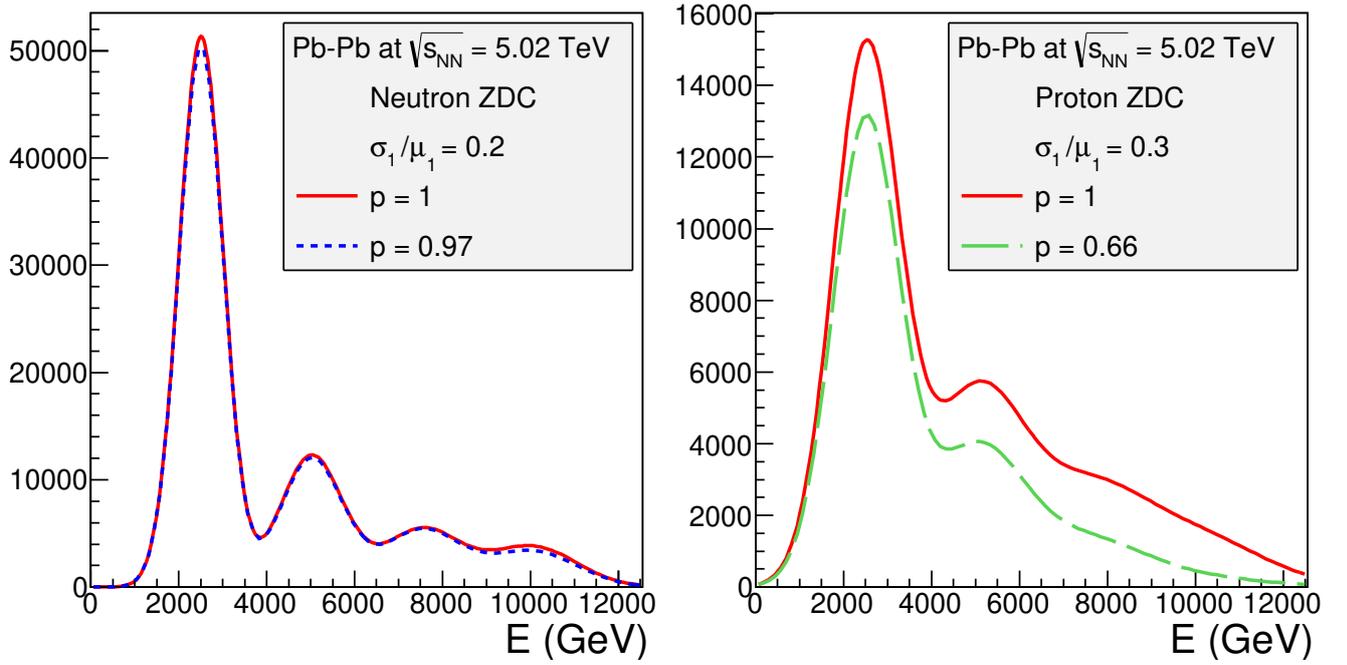


Рис. 3. Спектры энерговыделения в нейтронном (слева) and протонном (справа) ZDC для УПС  $^{208}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}$  на LHC с энергией  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV в эксперименте ALICE. Рисунок из работы [1a].

Аналогично вычислениям для LHC можно изучить влияние эффективности регистрации нуклонов в калориметре FHCAL на измеряемые  $n_i$ . Столкновения на NICA будут иметь значительно меньшую энергию по сравнению с LHC, для которой характерно меньшее число каналов ЭМД. Показано, что в спектрах энерговыделения в FHCAL трудно различить пики  $3n$  и  $3p$  даже при полном акцептансе детектора  $p = 1$ . Более того, пики  $2n$  и  $2p$  практически исчезают при наименьшем рассматриваемом акцептансе  $p = 0.5$ . В связи с этим, важно обеспечить высокую эффективность регистрации нуклонов, испущенных по направлению вперед, для изучения ЭМД ядер золота на NICA или мониторинга светимости NICA на основе регистрации сразу 1n- и 2n-каналов ЭМД.

Кроме того, в четвертой главе исследуется случай достаточно малого акцептанса ZDC и продемонстрирована возможность измерения инклюзивного сечения эмиссии нуклонов.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [1a] и [2a].

**В пятой главе** описывается разработанный [7a] метод вычисления поправок на эффективность передних адронных калориметров ZDC (англ. Zero Degree Calorimeters) эксперимента ALICE на основе Монте-Карло моделирования.

Эксперимент ALICE использует передние адронные калориметры ZDC для регистрации вылетающих вперед нейтронов и протонов. Как обсуждалось выше, эффективность ZDC снижается, когда некоторые из нуклонов многонуклонного события не попадают в калориметр. Например, один или два нуклона могут быть потеряны в трехнуклонном событии, которое может быть оши-

бочно идентифицировано, соответственно, как двух- или однонуклонное событие. Необходимо вычислить эффективность регистрации нуклонов ZDC отдельно для каждого класса множественности. Вычисленная эффективность регистрации нуклонов представляет собой произведение геометрического акцептанса ZDC и эффективности восстановления в ZDC множественности нуклонов, вылетающих вперед относительно оси пучка, для краткости это произведение будет называться «эффективностью», а его обратное значение — «поправочным коэффициентом».

Описанная в четвертой главе простая комбинаторная модель, далее P-метод, применяется к нейтронным ZN и протонным ZP калориметрам с использованием значений  $p = 0.9$  и  $p = 0.55$ , соответственно. Поправочные коэффициенты вычисляются как  $f_i^P = N_i^R/n_i^P$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, 5$ . Количества исходных событий каждой множественности  $i$ , вычисленные с помощью RELDIS, обозначаются как  $N_i^R$ . Полученные с помощью P-метода поправочные коэффициенты используются для сравнения с результатами, полученными при детальном Монте-Карло моделировании электромагнитной диссоциации (ЭМД) для УПС  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  на LHC с энергией  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV.

Для Монте-Карло моделирования отклика передних адронных калориметров ZDC был использован пакет объекто-ориентированных программ и библиотек AliPhysics эксперимента ALICE с использованием модели RELDIS в качестве генератора событий. Были смоделированы транспорт нуклонов, протонов и нейтронов, от ЭМД, их попадание на переднюю поверхность ZDC и энерговыделение в калориметрах. Разработано два метода, H- и S-методы, описываемые ниже, для вычисления поправочных коэффициентов на эффективность регистрации в ZDC 0 – 5 нейтронов (0n – 5n) и 0 – 3 протонов (0p – 3p).

H-метод основывается на подсчете числа нуклонов, попавших на поверхность передних адронных калориметров ZDC, далее называемых *хитами* (от англ. hit). Зарегистрированные события сортируются по количеству  $i = 0, 1, 2, \dots$  хитов в каждом событии для вычисления количества зарегистрированных событий  $n_i^H$  каждой множественности. Предполагается, что каждый нуклон, попадающий в калориметр ZN или ZP, создает сигнал, достаточный для его обнаружения. В H-методе также исследуется так называемый эффект кросстока (от англ. cross-talk), когда некоторые нейтроны попадают в протонные ZDC, а некоторые протоны — в нейтронные: около 0.5% протонов попадают в ZN и около 3% нейтронов попадают в ZP. При этом, нейтроны, попадающие в ZP, неотличимы от протонов и наоборот, что учитывается при вычислении поправочных коэффициентов  $f_i^H = N_i^R/n_i^H$ , где доли исходных событий  $N_i^R$  вычисляются с помощью RELDIS.

В дополнение к реализованному в H-методе транспорту нейтронов и протонов, испущенных вперед в ЭМД, S-метод включает в себя Монте-Карло моделирование энерговыделения в ZDC. Следуя S-методу, два различных распределения энергии, выделяемой нуклонами в ZN или ZP, могут быть извлечены из двух различных переменных, зависящих от способа восстановления энергии

из сигналов с различных фотоумножителей. Смоделированные спектры энерговыделения в ZDC были откалиброваны и отфитированы суммой гауссианов, чтобы извлечь количества зарегистрированных событий  $n_i^S$  каждой множественности нуклонов  $i$ . Метод фитирования аналогичен методу, применяемому к фитированию реальных данных. Поправочные коэффициенты  $f_i^S = N_i^R/n_i^S$  были вычислены в рамках S-метода с использованием долей исходных событий  $N_i^R$ , вычисленных с помощью RELDIS. Таким образом, вычисляются поправочные коэффициенты для всех четырех калориметров ZNC, ZNA, ZPC и ZPA с использованием двух опций заполнения спектров энерговыделения.

Результаты H- и S-методов находятся в согласии друг с другом и с результатами P-метода. Рекомендуемые поправочные коэффициенты на эффективность регистрации нейтронов и протонов отдельных множественностей вычисляются как среднее между поправочными коэффициентами, полученными с помощью H-метода и S-метода с одной из двух опций, а их систематическая ошибка вычисляется как разница значений, деленная на  $\sqrt{2}$ . Рекомендуемые поправочные коэффициенты показаны на Рис. 4. Как видно, вычисленные для сторон A и C  $f_i$  находятся в согласии друг с другом, а наибольшие относительные ошибки  $f_i$  обнаруживаются для каналов 0n и 3p.

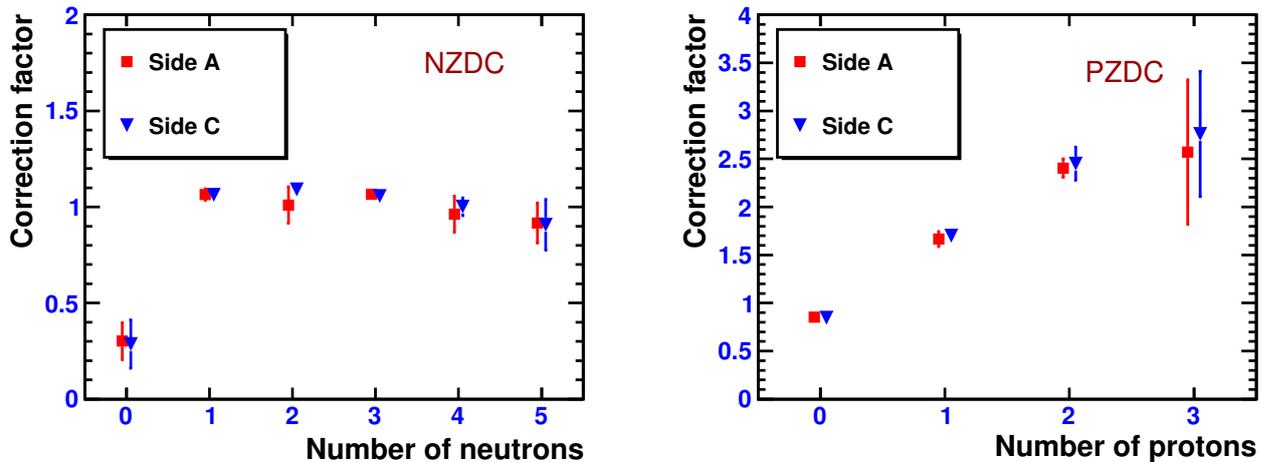


Рис. 4. Рекомендуемые поправочные коэффициенты, вычисленные для калориметров ZNA, ZNC (слева) и ZPA, ZPC (справа) как среднее между результатами S-метода (PMC) и H-метода и их комбинированные погрешности. Рисунок из работы [7a].

Еще одной важной характеристикой эффективности регистрации нуклонов в ZDC является вероятность  $\mathcal{P}_{Xn}$  ( $\mathcal{P}_{Xp}$ ) зарегистрировать хотя бы один нейтрон (или протон) при условии, что хотя бы один нейтрон  $Xn$  (или протон  $Xp$ ) был испущен в процессе ЭМД. Другими словами, эта величина характеризует эффективность регистрации активности в ZDC. Значения  $\mathcal{P}_{Xn}$  составляют  $0.92 \pm 0.04_{\text{syst.}}$  и  $0.90 \pm 0.06_{\text{syst.}}$  для активности в ZNA и ZNC, и  $0.52 \pm 0.07_{\text{syst.}}$  и  $0.50 \pm 0.05_{\text{syst.}}$  для активности в ZPA и ZPC, соответственно, а результаты для сторон A и C хорошо согласуются друг с другом. Ожидается, что всего  $\sim 10\%$  событий ЭМД с эмиссией нейтронов остаются незарегистрированными

в ZN, в то время как  $\sim 50\%$  событий ЭМД с эмиссией протонов оказываются незамеченными в ZP.

Для того, чтобы вычисленные P-методом  $f_i$  стали менее зависимы от RELDIS, можно попробовать использовать  $N_i$ , измеренные ALICE во время Run I,  $i = 1, 2, 3$ . Поправочные коэффициенты  $f_i$ , рассчитанные P-методом с  $p = 0.9$  на основе данных Run I ALICE по  $N_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , сравниваются с  $f_i$ , полученными с помощью  $N_i^R$  из RELDIS. Вычисленные отклонения между ними оказываются либо малы, либо в пределах относительных ошибок  $f_i$ , и поправочные коэффициенты  $f_i$ , полученные независимо из данных, очень хорошо согласуются с  $f_i$ , рассчитанными из результатов RELDIS.

На основе P-метода можно оценить величину отклонения измеренных сечений ЭМД из-за вариаций  $f_i$ . Для такой проверки стабильности можно предположить 10% вариацию вероятности  $p$  зарегистрировать нейтрон в ZN. При учете эмиссии  $1n - 4n$ , отклонение выходов  $1n - 3n$  находится в пределах отклонения значения  $p$ . Большие изменения наблюдаются только для выходов  $4n$  и  $3n$ , когда, соответственно, учитываются каналы  $1n - 4n$  и  $1n - 3n$ . Это указывает на важность учета событий высокой множественности ( $5n$ ) при расчете поправочных коэффициентов к  $0n - 4n$ . Аналогично, вклад  $3p$  важен при оценке поправочных коэффициентов к эмиссии  $0p - 2p$ .

Результаты 5 главы опубликованы в работе [7a] для внутреннего использования в коллаборации ALICE.

**В шестой главе** изучается электромагнитная диссоциация ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  в столкновениях в эксперименте ALICE на LHC. Анализируются данные, собранные в 2018 году в специальных, с пониженной светимостью и ориентированных на изучение ЭМД, сеансах  $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$  столкновений с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ.

Для анализа были использованы события, соответствующие ZED-триггеру, который чувствителен как к событиям одиночной электромагнитной диссоциации на сторонах A и C, так и к событиям взаимной диссоциации и адронным событиям, характеризующимся регистрацией нейтронов с обеих сторон от точки столкновения. Спектры энерговыделения в ZNC, ZNA, ZPC и ZPA были откалиброваны и был произведен отбор событий, соответствующих именно данному событию и произошедших именно при столкновении двух сгустков пучка. Затем события были классифицированы как электромагнитные и адронные в соответствии с отсутствием или наличием сигнала в передних электромагнитных калориметрах ZEM. Эффективность ZEM-вето  $\varepsilon_i$  для каждой множественности нейтронов при отборе электромагнитных событий была оценена на каждой стороне путем сравнения количества событий, полученных (1) путем вычитания событий с нейтронами на обеих сторонах и (2) путем наложения ZEM-вето. Такое сравнение было выполнено сначала для событий с нейтронами на данной стороне, но без нейтронов на противоположной стороне (одиночная минус взаимная ЭМД), а затем только для событий с нейтронами на той же стороне (одиночная, включая взаимную ЭМД). Вычисленные значения  $\varepsilon$  находятся в

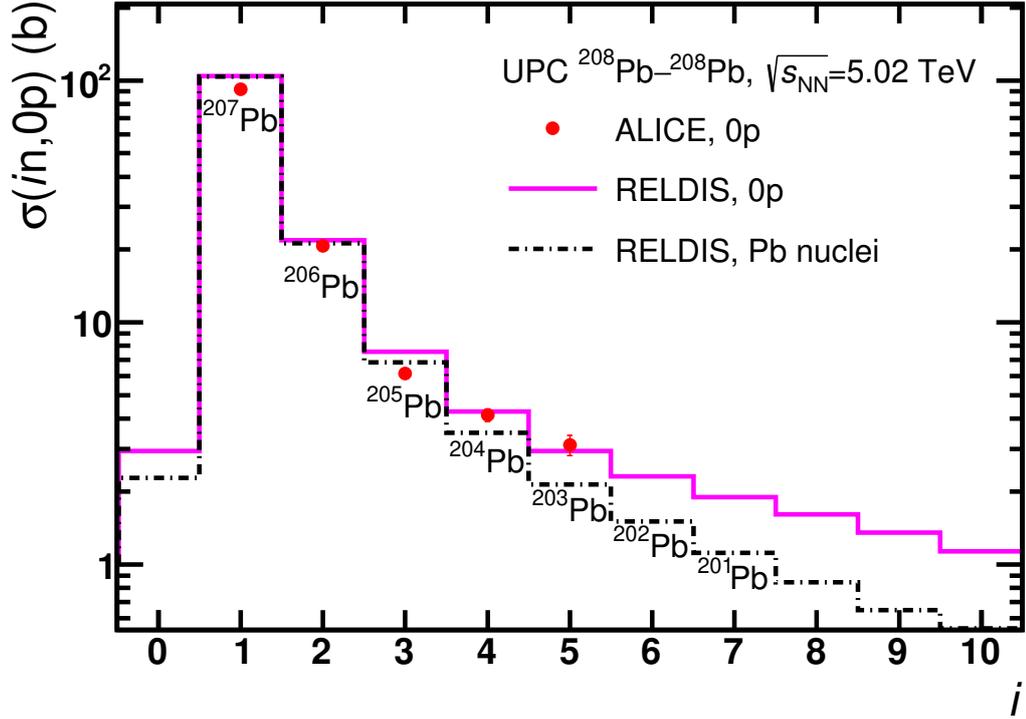


Рис. 5. Измеренные сечения эмиссии определенного числа нейтронов  $i$  в отсутствии протонов в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ (точки) и те же сечения, предсказываемые RELDIS (сплошная гистограмма). Сечения образования соответствующих вторичных ядер,  $^{207,206,205,204,203,202,201}\text{Pb}$ , предсказываемые RELDIS, представлены пунктирной гистограммой и обозначены символами нуклидов. На рисунке представлены полные ошибки измерений.

диапазоне от 99.25% до 99.91% для  $1n - 5n$ . С ростом множественности нейтронов немного больше событий теряется из-за ZEM-вето.

Спектры энерговыделения в ZDC, полученные в результате отбора по всем описанным выше условиям, фитируются суммой гауссианов:

$$F(E) = \sum_{i=1}^6 f_i(E) = \sum_{i=1}^6 \frac{n_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(E-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}.$$

Каждый гауссиан  $f_i(E)$  представляет  $i$ -ый пик и характеризуется средним значением  $\mu_i$ , дисперсией  $\sigma_i$  и нормировочным коэффициентом  $n_i$ , который соответствует количеству событий с  $i$  нуклонами. Параметры фитирования имеют определенные ограничения, но количества  $n_i$  зарегистрированных событий в каждом пике остается свободным параметром. Исходное число событий  $N_i$  извлекается после поправки количества  $n_i$  зарегистрированных событий на эффективность регистрации нуклонов в ZDC и эффективность ZEM-вето.

Доли событий с эмиссией одного, двух и трех нейтронов в событиях одиночной ЭМД за вычетом событий взаимной ЭМД сравниваются с аналогичными долями, измеренными коллаборацией в 2011 году при  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ. Доли  $1n$ ,

2n и 3n событий были измерены при самой высокой энергии  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  столкновений, доступной до сих пор в ускорительных экспериментах. Было обнаружено, что эти доли схожи с теми, которые были измерены при  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  ТэВ.

Вычисляются сечения эмиссии одного, двух, трех, четырех и пяти нейтронов в электромагнитных событиях с эмиссией произвольного числа протонов, предсказания моделей RELDIS и  $n_0^n$  хорошо описывают измеренные сечения. Модель  $n_0^n$ , аналогично RELDIS, основана на методе Вайцеккера – Вильямса. Вычисляются сечения эмиссии одного, двух, трех, четырех и пяти нейтронов в электромагнитных событиях без эмиссии протонов. Обсуждается возможность оценки сечений выходов отдельных изотопов свинца  $^{207,206,205,204,203}\text{Pb}$  с помощью сечений эмиссии соответствующего числа нейтронов в отсутствии протонов. Относительная систематическая ошибка для сечений, измеренных отдельно на каждой стороне (С или А), складывается из систематических ошибок определения видимого сечения ZED-триггера, процедур фитирования и поправок на эффективность. Представлены вклады и сумма ошибок разных типов для каждого измеренного сечения. Показано, что ошибками за счет «пайлапа» (англ. pileup — эффект множественного наложения событий) можно пренебречь.

Измеренные сечения эмиссии определенного числа нейтронов в отсутствии протонов представлены на Рис. 5 и сравниваются с предсказаниями RELDIS для тех же сечений, а также с рассчитанными сечениями образования конкретных вторичных ядер:  $^{207,206,205,204,203}\text{Pb}$ . Согласно RELDIS, сечение образования  $^{207}\text{Pb}$ , практически совпадает с сечением (1n,0p), а сечения образования  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{205}\text{Pb}$  меньше сечений (2n,0p) и (3n,0p) только на 3% и 10%, соответственно. Согласно этой модели, рассчитанные сечения эмиссии четырех, пяти, шести и семи нейтронов в отсутствии протонов можно рассматривать как верхние пределы для сечений образования изотопов свинца  $^{204,203,202,201}\text{Pb}$ , соответственно. Разница обусловлена эмиссией дополнительных частиц, например, протонов и/или заряженных  $\pi$ -мезонов, которая приводит к образованию остаточных ядер, отличных от Pb.

Результаты шестой главы будут вскоре опубликованы в работе [11a].

**В Заключение** перечислены основные результаты и выводы.

В диссертационной работе посредством модели RELDIS изучен процесс электромагнитной диссоциации в столкновениях ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  и ядер индия  $^{115}\text{In}$  на LHC и на FCC-hh, а также в столкновениях ядер золота  $^{197}\text{Au}$  на NICA. Для столкновений ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  на LHC и на FCC-hh изучен процесс ядерной резонансной флуоресценции.

С помощью разработанной автором комбинаторной модели и посредством полного Монте-Карло моделирования были вычислены поправочные коэффициенты на эффективность регистрации в передних адронных калориметрах ZDC эксперимента ALICE нейтронов и протонов определенной множественности. С учетом вычисленных поправок на эффективность регистрации нуклонов обработаны экспериментальные данные, полученные в сеансах  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ, ориентированных на измерения ЭМД. Измеренные

сечения образования определенного количества нейтронов в ЭМД без вылета протонов неплохо согласуются с предсказаниями модели RELDIS и позволяют на их основе оценить сечения образования изотопов свинца в качестве вторичных ядер.

## Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- 1a. **Dmitrieva U.**, Pshenichnov I. On the performance of Zero Degree Calorimeters in detecting multinucleon events // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2018. V. 906. P. 114–119.
- 2a. **Dmitrieva U.**, Pshenichnov I. On the Detection of Multinucleon Events in Nucleus–Nucleus Collisions with Forward Calorimeters (ZDC) // *Bull. Lebedev Phys. Inst.*. 2019. V. 46.
- 3a. **Дмитриева У. А.** Электромагнитная диссоциация  $^{197}\text{Au}$  на ускорителе NICA // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2019. V. 1940301. P. 1–6.
- 4a. Pshenichnov I., **Dmitrieva U.** Electromagnetic interactions of ultrarelativistic nuclei: A challenge for present and future heavy-ion colliders // *Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl.*. 2019. V. 12.
- 5a. Pshenichnov I. A., **Dmitrieva U. A.**, Svetlichnyi A. O. Secondary Nuclei from Peripheral and Ultraperipheral Collisions of Relativistic Heavy Ions // *Bull. of the RAS: Physics*. 2020.V. 84. P. 1007–1011.
- 6a. **Dmitrieva U.**, Pshenichnov I. Nuclear resonance fluorescence of  $^{208}\text{Pb}$  in heavy-ion colliders // *Eur. Phys. J. A*. 2021. V. 57.
- 7a. **Dmitrieva U.**, Pshenichnov I. Calculations of efficiency of ALICE Zero Degree Calorimeters. 2021. <https://alice-notes.web.cern.ch/node/1062>.
- 8a. **Дмитриева У. А.**, Пшеничнов, И. А. Ядерная резонансная флуоресценция в столкновениях ядер свинца на БАКе // *Труды 59-й научной конференции МФТИ. Проблемы современной физики*. 2016. P. 122–124.
- 9a. **Дмитриева У. А.**, Пшеничнов И. А. Моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца на БАК // *Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ. ФФПФ*. 2017. P. 309–311.
- 10a. **Дмитриева У. А.**, Пшеничнов И. А. Моделирование трансмутации ядер свинца в ультрапериферических столкновениях на ЛНС // *Труды 64-ой Всероссийской научной конференции МФТИ. Фундаментальная и прикладная физика*. 2021. P. 60–61.
- 11a. **Dmitrieva U.**, Pshenichnov I., Oppedisano C., Cortese P. Neutron emission in ultraperipheral Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV. 2022. <https://alice-publications.web.cern.ch/node/7375>.

## Цитированная литература

1. The Large Hadron Collider. <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
2. Bertulani C. A., Baur G. Electromagnetic processes in relativistic heavy ion collisions // *Phys. Rep.* 1988. V. 163. P. 299–408.
3. Appelshäuser H. et al. Spectator Nucleons in Pb+Pb Collisions at 158A GeV // *Eur. Phys. J. A.* 1998. V. 2. P. 383.
4. Abelev B. et al. Measurement of the Cross Section for Electromagnetic Dissociation with Neutron Emission in Pb-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109. P. 252302.
5. Pshenichnov I. Electromagnetic excitation and fragmentation of ultrarelativistic nuclei // *Phys. Part. Nucl.* 2011. V. 42. P. 215.
6. Bruce R. et al. Beam losses from ultraperipheral nuclear collisions between  $^{208}\text{Pb}^{82+}$  ions in the Large Hadron Collider and their alleviation // *Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams.* 2009. V. 12. P. 071002.
7. Pshenichnov I. A. et al. Mutual heavy ion dissociation in peripheral collisions at ultrarelativistic energies // *Phys. Rev. C.* 2001. V. 64. P. 24903.
8. Hermes P. D. et al. Measured and simulated heavy-ion beam loss patterns at the CERN Large Hadron Collider // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A.* 2016. V. 819. P. 73.
9. Tarafdar S., Citron Z., Milov A. A centrality detector concept // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A.* 2014. V. 768. P. 170.
10. Grinstein S. The ATLAS Forward Proton Detector (AFP) // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2016. V. 273-275. P. 1180–1184.
11. Bogomyagkov A. V. et al. Projects for ultra-high-energy circular colliders at CERN // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13. P. 870–875.
12. Dainese A. et al. Heavy ions at the Future Circular Collider CERN-TH-2016-107 // 2016. P. 1–58. <http://arxiv.org/abs/1605.01389>.
13. Enders J. et al. Nuclear resonance fluorescence experiments on  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  up to 6.75 MeV // *Nucl. Phys. A.* 2003. V. 724. P. 243–273.
14. Scheidenberger C. et al. Charge-changing interactions of ultrarelativistic Pb nuclei // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 70. P. 014902.
15. Loizides C. et al. Improved Monte Carlo Glauber predictions at present and future nuclear colliders // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 97. P. 054910.
16. Meier H. et al. Bound-free electron-positron pair production in relativistic heavy-ion collisions // *Phys. Rev. A.* 2001. V. 63. P. 032713.

Научное издание

Дмитриева Ульяна Александровна

Изучение ультрапериферических  
столкновений ядер на коллайдерах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,4 Зак. № 22485 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