

На правах рукописи

ПШЕНИЧНОВ Игорь Анатольевич

**Электромагнитные возбуждения и фрагментация
ультрарелятивистских ядер**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Лаборатории мезоядерных взаимодействий Отдела
экспериментальной физики Учреждения Российской академии наук
Института ядерных исследований РАН.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Соболевский Николай Михайлович

Доктор физико-математических наук

Сатаров Леонид Михайлович

Доктор физико-математических наук

Снигирев Александр Михайлович

Ведущая организация:

*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики вы-
соких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина*

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в ___ часов на заседании Дис-
сертационного совета Д 002.119.01 Учреждения Российской академии наук
Института ядерных исследований РАН по адресу: 117312 Москва, проспект
60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Института ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

Общая характеристика работы

Актуальность диссертационной работы. Возможность обнаружить необычные свойства объектов в экстремальных условиях и новые явления всегда привлекает внимание ученых. С целью изучения поведения ядерной материи в экстремальных условиях был создан ускоритель ядер на встречных пучках сверхвысоких энергий - Коллайдер релятивистских тяжёлых ионов (Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)) [1], работающий в Брукхейвенской национальной лаборатории в США. В ходе проведения экспериментов по столкновению ядер на RHIC получен целый ряд важных научных результатов, рассмотренных, в частности, в обзорах [2–4].

На момент написания настоящей диссертационной работы завершено сооружение нового уникального ускорителя - Большого адронного коллайдера (БАК), (Large Hadron Collider (LHC))[5] в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), Женева. Этот коллайдер позволяет изучать протон-протонные и ядро-ядерные взаимодействия при рекордных энергиях встречных пучков.

Наибольшие ожидания физиков связаны с изучением центральных или близких к центральному столкновений ядер - событий с большим перекрытием плотностей ядер и поиском в таких событиях сигналов образования кварк-глюонной плазмы. Ускорители RHIC и LHC позволяют достигнуть рекордных плотностей энергии $\sim 10-100$ ГэВ/фм³ в центральных столкновениях ядер и создать условия для предсказываемого теоретиками фазового перехода между адронной материей и кварк-глюонной плазмой [2, 3] - особым состоянием вещества, в котором, как предполагается, существовала наша Вселенная в первые моменты её существования.

Одним из убедительных доказательств обнаружения фазового перехода может стать сравнение разнообразных величин, измеренных в центральных столкновениях, с аналогичными величинами в периферических столкновениях. Это предполагает сортировку событий столкновений по степени “центральности” - по прицельному пара-

метру b , который в рамках разнообразных теоретических моделей непосредственно связан с характеристиками события. Такие характеристики могут быть измерены в эксперименте в каждом отдельном событии с помощью совместного применения детекторов, определяющих множественность рожденных адронов и нейтронов-спектаторов. Последние выпускаются вперед по направлению пучка относительно холодными ядерными фрагментами, находящимися вне области геометрического перекрытия ядер. Для определения количества нуклонов-спектаторов служат специальные детекторы, получившие название Zero Degree Calorimeters (ZDC) - калориметры нулевого угла. В экспериментах на RHIC [6] ZDC-калориметры позволяют регистрировать только нейтроны, в то время как в будущих экспериментах на LHC [7, 8] ZDC-калориметры позволят регистрировать как нейтроны, так и протоны.

Программы экспериментов на коллайдерах RHIC и LHC ориентированы в основном на изучение тех столкновений ядер, в которых доминируют сильные взаимодействия как составляющих ядра, так и рождающихся в ходе столкновений адронов. Однако в последние годы активно обсуждаются и ультрапериферические взаимодействия ядер в коллайдерах вне области адронного взаимодействия [4, 9–11]. Эта та область “центральности” где отсутствует геометрическое перекрытие ядерных плотностей: $b \geq R_1 + R_2$, где R_1 и R_2 - радиусы сталкивающихся ядер, и речь идет об электромагнитном возбуждении ядер [12]. Отметим, что при нерелятивистских энергиях чаще используется термин “кулоновское возбуждение”. По отношению к адронному взаимодействию ядра целиком выступают в качестве спектаторов, но могут быть разрушены электромагнитными силами под действием лорентц-сжатых кулоновских полей ядер-партнеров по столкновению.

Особый интерес представляет изучение взаимной электромагнитной диссоциации ядер, происходящей в результате электромагнитного возбуждения обоих ядер-партнеров в одном ультрапериферическом столкновении. Взаимную диссоциацию можно изучать только

с помощью коллайдеров ядро-ядро. В традиционных экспериментах с фиксированными мишенями обычно регистрируется только распад ядра-снаряда (одиночная диссоциация), поэтому события взаимной диссоциации невозможно отделить от событий одиночной диссоциации. Отметим, что для экспериментального изучения электромагнитных взаимодействий ядер можно применить ZDC-калориметры, которые уже созданы и будут использоваться в экспериментах в совокупности с теми основными детекторами, которые регистрируют продукты адронных взаимодействий под большими углами.

Изучение электромагнитных взаимодействий релятивистских ядер имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Рассматривая фундаментальный аспект проблемы, следует отметить, что на протяжении многих десятилетий именно изучение взаимодействия электронов и фотонов с ядрами давало уникальную информацию о размерах и структуре ядер, свойствах гигантских резонансов как коллективных возбуждений ядер [13–15]. Анализ глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах и ядрах дал ключ к пониманию их партонной структуры [16]. В настоящее время в экспериментах по фоторождению мезонов на ядрах широко используется метод меченых фотонов [17]. Успех всех таких исследований был во многом связан с завершенностью квантовой электродинамики как теории электромагнитных процессов, которая, в частности, дает количественное описание прямого механизма возбуждения ядер фотонами или начального взаимодействия лептона с нуклонами или партонами. Все это упрощает интерпретацию процессов сильного взаимодействия, которые происходят на второй стадии фотоядерных реакций.

Таким образом, ускорители электронов и работающие на их основе источники фотонов являются важными инструментами фундаментальных ядернофизических исследований. В этих случаях используются ускоренные электроны с единичными зарядами $1e$. С другой стороны, релятивистские тяжелые ядра с большими зарядами можно рассматривать как интенсивные источники фотонов с широким спектром [9–11] - своеобразные “фотонные фабрики”.

Электромагнитное возбуждение ядер в столкновениях при промежуточных энергиях (Лорентц-фактор налетающего ядра $\gamma \sim 1$) позволяет изучать реакции, обратные к реакциям нуклеосинтеза [18], двойные гигантские резонансы [19–21]. Для вторичных пучков экзотических нестабильных ядер электромагнитное возбуждение является одним из способов изучения их ядерной структуры [22], в частности, делимости нестабильных ядер [23], поскольку из таких ядер невозможно приготовить традиционную мишень для облучения электронами или фотонами.

Интенсивность потока виртуальных фотонов движущегося ядра с зарядом Ze связана как с когерентным действием всех Z зарядов протонов, так и с Лорентц-сжатием их кулоновского поля. Поэтому задача изучения поведения ядер в сверхсильных электромагнитных полях особенно актуальна и приобретает самостоятельное фундаментальное значение именно при ультрарелятивистских энергиях сталкивающихся ядер, $\gamma \gg 1$. Действительно, простая оценка показывает (используется система единиц $\hbar = c = 1$), что в момент наибольшего сближения ядер потенциал Лорентц-сжатого кулоновского поля $V_c \sim \alpha\gamma Z/b$, где α - постоянная тонкой структуры, может значительно превосходить полную энергию связи ядра-партнёра ~ 1 ГэВ. Используя характерные для ультрарелятивистских тяжёлых ядер значения $\gamma \gg \alpha^{-1}$, $Z \sim 50$ и прицельного параметра $b \sim 10$ фм, получаем $V_c \sim \alpha\gamma$ ГэВ $\gg 1$ ГэВ. Здесь решающее значение имеет не только большая величина Z , но и величина Лорентц-фактора $\gamma \gg 1$, поэтому можно ожидать, например, взрывного разрушения (мультифрагментации [24]) ядра-партнёра среди других механизмов его развала.

Из изложенного выше следует, что изучение электромагнитных взаимодействий ультрарелятивистских ядер является новым актуальным направлением современной ядерной физики, которое дополняет и расширяет исследования на коллайдерах RHIC и LHC. Диссертационная работа выполнена в рамках одного из приоритетных научных направлений ИЯИ РАН “Исследования по релятивистской ядерной физике” по теме “Исследование ядро-ядерных столкновений на уста-

новке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC (CERN)”.

Общая цель и конкретные задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка метода моделирования взаимодействия фотонов различных энергий с ядрами и построение на его основе универсальной модели электромагнитных взаимодействий ультрарелятивистских ядер. Разработанная автором модель RELDIS (Relativistic Electromagnetic DIssociation) описывает как одиночную, так и взаимную электромагнитную диссоциацию ядер в ультрапериферических столкновениях, включая многофотонные процессы. Модель реализована в виде основанной на методе Монте-Карло общедоступной компьютерной программы.

Именно в последнее десятилетие исследования электромагнитной диссоциации ультрарелятивистских ядер стали представлять особый интерес в связи с новыми экспериментальными данными по электромагнитным взаимодействиям тяжелых ядер на CERN SPS, RHIC, и в связи с интенсивной подготовкой к работе LHC в режиме столкновений ядер свинца. Поэтому главной конкретной задачей диссертации является достоверное теоретическое описание процессов взаимной электромагнитной диссоциации тяжелых ядер (золота и свинца) в коллайдерах RHIC и LHC. В диссертации также решен ряд конкретных задач, связанных с развитием модели фотоядерных реакций и всесторонним анализом современных экспериментальных данных по таким реакциям.

Научная новизна работы и сопоставление результатов с мировым уровнем. Научная новизна работы в целом определяется тем, что с 1998 до 2004 года программа RELDIS являлась единственным в мире кодом, который позволял проводить расчеты электромагнитной диссоциации ультрарелятивистских ядер методом Монте-Карло. Универсальность такого подхода (после его проверки путем сравнения его результатов с экспериментом) дает уникальную возможность предсказывать разнообразные свойства продуктов ультрапериферических взаимодействий: от распределений ядерных фрагментов до характеристик рождённых виртуальными фотонами

мезонов. Благодаря этому RELDIS превосходит прежние методы вычислений, которые для расчета электромагнитной диссоциации ядер использовали только экспериментальные данные по фотоядерным реакциям. Ограниченность данных не позволяет вычислить многие важные характеристики ультрапериферических взаимодействий, поэтому необходимы современные модели взаимодействия фотонов с ядрами.

После 2004 года расчет одиночной электромагнитной диссоциации методом Монте-Карло стал возможен с помощью кода FLUKA и библиотеки Geant4 (проект IONMARS). Однако в обоих случаях используется ограниченный набор каналов взаимодействия эквивалентных фотонов с ядрами, а учитываются только однофотонные процессы лидирующего порядка. До настоящего времени модель RELDIS не имеет аналогов в отношении моделирования многофотонных процессов одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации ультра-релятивистских ядер.

Новизна и уникальность RELDIS и её соответствие мировому научному уровню обеспечили интерес к модели со стороны нескольких международных коллабораций, изучающих столкновения ядер на ускорителях RHIC (BNL, США), SPS и LHC (ЦЕРН, Швейцария) и фотоядерные реакции в лабораториях MAX-lab (Швеция), SAL (Канада), JLab (США). Такой интерес был реализован в совместных с экспериментаторами публикациях, в которых результаты измерений сравнивались с полученными автором диссертации теоретическими результатами.

Следующие представленные в диссертации результаты являются оригинальными и получены впервые:

1. Предложена феноменологическая аппроксимация данных по множественному фоторождению π -мезонов на нуклонах, и на ее основе область применимости каскадной модели фотоядерных реакций впервые расширена до энергий в несколько десятков ГэВ.
2. С помощью расширенной каскадной модели фотоядерных реак-

ций и испарительно-делительной модели вычислены вероятности деления ядер фотонами с энергиями от десятков МэВ до нескольких ГэВ. Впервые подробно изучена эволюция свойств остаточных ядер с ростом энергии фотона в таком широком диапазоне энергий, и показано, что параметры деления (Z^2/A) ядер-остатков существенно отличаются от параметра ядра-мишени уже при энергиях фотона свыше сотен МэВ.

3. Впервые данные по электромагнитной диссоциации ионов использованы для независимой проверки оцененных данных фотоядерных экспериментов. Показано, что полученные в модели RELDIS сечения электромагнитной диссоциации ^{208}Pb при энергии 30 ГэВ/нуклон согласуются с экспериментом в том случае, если в расчете используются теоретические фотонейтронные сечения близкие к оценённым сечениям.
4. Впервые показано, что во взаимодействиях ультрарелятивистских ядер, приводящих к увеличению их заряда, доминируют электромагнитные процессы. С помощью модели RELDIS показано, что такие взаимодействия связаны с рождением отрицательно заряженных пионов в фотопоглощении на внутриядерных нейтронах. Показано, что такие взаимодействия возможны только при энергиях ядер-снарядов выше 10 ГэВ/нуклон.
5. С помощью модели RELDIS впервые описана широкая совокупность экспериментальных данных по эмиссии нейтронов в ультрапериферических взаимодействиях ядер золота на коллайдере RHIC.
6. Предложен новый метод мониторинга светимости коллайдеров, который основан на измерении суммы сечений эмиссии одного и двух нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации сталкивающихся ядер в пучках коллайдера LHC. Дано теоретическое обоснование этого метода, оценены его систематические ошибки и продемонстрированы преимущества этого метода по

сравнению с методом регистрации единичных нейтронов.

7. Предложен принципиально новый метод изучения двойных и тройных возбуждений гигантских резонансов посредством регистрации нейтронов от событий взаимной электромагнитной диссоциации ядер в пучках коллайдеров ультрарелятивистских тяжелых ионов.

Практическая значимость полученных результатов. Интерес к электромагнитным взаимодействиям ультрарелятивистских ядер в коллайдерах связан с тремя важными практическими задачами, в решении которых использованы результаты RELDIS.

Во-первых, электромагнитное взаимодействие ядер наряду с адронным приводит к потере ядрами нуклонов, т.е. к изменению заряда, массы и, соответственно, траектории ядер в магнитном поле ускорителя. Поскольку при энергиях коллайдеров полное сечение электромагнитного взаимодействия значительно превосходит сечение адронного взаимодействия ядер, то именно электромагнитное взаимодействие в основном определяет время жизни пучков в таких ускорителях [25]. С помощью модели RELDIS уточнены величины полных сечений электромагнитной диссоциации ядер с учетом процессов лидирующего и следующего к лидирующему порядков.

Во-вторых, продукты электромагнитной диссоциации - ядерные фрагменты - могут создавать радиационную и тепловую нагрузку на элементы конструкции коллайдера [26]. Образующиеся фрагменты близки по заряду и массе к ионам пучка, и поэтому транспортируются оптикой ускорителя на большие расстояния. С помощью RELDIS и модифицированной модели abrasion-ablation были вычислены все необходимые сечения образования ядерных фрагментов, которые были использованы ускорительным отделом ЦЕРНа в качестве входных данных для моделирования потерь пучков в ускорителе. В результате совместной работы были впервые получены количественные оценки тепловой нагрузки на сверхпроводящие магниты и другие компоненты ускорителя LHC, которая возникает в результате электромагнит-

ной диссоциации ионов и их фрагментации в периферических адронных столкновениях.

В третьих, регистрация нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации ядер, происходящей в точках пересечения встречных пучков (например, в экспериментах ALICE и CMS на LHC), позволяет измерять светимость коллайдера. Для калибровки этого метода коллаборацией ALICE использованы результаты RELDIS для суммы сечений эмиссии одного и двух нейтронов. В рамках проекта AliRoot коллаборации ALICE полученные в модели RELDIS файлы, которые описывают события электромагнитной диссоциации, использованы для моделирования откликов детекторов ALICE, см. [27].

Удобство практического применения модели RELDIS обеспечивается её реализацией в виде написанного на Фортране 77 общедоступного компьютерного кода. В код встроены процедуры, которые совместимы с библиотеками HBOOK и ROOT, для гистограммирования и сбора информации об образующихся в электромагнитных взаимодействиях частицах. Программа позволяет моделировать методом Монте-Карло события как одиночной диссоциации одного из партнеров по столкновению, так и события взаимной диссоциации, когда происходит одновременное разрушение обоих ядер.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Создана модель RELDIS, которая является уникальным инструментом исследований фотоядерных реакций, электромагнитных возбуждений и фрагментации ядер в ультрапериферических взаимодействиях. Модель реализована в виде написанного на Фортране 77 общедоступного компьютерного кода.
2. Исследованы реакции деления ядер-актинилов под действием фотонов с энергиями выше 1 ГэВ. Предсказываемые моделью RELDIS вероятности деления и измеренные в эксперименте абсолютные сечения фотоделения позволили оценить полные сечения фотопоглощения ядрами-актинидами при энергиях от 70

МэВ до 4 ГэВ.

3. Исследованы механизмы образования ядерных фрагментов в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер с различными мишенями. Показано доминирование электромагнитных процессов при образовании на тяжёлых ядрах-мишенях фрагментов с зарядами, отличающимися от ядра пучка на $\Delta Z = +1, 0, -1, -2$.
4. Предложен универсальный метод моделирования событий взаимной электромагнитной диссоциации ядер в столкновениях на встречных пучках с учетом многофотонных возбуждений.
5. Разработанный метод успешно описывает совокупность экспериментальных данных по эмиссии нейтронов во взаимной электромагнитной диссоциации ядер золота на RHIC. Даны предсказания для сечений эмиссии различных частиц во взаимной электромагнитной диссоциации ядер свинца на LHC.
6. Предложен новый метод мониторинга светимости коллайдеров ядро-ядро, использующий измерения суммы выходов одного и двух нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации ядер.
7. Предложен принципиально новый метод изучения двойных и тройных возбуждений гигантских резонансов в событиях взаимной электромагнитной диссоциации ядер в коллайдерах ядро-ядро. Сечения процессов тройных возбуждений гигантских резонансов на коллайдере LHC предсказываются моделью RELDIS на уровне 500 миллибарн, что достаточно для их экспериментального обнаружения.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены в выступлениях на нескольких российских и международных конференциях, среди которых: 2nd KEK - Tanashi International Symposium on Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes, Tokyo, Japan, 25-27 Oct 1999; Bologna 2000 Conference: Structure of the Nucleus at the Dawn of the Century, Bologna, Italy, 29 May -

3 Jun 2000; X International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei at Low and Medium Energies, Moscow, 16-18 April 2003; 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 July 2004; сессия-конференции ОЯФ РАН “Фундаментальные взаимодействия”, Москва, 23-27 ноября 2009.

Кроме этого, результаты работы докладывались на многочисленных семинарах в ведущих научных центрах как в России, так и за рубежом: в Национальной лаборатории Фраскати, (март-июль 1995, сентябрь 2003); Московском университете им. М.В.Ломоносова (декабрь 1998); Университете г. Болонья (март 1999, декабрь 2002); Институте Нильса Бора в Копенгагене (декабрь 1999); Московском инженерно-физическом институте (декабрь 2000); Брукхейвенской национальной лаборатории (февраль 2001); Организации по исследованиям с тяжелыми ионами GSI, в Дармштадте (май 2001); Университете Джорджа Вашингтона (март 2001, апрель 2003); ЦЕРНе (апрель и июнь 2004), Франкфуртском институте передовых исследований FIAS, (май 2004). Результаты работы неоднократно докладывались на совещаниях коллаборации ALICE, семинарах Отдела экспериментальной физики, Лаборатории фотоядерных реакций, Лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН.

Вошедшие в диссертацию работы были поддержаны INTAS грантом 98-86 для молодых ученых, грантом 5347 “Университеты России”, грантом 02-02-16013-а Российского фонда фундаментальных исследований и Фондом Комитета Россия-ЦЕРН.

Публикации по теме диссертации. Опубликованы 24 печатные работы, которые представлены отдельным списком в тексте автореферата и диссертации. Публикации включают 17 статей в зарубежных [1а, 2а, 3а, 4а, 5а, 6а, 7а, 8а, 9а, 10а, 11а, 12а, 13а, 14а] и российских [15а, 16а, 17а] журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России, 5 статей [18а, 19а, 20а, 21а, 22а] в сборниках трудов международных конференций и две работы [23а, 24а] – препринты ЦЕРНа. Согласно библиографическим базам данных ISI Web of Knowledge и

SPIRES-HEP, общее число цитирований перечисленных публикаций превышает 300.

Личный вклад автора. Автору диссертации принадлежит инициатива создания модели RELDIS и её непосредственная реализация в виде компьютерного кода. Основу программы составили расширенная версия модели внутриядерного каскада, разработанная ранее в ИЯИ РАН А.С. Ильиным, Е.С. Голубевой и автором диссертации. При этом все расширения и усовершенствования модели внутриядерного каскада, которые были необходимы для: (1) для моделирования фотоядерных реакций с реальными фотонами в широком диапазоне энергий, и (2) для вычислений с виртуальными фотонами с помощью метода Вайцзеккера-Вильямса, были выполнены лично автором. Для расширения диапазона энергий фотонов, в котором может применяться модель внутриядерного каскада, было использовано статистическое моделирование реакций множественного мезообразования на нуклонах. Последнее было разработано, проверено путем сравнения с имеющимися экспериментальными данными и встроено в модель внутриядерного каскада лично автором.

Автором получены соотношения, описывающие взаимную электромагнитную диссоциацию ядер (включая многофотонные процессы), проведены все вычисления электромагнитной диссоциации ядер и представлены их результаты в виде таблиц и графиков. Вклад автора является решающим во всех работах, посвященных теоретическому анализу уже опубликованных данных по электромагнитным возбуждениям и фрагментации ядер. В работах, опубликованных в ходе сотрудничества с экспериментальными группами [2а, 3а, 7а, 8а, 9а, 10а], значительный вклад автора состоит в проведении всех вычислений и теоретической интерпретации новых данных.

В опубликованных вместе с соавторами из ЦЕРНа работах [12а, 13а, 14а, 21а, 22а, 24а] (в том числе, в рамках коллаборации ALICE) личный вклад автора является решающим в отношении посвященных электромагнитным возбуждениям и распадам ядер разделов.

Для моделирования развала возбужденных остаточных ядер в

настоящей диссертационной работе используется статистическая модель SMM, разработанная И.Н. Мишустиним, А.С. Ботвиной, А.С. Ильиновым, Я. Бондорфом в сотрудничестве с другими авторами. Помимо моделей мультифрагментации ядер, SMM включает модели деления ядер и испарения ими нуклонов. Для описания процессов испарения и деления ядер использовались результаты А.С. Ильинова и А.С. Ботвины. Компьютерный код SMM был любезно предоставлен автору диссертации А.С. Ботвиной в качестве законченного научного продукта и применялся без дальнейших доработок и изменений для моделирования развала возбужденных ядер в работах [4а, 5а, 8а]. Разработка модели распада возбужденных остаточных ядер выходит за рамки тематики настоящей диссертационной работы, не включается в число результатов диссертационной работы, полученных лично автором, и, соответственно, не выносится на защиту. В частности, на защиту выносится только часть результатов работы [4а], которая связана с моделированием возбуждения ядер в электромагнитных взаимодействиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка публикаций автора из 24 работ и перечня цитируемой литературы из 216 наименований. Объем диссертации, в которую включены 62 рисунка и 22 таблицы, составляет 262 страницы.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы её общая цель и конкретные задачи, аргументированы научная новизна и оригинальность полученных результатов, показана их практическая значимость. Результаты работы сопоставлены с мировым уровнем исследований в данной области. В этом же разделе представлены выносимые на защиту основные результаты, сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации и их цитируемости, личном вкладе автора, структуре и объеме диссер-

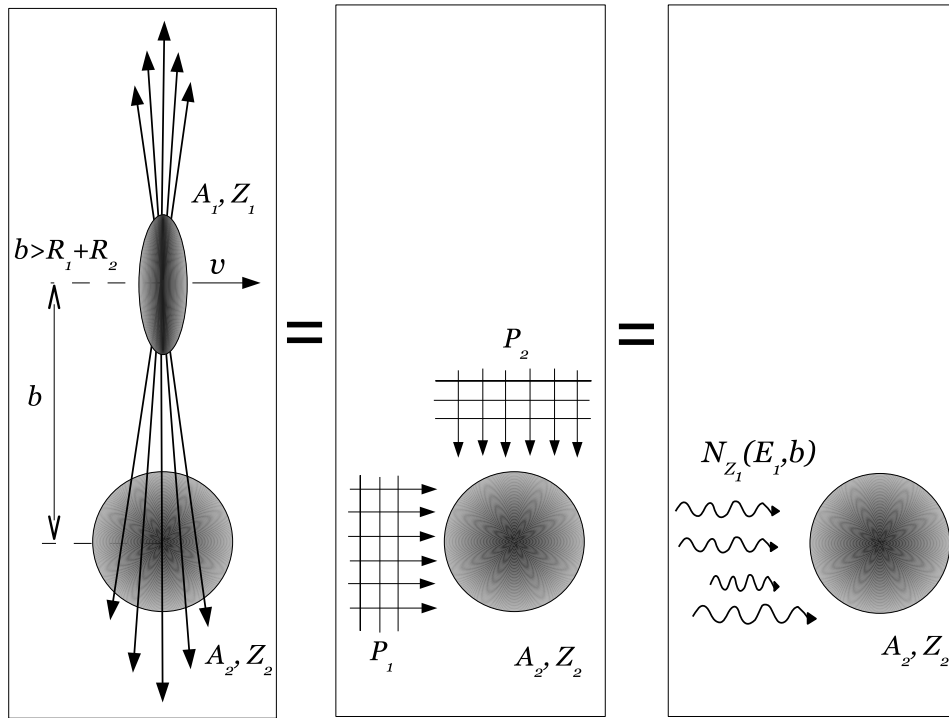


Рис. 1. В ультрапериферических столкновениях ядра (A_1, Z_1) и (A_2, Z_2) действуют друг на друга своими электромагнитными полями. Следуя методу Вайцзеккера-Вильямса, такое воздействие на партнера по столкновению (A_2, Z_2) можно рассматривать эквивалентным поглощению им импульсов электромагнитного излучения P_1 и P_2 от ядра (A_1, Z_1) . Импульсы характеризуются спектром эквивалентных фотонов $N_{Z_1}(E_1, b)$, зависящим от величины прицельного параметра b . Из работы [17a].

тационной работы.

В первой главе, следуя изложению работы [17a], представлен метод эквивалентных фотонов Вайцзеккера-Вильямса в применении к ультрапериферическим столкновениям ядер. Задача воздействия поля движущегося ядра на ядро-партнер по столкновению сводится к моделированию поглощения этим партнером фотонов с характерным спектром. Метод используется моделью RELDIS, в названии которой отражено описываемое ею явление: Relativistic Electromagnetic DIssociation. Электромагнитные взаимодействия ядер происходят в столкновениях с прицельными параметрами b , превосходящими сумму радиусов ядер: $b > R_1 + R_2 \sim 2R$, рис. 1. Дан вывод выражения для спектра эквивалентных фотонов $N_{Z_1}(E_1, b)$ в зависимости от величины прицельного параметра и показана специфика задачи в случае ультрарелятивистских энергий ядер. С ростом энергии столкновения

вающихся ядер наблюдается выравнивание вкладов различных мультипольностей в спектр эквивалентных фотонов. Классическое выражение для спектра эквивалентных фотонов, вывод которого дан в первой главе, в случае ультрапериферических столкновений ультра-релятивистских ядер (с Лорентц-фактором $\gamma \gg 1$) оказываются тождественным выражению для дипольного вклада, полученному Винтером и Алдером для кулоновского возбуждения ядер в квазиклассическом подходе. Из условия когерентности излучения фотонов всеми зарядами внутри ядра следуют ограничения на энергию эквивалентного фотона: $E_\gamma < \gamma/R$, и его поперечный импульс: $q_\perp < 1/R$.

Во второй главе представлены основные положения модели RELDIS в применении к поглощению фотонов ядрами, которое рассматривается как двухстадийный процесс. В зависимости от энергии поглощаемого фотона на первой стадии процесса может происходить: возбуждение ядра как целого в виде гигантского резонанса, поглощение фотона на паре внутриядерных нуклонов, фоторождение мезонов на отдельных внутриядерных нуклонах. Первая стадия завершается вылетом быстрых частиц и образованием возбуждённого остаточного ядра, распад которого на второй стадии реакции рассматривается в следующей третьей главе.

Во второй главе описывается моделирование фоторождения мезонов на внутриядерных нуклонах и последующего каскада вторичных частиц внутри ядра. Показано, что модель RELDIS, которая включает в себя каскадную модель фотоядерных реакций, может использоваться в широком диапазоне E_γ благодаря корректному описанию двухчастичных каналов фотопоглощения на внутриядерных нуклонах и каналов множественного фоторождения пионов.

Представлены используемые RELDIS аппроксимации полных сечений фотопоглощения на ядрах, $\sigma_{\gamma A}$, которые при $E_\gamma > 140$ МэВ опираются на концепцию “универсальной кривой”: наблюдающейся в эксперименте универсальности $\sigma_{\gamma A}/A$ для ядер от углерода до свинца. После развернутого описания метода моделирования фотоядерных реакций даны результаты проверки модели путем сравнения с

разнообразными экспериментальными данными по выходам пионов. В частности, сравнение результатов RELDIS с экспериментальными результатами по фоторождению π^+ -мезонов на ядрах вблизи порога [2a] показывает, что несмотря на упрощённое описание пион-ядерного взаимодействия, модель в целом удовлетворительно описывает фоторождение пионов. Результаты второй главы опубликованы в работах [1a, 2a].

Третья глава посвящена фрагментации тяжелых ядер в результате поглощения ими фотонов. Глава начинается с рассмотрения процесса образования остаточного ядра и эволюции его энергии возбуждения E^* , происходящей с ростом энергии фотона E_γ , рис. 2. Показано, что несмотря на рост средней энергии возбуждения $\langle E^* \rangle$, средняя доля энергии фотона, которая переходит в E^* , монотонно падает с ростом E_γ , а средние энергии возбуждения, приходящиеся на нуклон остаточного ядра, не превышают 1.5 МэВ при $E_\gamma \leq 4$ ГэВ. Отметим, что рис. 2 показывает только средние значения E^* . В диссертации также представлены распределения по E^* и параметру делимости Z_{RN}^2/A_{RN} для остаточных ядер, которые образуются в фотопоглощении на ^{232}Th , ^{238}U и ^{237}Np . Распределение образующихся после поглощения фотонов высоких энергий остаточных ядер оказывается достаточно широким, так как некоторые каналы фотоядерного взаимодействия приводят к значительному нагреву ядра мультипионной системой. Основное внимание в третьей главе посвящено реакциям фотоделения ядер свинца и ядер-актинилов. Показано, что природа фотоядерной реакции становится более сложной, когда энергия фотона достигает нескольких ГэВ, и становятся открытыми многие каналы реакции. Подробно изучены делимости остаточных ядер, образующихся после завершения каскадной стадии фотопоглощения. Ожидания, что благодаря росту $\langle E^* \rangle$ с увеличением E_γ вероятность деления будет расти, не оправдываются. Наоборот, потеря ядром-мишенью большого количества нуклонов приводит к образованию остаточных ядер с параметрами делимости Z_{RN}^2/A_{RN} , которые заметно меньше такового для ядра-мишени.

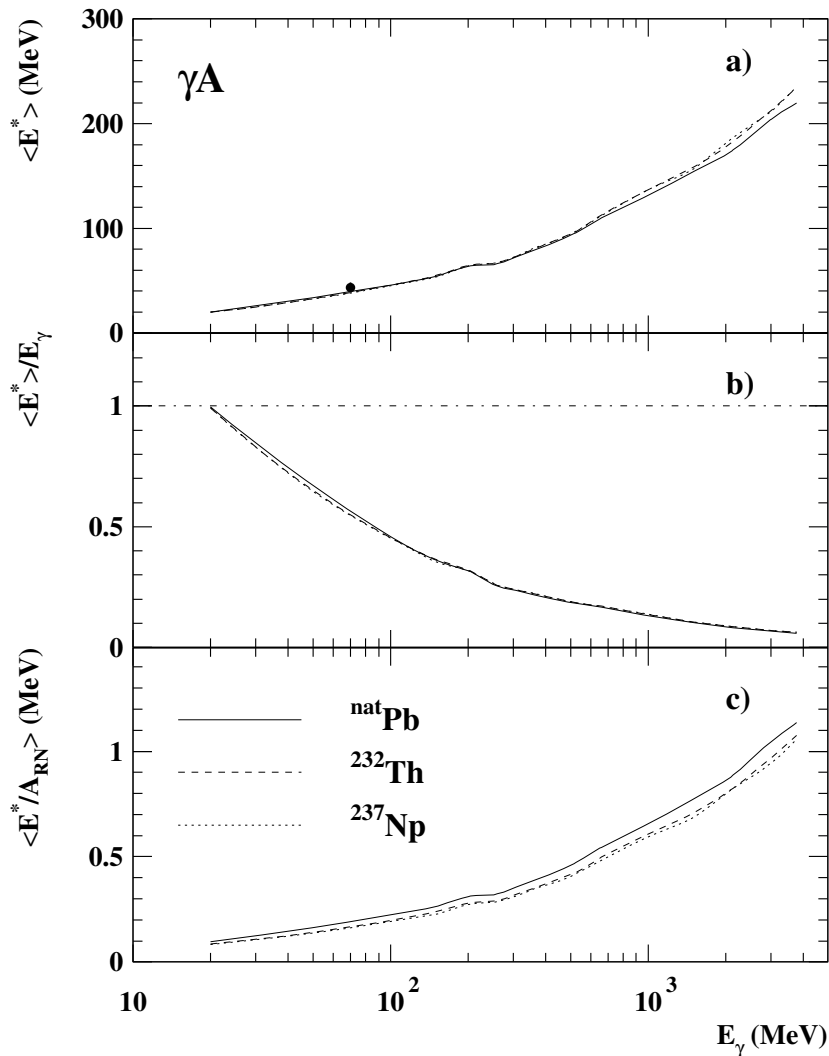


Рис. 2. а) Средняя энергия возбуждения остаточного ядра $\langle E^* \rangle$ после фотопоглощения. б) Отношение средней энергии возбуждения остаточного ядра к энергии фотона E_γ . в) Средние значения E^* , приходящиеся на нуклон остаточного ядра. Результаты RELDIS представлены сплошной, штриховой и точечной кривыми для фотопоглощения на ^{nat}Pb , ^{232}Th , и ^{237}Np , соответственно. Точкой обозначена величина $\langle E^* \rangle$, извлеченная из экспериментальных данных по фотопоглощению на ядрах свинца [29]. Из работы [3а].

С помощью модели RELDIS вычислены вероятности фотоделения ^{237}Np , $^{233,235,238}\text{U}$, ^{232}Th и ^{nat}Pb в зависимости от энергии поглощаемого ядром фотона E_γ . Эти вероятности были умножены на полные сечения фотопоглощения, полученные из “универсальной кривой” для ядер не тяжелее свинца, что дало абсолютные сечения фотоделения, которые были сопоставлены с экспериментом. Кроме этого, были получены оценки полных сечений фотопоглощения для указанных ядер-мишеней, используя их делимости и измеренные сечения фотоделения, и были найдены отличия от “универсальной кривой”. К сожалению, взятые в совокупности вычислительные и экспериментальные неопределённости не позволяют в настоящее время сделать однозначного вывода, что “универсальная кривая”, полученная для ядер с $A \leq 208$, определено нарушается для более тяжелых ядер с

$A \geq 233$ и для E_γ в области $\Delta_{33}(1232)$ -резонанса. Полученные теоретические результаты демонстрируют необходимость новых измерений сечений фотоделения ядер-актинидов. Результаты третьей главы опубликованы в работах [3а, 5а].

В четвертой главе вводится понятие одиночной электромагнитной диссоциации ядер, в которой состояние ядра-партнера после столкновения не регистрируется. В представленных на рис. 3 процессах ядро A_1 излучает один или несколько фотонов, но остается в своём основном состоянии. Напротив, поглощение фотонов ядром A_2 приводит к его переходу в возбужденное состояние A_2^* и, как правило, к разрушению ядра. Такой процесс называется электромагнитной диссоциацией ядра A_2 . Кроме однофотонных процессов лидирующего порядка, в расчетах учтены поправки на поглощение нескольких эквивалентных фотонов в одном событии. Представлен используемый RELDIS способ описания одиночной диссоциации методом Монте-Карло: поглощение фотонов Вайцзеккера-Вильямса моделируется с помощью представленной во второй и третьей главах модели фотоядерных реакций. Среднее число фотонов, поглощённое ядром A_2 в столкновении с прицельным параметром b , вычислено как:

$$m_{A_2}(b) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE_1 N_{Z_1}(E_1, b) \sigma_{A_2}(E_1), \quad (1)$$

и представлено на рис. 4 для столкновений ядер на RHIC и LHC. Нижний предел интегрирования E_{min} в выражении (1) соответствует наименьшей энергии эквивалентного фотона, при которой еще возможно разрушение ядра. Для тяжелых ядер им является порог реакции фотоэмиссии нейтрона, который составляет примерно 7 МэВ. Верхний предел интегрирования определяется величиной $E_{max} \approx \gamma/(R_1 + R_2)$. Следуя работе [12] предположим, что вероятность множественного поглощения фотонов контролируется распределением Пуассона со средним числом поглощённых фотонов $m_{A_2}(b)$. В вычислениях последнего используется спектр эквивалентных фотонов $N_{Z_1}(E_1, b)$ и соответствующее полное сечение $\sigma_{A_2}(E_1)$ поглощения фо-

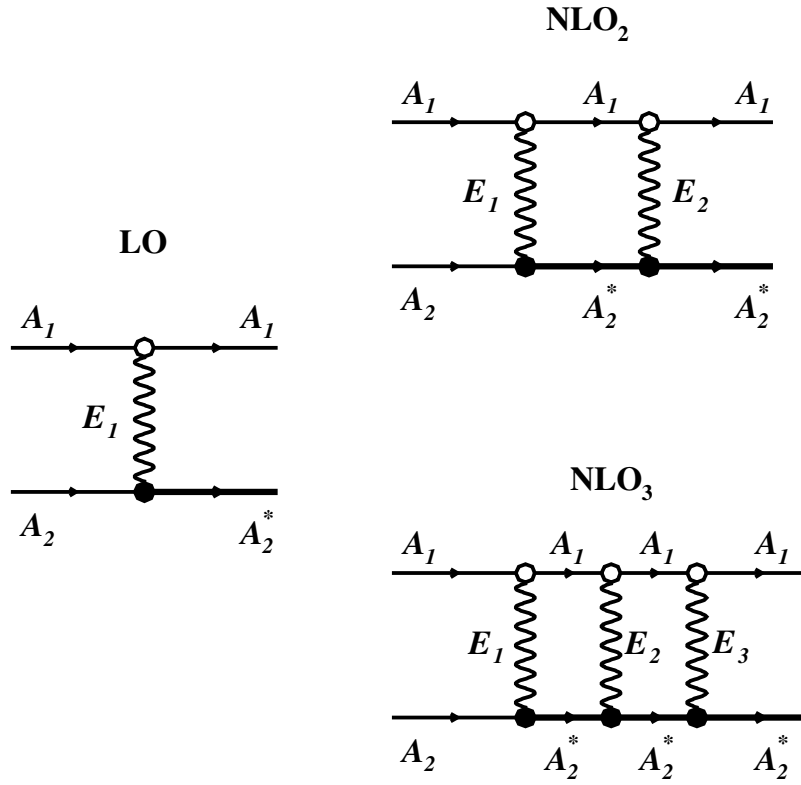


Рис. 3. Одиночная диссоциация ядер лидирующего порядка (LO) и следующих к нему порядков с обменом двумя (NLO₂) и тремя фотонами (NLO₃). Излучение фотона без изменения состояния ядра обозначено светлой вершиной, поглощение фотона с возбуждением ядра или рождением частиц - тёмной вершиной. Из работы [17a].

тонов с заданной энергией на ядре A_2 . Сечение лидирующего порядка (LO) одиночной электромагнитной диссоциации с распадом ядра A_2 по каналу i дается выражением:

$$\sigma_{A_2}^{\text{SED}}(i) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b P_{A_2}(b, i), \quad (2)$$

в котором вероятность диссоциации A_2 в канал i при данном прицельном параметре b определена как:

$$P_{A_2}(b, i) = e^{-m_{A_2}(b)} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} dE_1 N_{Z_1}(E_1, b) \sigma_{A_2}(E_1) f_{A_2}(E_1, i), \quad (3)$$

с использованием аппроксимации полного сечения фотопоглощения $\sigma_{A_2}(E_1)$ и брэнчинга распада $f_{A_2}(E_1, i)$ ядра A_2 по каналу i . Приве-

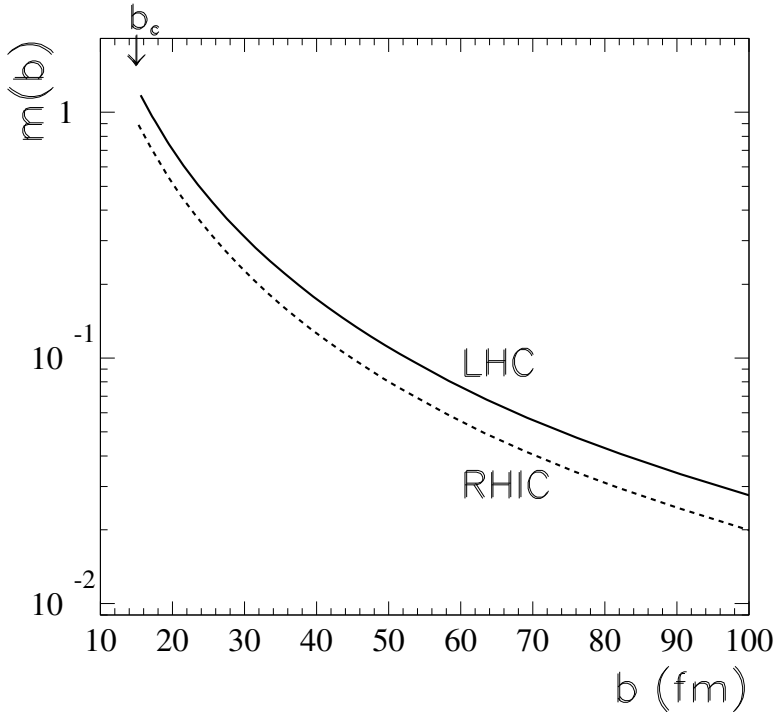


Рис. 4. Средние числа эквивалентных фотонов, поглощенных в ультрапериферических столкновениях ядер, как функции прицельного параметра. Представлены значения для столкновений AuAu при энергиях встречных пучков 100A+100A ГэВ (штриховая кривая) и PbPb, 2.75A+2.75A ТэВ (сплошная кривая) на коллайдерах RHIC и LHC, соответственно. Из работы [20a].

дённые выражения обобщены на случай поглощения трёх и более фотонов.

Представление результатов моделирования начинается с полных сечений одиночной электромагнитной диссоциации, см. таблицу 1. Отметим, что в PbPb столкновениях на LHC полное сечение электромагнитной диссоциации более чем в 25 раз превосходит сечение адронных взаимодействий. Вклад процессов NLO_2 не превышает 2%.

Далее в четвертой главе представлены множественности, распределения по быстротам и поперечным импульсам частиц, образующихся в результате диссоциации: от нуклонов и пионов до ядерных фрагментов различной массы. Показано, в частности, что основная часть нейтронов направлена вперёд и имеет быстроты, которые близки к скорости ядер пучка. Тем не менее, сечение эмиссии нейтронов с быстротами, отличающимися от пучка на 2-3 единицы, составляет $\sim 0.1 - 1$ барна. В модели RELDIS такие нейтроны образуются в результате реакций $\gamma N \rightarrow i\pi n$ ($1 \leq i \leq 8$), происходящих под действием эквивалентных фотонов высоких энергий. Образующийся в таких взаимодействиях нейтрон отдачи уносит заметную часть энер-

Таблица 1. Полные сечения (барны) одиночной электромагнитной диссоциации в AuAu и PbPb столкновениях на коллайдерах RHIC и LHC, вычисленные с помощью RELDIS и в работах [9, 25, 30]. Приведены сечения процессов LO и NLO₂ и их сумма. Для сравнения даны полные сечения адронных взаимодействий ядер, вычисленные с помощью модели abrasion-ablation. Из работы [6a].

	вид фрагмен- тации	σ^{SED} (LO)	σ^{DED} (NLO ₂)	сумма
65+65 A ГэВ AuAu	одиночная электромагнитная диссоциация	82	1.78	83.8
	адронное взаимодействие	–	–	7.29
100+100 A ГэВ AuAu	одиночная электромагнитная диссоциация	93.2	1.86	95.1 88 [9] 95 [25]
	адронное взаимодействие	–	–	7.29 7.09 [30]
2.75+2.75 A ТэВ PbPb	одиночная электромагнитная диссоциация	212	3	215 214 [9] 220 [25]
	адронное взаимодействие	–	–	7.88

гии фотона.

Особое внимание в диссертации уделено выходам нейтронов и точности их описания теорией. Сначала рассмотрены сечения эмиссии одного, двух и трех нейтронов в результате поглощения реальных фотонов ядрами золота и свинца, измеренные в различных лабораториях, и качество их описания теорией. После этого рассматривается эмиссия нейтронов вперёд в результате одиночной электромагнитной диссоциации в столкновениях ультрарелятивистских ядер. Пример сравнения теории и эксперимента представлен на рис. 5. В результате электромагнитных взаимодействий ядра могут терять не только отдельные нейтроны, но и отдельные протоны с образованием тяжёлого остатка, или же претерпевать распады на два и более фрагмен-

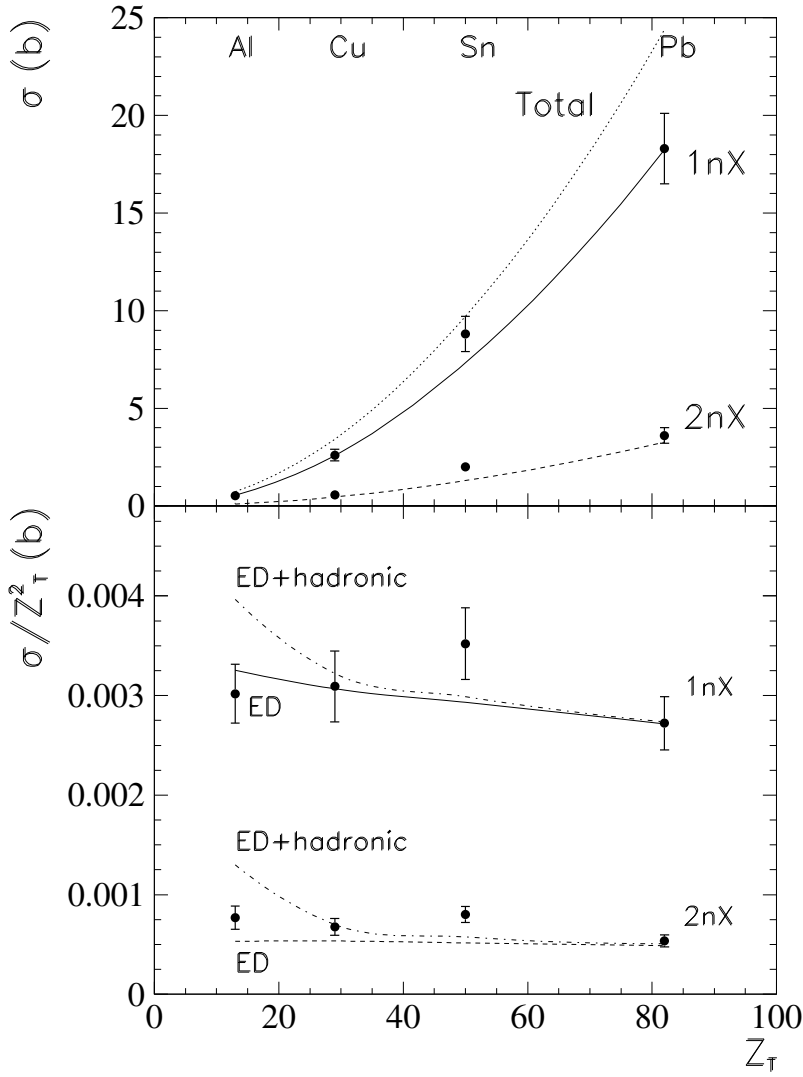


Рис. 5. Верхняя панель: сечения эмиссии вперед одного и двух нейтронов ядрами свинца с энергией $30A$ ГэВ в результате взаимодействия с мишенями Al, Cu, Sn и Pb (точки, измерения работы [10a]). Приведены результаты модели RELDIS для полного сечения одиночной электромагнитной диссоциации (точечная линия), для сечения $1n$ -эмиссии (сплошная линия), для $2n$ -эмиссии (штриховая линия) как функции заряда ядра-мишени Z_T . Нижняя панель: расчетные и экспериментальные значения $1nX$ и $2nX$ сечений после их деления на Z_T^2 . Из работы [10a].

тов (электромагнитное деление и электромагнитная мультифрагментация). В исследующих фрагментацию пучков ядер на различных мишенях экспериментах часто регистрируются только заряды вторичных фрагментов, которые, разумеется, отличаются от заряда ядра-снаряда. Поэтому измеряемые таким способом сечения фрагментации называются сечениями изменения заряда (charge-changing cross sections). Изучаются как полные сечения изменения заряда ядра-снаряда (total charge-changing cross sections), рис. 6, так и парциальные сечения $\sigma(Z)$ образования фрагментов с определённым зарядом Z , которые являются инклюзивными сечениями выхода ядер с данным зарядом, рис. 7. RELDIS хорошо описывает эти данные с учетом вклада адронных взаимодействий ядер, который вычислялся с помо-

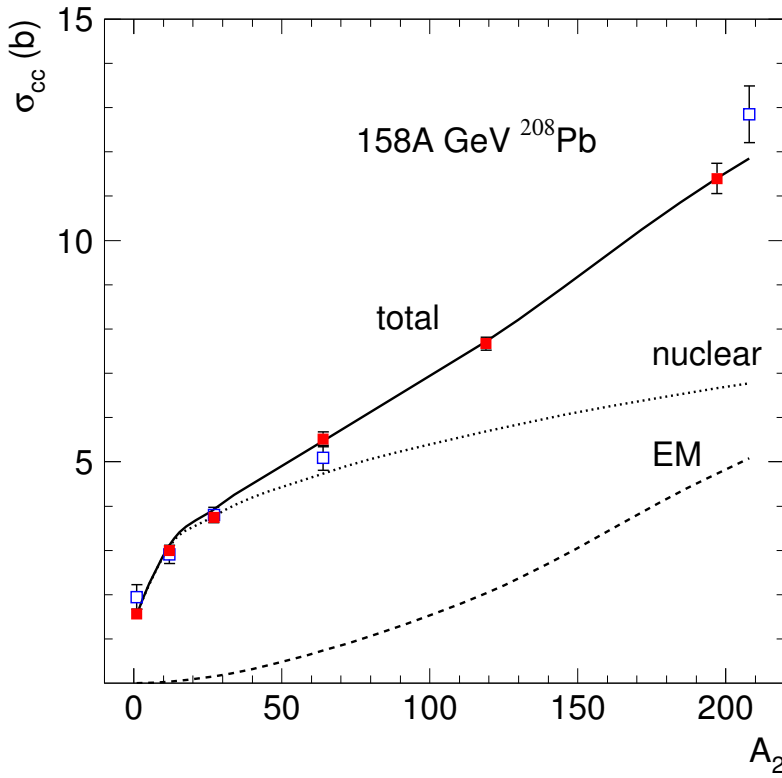


Рис. 6. Полные сечения изменения заряда ядер свинца с энергией 158 А ГэВ при взаимодействии с ядрами-мишенями с массовым числом A_2 . Экспериментальные данные из работы [8a] представлены темными квадратами, из работы [31] – светлыми квадратами. Вклад электромагнитных процессов, вычисленный с помощью модели RELDIS, и вклад адронных взаимодействий ядер показаны пунктирной и точечной кривыми, соответственно. Сплошная кривая показывает сумму этих вкладов. Из работы [8a].

щью модели abrasion-ablation. Вклады электромагнитной и адронной фрагментации в эксперименте не разделялись. Для оценки вклада последней была создана собственная версия модели abrasion-ablation. Были рассмотрены три метода вычисления энергии возбуждения префрагментов, образующихся после стадии abrasion, предлагаемые разными авторами. Оптимальный метод выбран путем сравнения теории с измеренными сечениями $\sigma(Z)$ при взаимодействии 158 А ГэВ ^{208}Pb с ядрами С, Al, Cu, Sn, Au и Pb (данные из работы [8a]). Выбор проверен сравнением с данными по фрагментации 158 А ГэВ ^{115}In на ядрах Sn, W и Pb [9a]. Во взаимодействиях In и Pb с тяжёлыми мишенями наблюдается доминирование электромагнитных процессов при образовании фрагментов с зарядами, отличающимися от ядра пучка на $\Delta Z = +1, 0, -1, -2$. Это демонстрирует настоятельную необходимость привлечения модели RELDIS для описания фрагментации ультрарелятивистских ядер.

В четвертой главе также представлены вычисления вероятностей деления различных ядер с энергией 420 МэВ в ультраперифериче-

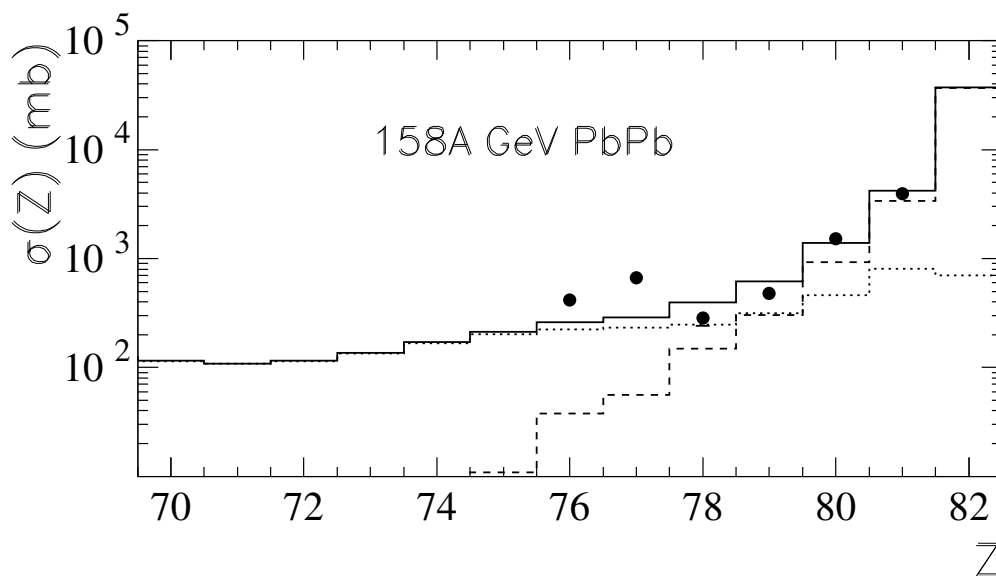


Рис. 7. Сечения изменения заряда для ядер ^{208}Pb с энергией 158 А ГэВ на свинцовой мишени. Результаты модели RELDIS для электромагнитной диссоциации и модели abrasion-ablation для фрагментации в результате сильного взаимодействия представлены штриховой и точечной гистограммами, соответственно. Сплошная гистограмма представляет их сумму, которая сравнивается с экспериментальными данными из работы [32] (точки). Из работы [6a].

ских взаимодействиях с ядрами свинца. Хорошее согласие теории и эксперимента получено для самых легкоделящихся ядер-снарядов $^{231-234}\text{U}$ и $^{226-231}\text{Pa}$. Согласие с данными для тория значительно хуже. Теоретические значения для Ac, Ra, Fr, Rn, и At в целом оказываются значительно ниже экспериментальных, за исключением вероятностей деления для тех изотопов, которые близки к стабильным ядрам Ac, Ra и Fr. Объяснение этому состоит в том, что параметры модели RELDIS были выбраны из условия наилучшего описания деления именно стабильных (или близких к линии стабильности) ядер.

В этой же главе обсуждается возможность мультифрагментации легких ядер под действием кулоновских полей. Относительные вклады различных мод распада в электромагнитной диссоциации 200 А ГэВ ^{16}O в фотоэмульсии удовлетворительно описываются RELDIS.

С помощью RELDIS объяснена природа увеличения зарядов ультрарелятивистских ядер в результате электромагнитных взаимодей-

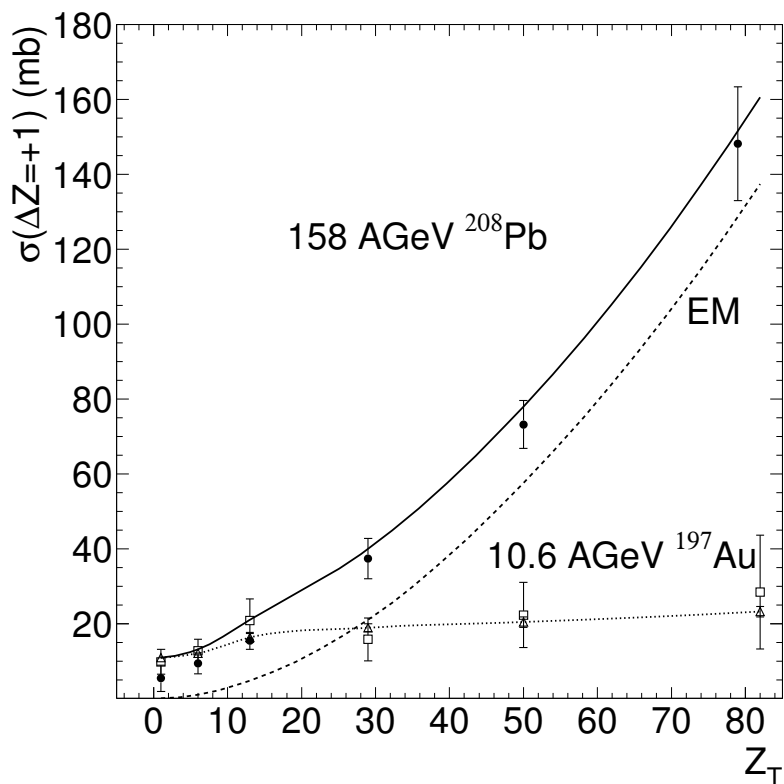


Рис. 8. Сечения подхвата заряда ($\Delta Z = +1$) ядрами золота и свинца в зависимости от атомного номера Z_T ядра-мишени. Данные из работ [7а, 8а] для ядер свинца с энергией 158 А ГэВ обозначены кружками. Сплошная кривая представляет сумму электромагнитного вклада в $\Delta Z = +1$ сечение (штриховая линия, результат RELDIS) и вклада сильного взаимодействия (аппроксимация экспериментальных данных [33, 34] при энергии 10.6 А ГэВ, точечная кривая). Данные из работ [33, 34] представлены треугольниками и квадратами, соответственно. Из работы [7а].

ствий. В экспериментах [7а, 8а] было найдено, что ядра висмута образуются с заметной вероятностью в результате прохождения ядер свинца с энергией 158 А ГэВ через различные мишени, см. рис. 8. В работах [7а, 8а] впервые дано объяснение этого эффекта, который получил название подхвата заряда ($\Delta Z = +1$) ядрами в электромагнитных взаимодействиях. Было показано, что учет моделью RELDIS возбуждения Δ -изобары на нуклонах виртуальными фотонами и, в частности, канала фоторождения отрицательного пиона на нейтроне $\gamma n \rightarrow \pi^- p$, позволяет успешно описать измеренную величину сечения $\sigma(\Delta Z = +1)$. Образование ядер висмута происходит в результате последующего захвата остаточным ядром протона и вылета из ядра π^- . Отметим, что процессы образования дополнительного протона в результате возбуждения Δ -изобары посредством обмена π и ρ мезонами в адронных взаимодействиях ядер, рассмотренные в работе [35], не позволяют объяснить эксперимент [7а, 8а]. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [4а, 5а, 6а, 7а, 8а, 9а] и в

работах [10а, 15а, 18а].

В пятой главе представлены практические применения модели RELDIS, связанные с расчетами одиночной электромагнитной диссоциации ускоренных на LHC ядер свинца. Представлены результаты RELDIS по выходам тяжелых ядерных фрагментов, которые использованы для оценки воздействия таких фрагментов на компоненты ускорителя LHC. Эти фрагменты образуются в точках пересечения встречных пучков как в результате электромагнитных процессов, так и периферических адронных взаимодействий ядер. Рассмотрена электромагнитная и адронная фрагментация ускоренных ядер на ядрах и электронных оболочках остаточного газа. Поскольку такие фрагменты характеризуются близкими к ядрам пучка зарядами и массами, их траектории в магнитном поле ускорителя проходят вблизи траектории пучка. Это затрудняет отделение таких фрагментов от ядер пучка посредством системы коллиматоров. Фрагменты могут попадать на элементы конструкции ускорителя и создавать локальную тепловую нагрузку на них. Результаты пятой главы опубликованы в работах [16а, 21а, 22а].

В шестой главе рассматривается взаимная электромагнитная диссоциация ультрарелятивистских ядер, которая характеризуется возбуждением и распадом обоих сталкивающихся ядер. Регистрация состояний обоих ядер-партнеров по ультрапериферическому столкновению возможна только при наблюдении такого процесса на встречных пучках коллайдеров ядро-ядро. Это дает возможность отбирать события взаимной электромагнитной диссоциации на фоне событий одиночной диссоциации. Процессы взаимного возбуждения ядер и их диссоциации в результате обмена двумя, тремя и четырьмя фотонами представлены на рис. 9. Поглощение каждого из фотонов можно рассматривать независимо от остальных, так как энергия и импульс ядра-излучателя практически не меняются после излучения первого и всех последующих фотонов. Энергия эквивалентного фотона ограничена $E_\gamma \leq E_{max} \sim \gamma/R$, а полная энергия излучающего фотон релятивистского ядра $E_A = \gamma M_A$ с массой M_A достаточно велика.

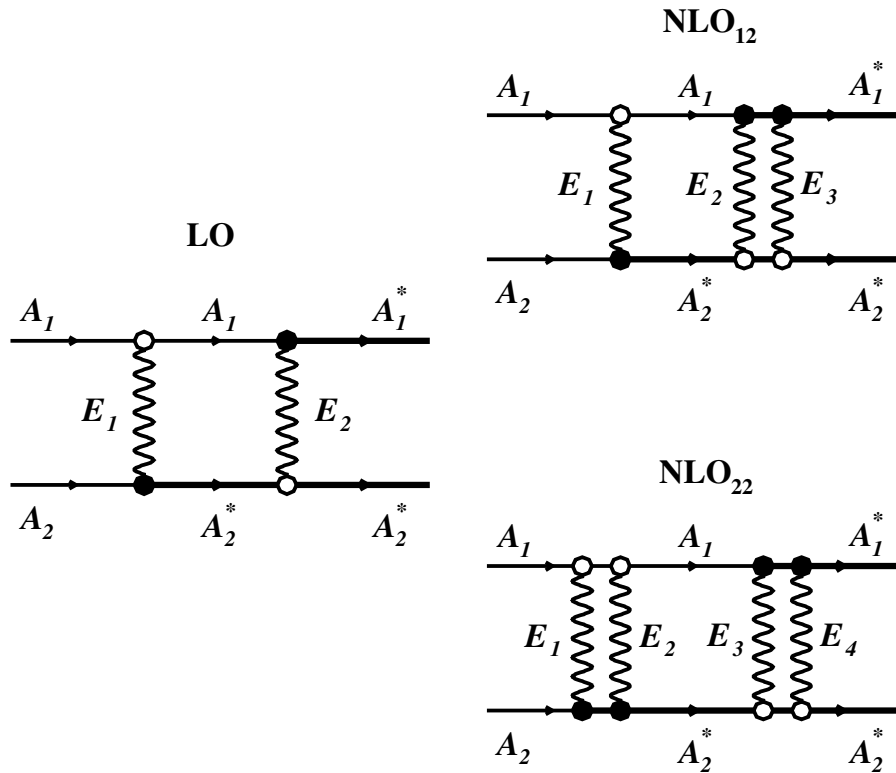


Рис. 9. Взаимная диссоциация ядер лидирующего порядка (LO) и следующих к нему порядков с обменом тремя (NLO₁₂) и четырьмя фотонами (NLO₂₂). Излучение фотона без изменения состояния ядра обозначено светлой вершиной, поглощение фотона с возбуждением ядра или рождением частиц - тёмной вершиной. Из работы [17a].

Поэтому доля энергии, потерянной тяжелым ядром в результате излучения фотона, $r = E_{max}/E_A \sim 1/RM_A$, не превышает 10^{-4} . Кроме этого, считаем одинаковыми спектры эквивалентных фотонов, излучаемые ядром в его основном и возбужденных состояниях. Это обосновано малой длительностью столкновения ядер, которая значительно короче времени девозбуждения ядер, в течении которого, например, происходит испарение нуклонов или деление. Лидирующим процессом взаимной электромагнитной диссоциации является возбуждение и распад обоих ядер-партнёров в результате обмена двумя фотонами (LO), а сечение процесса в результате обмена только одним фотоном оказывается значительно меньше. Во-первых, излучение фотона в последнем случае происходит некогерентно, а сечение этого неупругого процесса пропорционально Z ядра-излучателя (в отличие от когерентного процесса без изменения состояния ядра, сечение

которого пропорционально Z^2) [36]. Во-вторых, при интегрировании по переданному импульсу неупругий формфактор ядра дает значительно меньший вклад по сравнению с упругим формфактором [37].

Для сечения процесса LO, приводящего к диссоциации ядер A_1 и A_2 по каналам i и j , имеем:

$$\sigma_{LO}^{\text{MED}}(i|j) = 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b P_{A_1}(b, i) P_{A_2}(b, j), \quad (4)$$

где $P_{A_1}(b, i)$ и $P_{A_2}(b, j)$ задаются выражением (3) как вероятности диссоциации ядер A_1 и A_2 по каналам i и j , соответственно. Выражение (4) обобщено на процессы NLO₁₂ и NLO₂₂. Здесь для краткости приведём только выражения для полных сечений взаимной диссоциации в столкновениях одинаковых ядер ($A_1 = A_2$), включая сумму вкладов всех процессов:

$$\begin{aligned} \sigma_{LO}^{\text{MED}} &= 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b m_A^2(b) e^{-2m_A(b)}, & \sigma_{\text{NLO}_{12}}^{\text{MED}} &= 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b \frac{m_A^3(b)}{2} e^{-2m_A(b)}, \\ \sigma_{\text{NLO}_{22}}^{\text{MED}} &= 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b \frac{m_A^4(b)}{4} e^{-2m_A(b)}, & \sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}} &= 2\pi \int_{b_c}^{\infty} db b [1 - e^{-m_A(b)}]^2. \end{aligned}$$

Большое внимание посвящено зависимостям вероятностей одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации от прицельного параметра b , см. рис. 10. Показано, что в сравнении с одиночной диссоциацией взаимная электромагнитная диссоциация характеризуется относительно малыми прицельными параметрами $b \sim b_c$, при которых среднее число поглощаемых фотонов велико, см. рис. 4. Это означает, что доля многофотонных возбуждений ядер, включая, например, экзотические трёхфотонные возбуждения гигантских резонансов, во взаимной диссоциации будет значительно выше по сравнению с одиночной. Из таблицы 2 следует, что вклад лидирующего порядка составляет $\sim 63\%$ от $\sigma^{\text{MED}}(\text{tot})$ в столкновениях ядер свинца при энергии ЛНС. Сумма вкладов двойных возбуждений дает $\sim 28\%$ полного

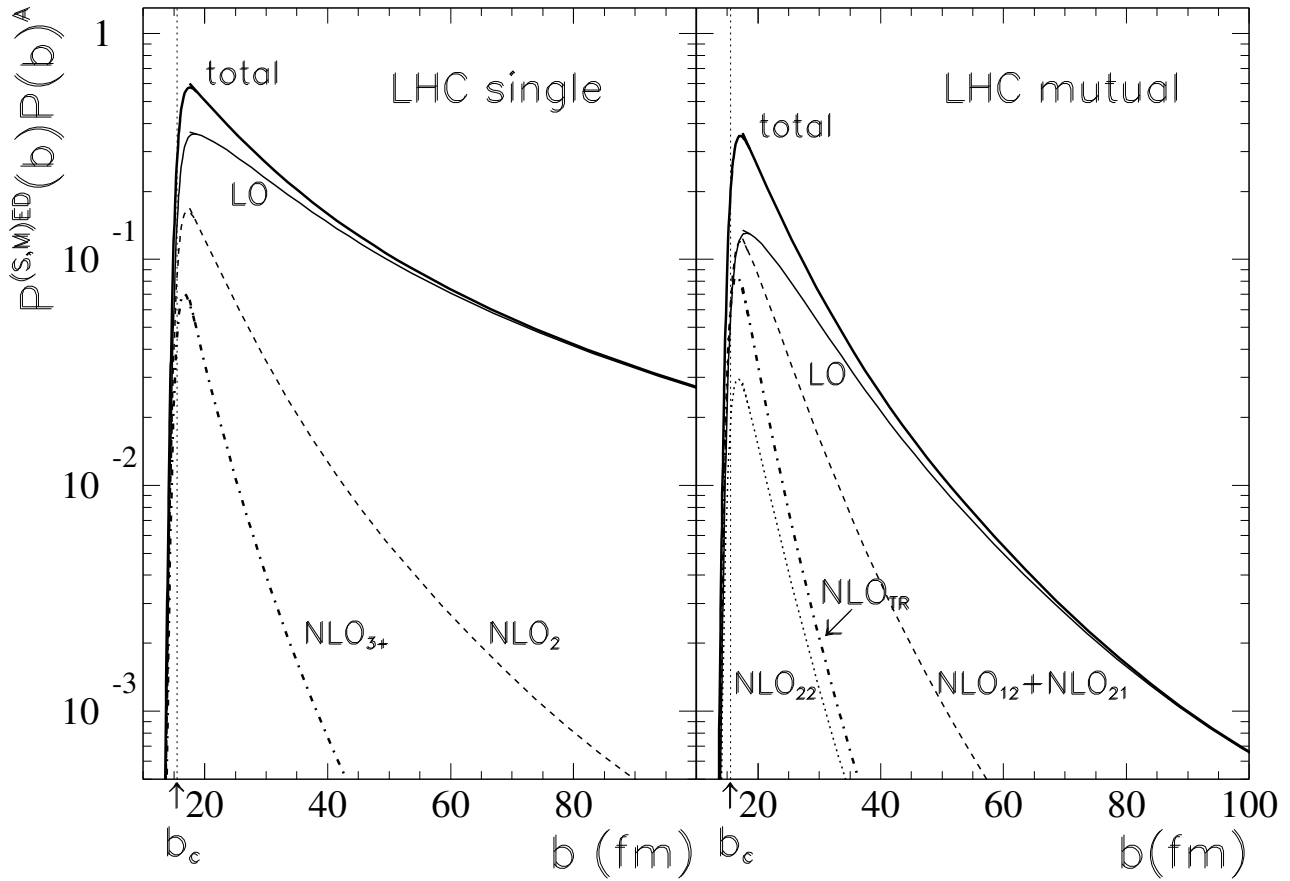


Рис. 10. Вероятности одиночной (слева) и взаимной (справа) электромагнитной диссоциации лидирующего (LO) и следующих порядков (NLO) как функции прицельного параметра b в PbPb столкновениях при энергии $2.75 + 2.75$ А ТэВ на ЛНС. Приведены результаты RELDIS и модели abrasion для ядер с диффузной границей. Толстая сплошная линия соответствует сумме всех процессов, отдельные вклады которых представлены различными линиями с соответствующими обозначениями. Отмечена величина $b_c = 15.54$ фм, относящаяся к модели ядра с резким краем. Из работы [14a].

Таблица 2. Сечения (барны) лидирующего порядка (LO), NLO процессов и полное сечение взаимной электромагнитной диссоциации в PbPb столкновениях при энергии $2.75 + 2.75$ А ТэВ на ЛНС. Из работы [14a].

$\sigma_{\text{LO}}^{\text{MED}}$	$\sigma_{\text{NLO}_{12}}^{\text{MED}} + \sigma_{\text{NLO}_{21}}^{\text{MED}}$	$\sigma_{\text{NLO}_{22}}^{\text{MED}}$	$\sigma_{\text{NLO}_{\text{TR}}}^{\text{MED}}$	$\sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}}$
3.92	1.50	0.23	0.56	6.21

сечения. Оставшаяся часть сечения взаимной электромагнитной диссоциации, $\sim 9\%$, соответствует экзотическим возбуждениям ядер в процессах NLO_{TR} , в которых три или более фотонов поглощаются по меньшей мере одним из сталкивающихся ядер. Поэтому взаимная

электромагнитная диссоциация при ультрарелятивистских энергиях открывает новые возможности для изучения многофотонных возбуждений ядер, в частности тройных возбуждений гигантских резонансов в ядрах. Многофотонные возбуждения характеризуются увеличенным относительным вкладом $3nX$ и $4nX$ распадов в сравнении с однофотонными. Результаты шестой главы опубликованы в работах [6а, 7а, 14а, 19а].

В седьмой главе представлены результаты моделирования взаимной электромагнитной диссоциации ядер золота и свинца, соответственно, на RHIC и LHC, и рассматривается практическое применение результатов RELDIS для мониторинга светимости коллайдеров ядро-ядро. В работе [30] было предложено регистрировать единичные нейтроны от взаимной электромагнитной диссоциации ядер для мониторинга светимости коллайдера в процессе его работы. Частота событий взаимной электромагнитной диссоциации R^{MED} , измеряемая с помощью ZDC-калориметров, позволяет определить светимость коллайдера, $L = R^{\text{MED}}/\sigma^{\text{MED}}$, при условии, что сечение взаимной электромагнитной диссоциации σ^{MED} известно (предсказано теорией) с достаточной точностью. В настоящей диссертационной работе для мониторинга светимости LHC впервые предложено использовать сечение

$$\sigma^{\text{MED}}(\text{LMN}) = \sigma^{\text{MED}}(1nX | 1nY) + \sigma^{\text{MED}}(1nX | 2nY) + \sigma^{\text{MED}}(2nX | 1nY) + \sigma^{\text{MED}}(2nX | 2nY),$$

которое заметно более устойчиво по отношению к неопределённостям в фотоядерных данных по сравнению с сечением $\sigma_{\text{LO}}^{\text{MED}}(1n|1n)$, использованным в работе [30]. Показано, что это значительно увеличивает точность метода. Действительно, как указывается в четвертой главе диссертации (см. [6а, 15а]), вследствие несовершенства используемых в фотоядерных экспериментах процедур сортировки $1nX$ и $2nX$ событий, соответствующие парциальные сечения измеряются с худшей точностью по сравнению с их суммой.

В таблице 3 результаты RELDIS для взаимной электромагнитной

Таблица 3. Отношения сечений взаимной диссоциации в AuAu столкновениях при энергии 65+65 А ГэВ. Экспериментальные данные получены в экспериментах PHENIX, PHOBOS и BRAHMS на RHIC [38]. Абсолютные значения сечений (даны в барнах) и их отношения вычислены с помощью модели RELDIS и модели abrasion. Из работы [14a].

	PHENIX	PHOBOS	BRAHMS	Теория
$\sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}}$ (барн)	–	–	–	3.6
$\sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}$ (барн)	–	–	–	7.29
$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{tot}}^{\text{MED}} + \sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}$ (барн)	–	–	–	10.89
$\sigma_{\text{tot}}^{\text{nuc}}/\sigma_{\text{tot}}$	0.661 ± 0.014	0.658 ± 0.028	0.68 ± 0.06	0.669
$\sigma^{\text{MED}}(1nX \mathcal{D})/\sigma_{\text{tot}}$	0.117 ± 0.004	0.123 ± 0.011	0.121 ± 0.009	0.138
$\sigma^{\text{MED}}(1nX 1nY)/\sigma^{\text{MED}}(1nX \mathcal{D})$	0.345 ± 0.012	0.341 ± 0.015	0.36 ± 0.02	0.439
$\sigma^{\text{MED}}(2nX \mathcal{D})/\sigma^{\text{MED}}(1nX \mathcal{D})$	0.345 ± 0.014	0.337 ± 0.015	0.35 ± 0.03	0.297
$\sigma^{\text{MED}}(1nX 1nY)/\sigma_{\text{tot}}$	0.040 ± 0.002	0.042 ± 0.003	0.044 ± 0.004	0.061

диссоциации сравниваются с измерениями, выполненными на RHIC. Согласие с результатами RHIC дает основание для применения модели при энергиях LHC. Можно ожидать, что модель RELDIS позволяет достоверно вычислять сечения эмиссии одного и двух нейтронов в событиях взаимной электромагнитной диссоциации ядер на LHC. Решающее значение при вычислении таких сечений и, соответственно, выходов близких к ядрам пучка тяжелых фрагментов оказывают относительно мягкие фотоны с $E_\gamma < 5$ ГэВ. Поэтому возможное несовершенство модели RELDIS в отношении фотоядерных реакций при высоких энергиях выше десятков ГэВ не снижает существенно надежность предсказаний сечений каналов с небольшой множественностью нейтронов.

Показано, что при энергиях LHC возбуждение гигантских резонансов (ГР) в обоих сталкивающихся ядрах в результате взаимного воздействия их кулоновских полей не является единственным процессом, который приводит к потере ядрами нейтронов. Возможны асимметричные события электромагнитных возбуждений ядер, в которых, например, возбуждение ГР в одном из ядер сопровождается фотоядерными реакциями под действием более энергичных фотонов на другом ядре.

ZDC-калориметры, которые будут применяться в эксперименте ALICE на LHC, см. работы [12а, 13а] имеют определенные преимущества по сравнению с аналогичными детекторами, установленными на RHIC. Во-первых, на LHC энергетическое разрешение ZDC ожидается на уровне $\sim 10\%$ (см. работы [7] и [12а, 13а]), в то время как на RHIC оно составляет $\sim 20\%$ [39]. Это дает надежду на то, что каналы $3n$ и $4n$ будут успешно идентифицированы на LHC, что открывает возможности для изучения множественных возбуждений гигантских резонансов. В седьмой главе также даны предсказания для np -корреляций во взаимной электромагнитной диссоциации, которые можно будет изучать на LHC с помощью протонных и нейтронных ZDC-калориметров. Результаты седьмой главы опубликованы в работах [6а, 12а, 13а, 14а, 23а, 24а].

В завершающей восьмой главе представлены сечения рождения различных мезонов в $\gamma\gamma$ -взаимодействии эквивалентных фотонов от ядер, ускоренных на RHIC и LHC. Оценён фон для таких реакций, возникающий в результате γA -взаимодействий и периферических адронных ядро-ядерных взаимодействий. Подробно исследовано образование π -мезонов, и показано, что определённая часть фоновых мезонов образуется в центральной области быстрот и поэтому будет мешать выделению $\gamma\gamma$ -событий. Показано, что существует две возможности выделения мезонов от $\gamma\gamma$ -событий путем отбора: (1) по суммарному поперечному импульсу мезонной системы, (2) по величине поперечного импульса каждого из рождённых мезонов. Для эффективного подавления фона с помощью этих критериев рекомендовано установить ограничения на уровне 75 МэВ/с. Результаты восьмой главы опубликованы в работе [11а].

В Заключении отмечается, что исследования электромагнитных возбуждений и фрагментации ультрарелятивистских ядер пересекаются как с традиционной ядерной физикой, изучающей структуру и коллективные возбуждения ядер, так и с новыми направлениями, изучающими столкновения ядер на коллайдерах RHIC и LHC. Перечислены усовершенствования модели фотоядерных реак-

ций, на которой основана модель RELDIS. Отмечается, что сегодняшние практические применения модели связаны с оценкой тепловой нагрузки на элементы ЛНС и мониторингом его светимости. Указано, что востребованность модели в будущем может быть связана с исследованиями кластерной структуры легких ядер посредством изучения их периферических и ультрапериферических столкновений. RELDIS может использоваться для моделирования прохождения ядер космических лучей в атмосфере в дополнение к моделям адронных взаимодействий ядер.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

- 1a. Iljinov A.S., **Pshenichnov I.A.**, Bianchi N., DeSanctis E., Muccifora V. Mirazita M., Rossi P. Extension of the intranuclear cascade model for photonuclear reactions at energies up to 10 GeV // Nucl. Phys. 1997. Vol. A616. Pp. 575–605.
- 2a. Golubev P., Avdeichikov V., Fissum K.G., Jakobsson B., **Pshenichnov I.A.**, Briscoe W.J., O’Rielly G.V., Annand J., Hansen K., Isaksson L., Jäderstrom H., Karlsson M., Lundin M., Schröder B., Westerberg L. Pion emission in $^2\text{H}, ^{12}\text{C}, ^{27}\text{Al}(\gamma, \pi^+)$ reactions at threshold // Nucl. Phys. A. 2008. Vol. 806. Pp. 216–229.
- 3a. **Pshenichnov I.A.**, Berman B.L., Briscoe W.J., Cetina C., Feldman G., Heimberg P., Iljinov A.S., Strakovsky I.I. Intranuclear-cascade model calculation of photofission probabilities for actinide nuclei // Eur. J. Phys. A. 2005. Vol. 24. Pp. 69–84.
- 4a. **Pshenichnov I.A.**, Mishustin I.N., Bondorf J.P., Botvina A.S., Iljinov A.S. Nuclear multifragmentation induced by electromagnetic fields of ultrarelativistic heavy-ions // Phys. Rev. C. 1998. Vol. 57. Pp. 1920–1926.
- 5a. **Pshenichnov I.A.**, Mishustin I.N., Bondorf J.P., Botvina A.S., Iljinov A.S. Particle emission following Coulomb excitation in ultrarelativistic heavy ion collisions // Phys. Rev. C. 1999. Vol. 60. Pp. 044901.1–11.
- 6a. **Pshenichnov I.A.**, Bondorf J.P., Mishustin I.N., Ventura A., Masetti S. Mutual heavy ion dissociation in peripheral collisions at ultrarelativistic energies // Phys. Rev. C. 2001. Vol. 64. Pp. 024903.1–19.
- 7a. Scheidenberger C., **Pshenichnov I.A.**, Aumann T., Datz S., Sümmerer K., Bondorf J.P., Boutin D., Geissel H., Grafström P., Knudsen H., Krause H.F., Lommel B., Møller S.P., Münzenberg G., Schuch R.H., Uggerhøj E., Uggerhøj U.,

- Vane C.R., Ventura A., Vilakazi Z.Z., Weick H. Electromagnetically-induced nuclear-charge pickup observed in ultra-relativistic Pb collisions // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88. Pp. 042301.1–4.
- 8a. Scheidenberger C., **Pshenichnov I.A.**, Sümmerer K., Ventura A., Bondorf J.P., Botvina A.S., Mishustin I.N., Boutin D., Datz S., Geissel H., Grafström P., Knudsen H., Krause H.F., Lommel B., Møller S.P., Münzenberg G., Schuch R.H., Uggerhøj E., Uggerhøj U., Vane C.R., Vilakazi Z.Z., Weick H. Charge-changing interactions of ultrarelativistic Pb ions // *Phys. Rev. C.* 2004. Vol. 70. Pp. 014902.1–16.
- 9a. Uggerhøj U.I., **Pshenichnov I.A.**, Scheidenberger C., Hansen H.D., Knudsen H., Uggerhøj E., Sona P., Mangiarotti A., Ballestrero S. Charge-changing interactions of ultrarelativistic In nuclei // *Phys. Rev. C.* 2005. Vol. 72. Pp. 057901.1–4.
- 10a. Golubeva M.B., Guber F.F., Karavicheva T.L., Karpechev E.V., Kurepin A.B., Maevskaya A.I., **Pshenichnov I.A.**, Reshetin A.I., Shileev K.A., Tiflov V.V., Topilskaya N.S., Szymanski P., Efthymiopoulos I., Gatignon L., Cortese P., Dellacasa G., Arnaldi R., De Marco N., Ferretti A., Gallio M., Musso A., Oppedisano C., Piccotti A., Scomparin E., Vercellin E., Cicalo C., Puddu G., Siddi E. Neutron emission in electromagnetic dissociation of ultrarelativistic Pb ions // *Phys. Rev. C.* 2005. Vol. 71. Pp. 024905.1–10.
- 11a. Chikin K.A., Korotkikh V.L., Kryukov A.P., Sarycheva L.I., **Pshenichnov I.A.**, Bondorf J.P., Mishustin I.N. Inclusive meson production in peripheral collisions of ultrarelativistic heavy ions // *Eur. Phys. J. A.* 2000. Vol. 8. Pp. 537–548.
- 12a. Cortese P., Dellacasa G., Ramello L., ..., **Pshenichnov I. A.**, et al. (ALICE Collaboration). ALICE: Physics performance report, volume I // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2004. Vol. 30. Pp. 1517–1763.
- 13a. Cortese P., Dellacasa G., Ramello L., ..., **Pshenichnov I. A.**, et al. (ALICE Collaboration). ALICE: Physics performance report, volume II // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2006. Vol. 32. Pp. 1295–2040.
- 14a. Baltz A.J., Baur G., d’Enterria D., Frankfurt L., Gelis F., Guzey V., Hencken K., Kharlov Yu., Klasen M., Klein S.R., Nikulin V., Nystrand J., **Pshenichnov I.A.**, Sadovsky S., Scapparone E., Seger J., Strikman M., Tverskoy M., Vogt R., White S.N. The physics of ultraperipheral collisions at the LHC // *Phys. Reports.* 2008. Vol. 458. Pp. 1–171.
- 15a. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Песков Н.Н., Степанов М.Е., **Пшеничнов И.А.** Электромагнитная диссоциация ультрарелятивистских ядер и сечения фотоядерных реакций в области гигантских резонансов // *Ядер. физ.* 2004. Т. 67. С. 2145–2156.

- 16a. **Pshenichnov I.A.**, Karpechev E.V., Kurepin A.B., Mishustin I.N. Electromagnetic and hadronic interactions of ultrarelativistic nuclei // Phys. Atom. Nucl. (ЯФ). 2011. Vol. 74. Pp. 139–150.
- 17a. **Pshenichnov I.A.** Electromagnetic Excitation and Fragmentation of Ultrarelativistic Nuclei // Phys. Part. Nuclei (ЭЧАЯ). 2011. Vol. 42. Pp. 215–250.
- 18a. **Pshenichnov I.A.** Nuclear disintegration induced by virtual photons at heavy ion colliders // In Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes, Proc. of the Second KEK-Tanashi International Symposium, Tanashi, Tokyo, Japan, 25-27 Oct 1999 / Ed. by K. Maruyama, H. Okuno. Elsevier, 2000. Pp. 93–98.
- 19a. **Pshenichnov I.A.** Simultaneous heavy ion dissociation at ultrarelativistic energies // In Nucleus-nucleus collisions, Proc. Bologna 2000 Conference: Structure of the Nucleus at the Dawn of the Century, Bologna, Italy, 29 May - 3 Jun 2000 / Ed. by G. C. Bonsignori, M. Bruno, A. Ventura, D. Vretenar. World Scientific, 2001. Pp. 119–122.
- 20a. **Pshenichnov I.A.** Relativistic heavy ion collider as a photon factory: from GDR excitations to vector meson productions // In Proc. X International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei at Intermediate Energies, EMIN-2003, Moscow 2003, / Ed. by V. Nedorezov. INR, Moscow, 2003. Pp. 234–243.
- 21a. Braun H.-H., Assmann R.W., Ferrari A., Jeanneret J.-B., Jowett J.M., **Pshenichnov I.A.** Collimation of Heavy Ion Beams in LHC // In Proc. 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul. 2004. Pp. 551–553.
- 22a. Jowett J.M., Braun H.-H., Gresham M.I., Mahner E., Nicholson A.N., Shaposhnikova E.N., **Pshenichnov I.A.** Limits to the Performance of the LHC with Ion Beams // In Proc. 9th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 Jul. 2004. Pp. 578–580.
- 23a. **Pshenichnov I.A.**, Bondorf J.P., Kurepin A.B., Mishustin I.N., Ventura A. Electromagnetic dissociation of nuclei and collider luminosity monitoring in ALICE experiment at LHC. ALICE internal note, ALICE-INT-2002-07.
- 24a. Morsch A., **Pshenichnov I.A.** LHC experimental conditions. ALICE internal note, ALICE-INT-2002-034.

Цитированная литература

- [1] Baym G. RHIC: From dreams to beams in two decades // Nucl. Phys. A. 2002. V.698. P.XXIII-XXXII.

- [2] Литвиненко А. Г. Некоторые результаты полученные на коллайдере релятивистских ионов (RHIC) // ЭЧАЯ. 2007. Т.38, вып.2. С.409-459.
- [3] De Cassagnac R.G. What's the matter at RHIC // Int. J. Mod. Phys. A. 2007. V.22. P.6043-6056.
- [4] Тимошенко С.Л., Емельянов В.М. Рождение векторных мезонов в ультрапериферических ядро-ядерных взаимодействиях // ЭЧАЯ. 2006. Т.37, вып.4. С.1150-1182.
- [5] Evans L. The Large Hadron Collider // New J. Phys. 2007. V.9. P.335-356.
- [6] Adler C., Denisov A., Garcia E., Murray M., Stroebele H., White S. The RHIC Zero-Degree Calorimeters // Nucl. Instrum. Meth. A. 2001. V.461. P.488-499.
- [7] Oppedisano C. Centrality measurement in the ALICE experiment with the Zero Degree Calorimeters // ALICE Internal Note 2002. ALICE-INT-2002-08.
- [8] Puddu G., Arnaldi R., Chiavassa E., et al. The zero degree calorimeters for the ALICE experiment // Nucl. Instrum. Meth. A. 2007. V.581. P.397-401.
- [9] Krauss F., Greiner M., Soff G. Photon and gluon induced processes in relativistic heavy-ion collisions // Prog. Part. Nucl. Phys. 1997. V.39. P.503-564.
- [10] Baur G., Hencken K., Trautmann D. Photon-photon physics in very peripheral collisions of relativistic heavy ions // J. Phys. G. 1998. V.24. P.1657-1691.
- [11] Baur G., Hencken K., Trautmann D., Sadovsky S., Kharlov Y. Coherent $\gamma\gamma$ and γA interactions in very peripheral collisions at relativistic ion colliders // Phys. Reports 2002. V.364. P.359-450.
- [12] Bertulani C.A., Baur G. Electromagnetic processes in relativistic heavy-ion collisions // Phys. Reports 1988. V.163. P.299-408.
- [13] Недорезов В.Г., Ранюк Ю.Н. Деление ядер под действием фотонов и электронов промежуточных энергий // ЭЧАЯ. 1984. Т.15, вып.2. С.379-417.
- [14] Айзенберг И., Грайнер В. Модели ядер - коллективные и одночастичные возбуждения / М., Атомиздат, 1975.
- [15] Ишханов Б. С., Орлин В. Н. Полумикроскопическое описание дипольного гигантского резонанса // ЭЧАЯ. 2007. Т.38, вып.2. С.460-503.
- [16] Исаев П.С., Квантовая электродинамика в области высоких энергий / М., Энергоатомиздат, 1984.

- [17] Недорезов В.Г., Туринге А.А., Шатунов Ю.М. Фотоядерные эксперименты на пучках гамма квантов получаемых методом обратного комптоновского рассеяния // УФН. 2004. Т.174, вып.4. С.353-370.
- [18] Palit R., Adrich P., Aumann T., Boretzky K., Carlson B.V., Cortina D., Datta Pramanik U., Elze T.W., Emling H., Geissel H., Hellstrom M., Jones K.L., Kratz J.V., Kulesa R., Leifels Y., Leistenschneider A., Munzenberg G., Nociforo C., Reiter P., Simon H., Summerer K., Walus W. Exclusive measurement of breakup reactions with the one neutron halo nucleus Be-11 // Phys. Rev. C. 2003. V.68. P.034318.1-14.
- [19] Bertulani C. A., Ponomarev V. Yu. Microscopic studies on two-phonon giant resonances // Phys. Reports 1999. V.321. P.139-251.
- [20] Aumann T., Bortignon P.F., Emling H. Multiphonon giant resonances in nuclei // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1998. V.48. P.351-399.
- [21] Boretzky K., Grunschloss A., Ilievski S., Adrich P., Aumann T., Bertulani C.A., Cub J., Dostal W., Eberlein B., Elze T.W., Emling H., Fallot M., Holeczek J., Holzmann R., Kozuharov C., Kratz J.V., Kulesa R., Leifels Y., Leistenschneider A., Lubkiewicz E., Mordechai S., Ohtsuki T., Reiter P., Simon H., Stelzer K., Stroth J., Summerer K., Surowiec A., Wajda E., Walus W. Two-phonon giant resonances in Xe-136, Pb-208, and U-238 // Phys. Rev. C. 2003. V.68. P.024317.1-17.
- [22] Bertulani C. A., Canto L. F., Hussein M. S. The structure and reactions of neutron-rich nuclei // Phys. Reports 1993. V.226. P.281-376.
- [23] Heinz A., Schmidt K. H., Junghans A. R., Armbruster P., Benlliure J., Bockstiegel C., Clerc H.G., Grewe A., de Jong M., Muller J., Pfurtner M., Steinhauser S., Voss B. Electromagnetic-induced fission of ^{238}U projectile fragments, a test case for the production of spherical super-heavy nuclei // Nucl. Phys. A. 2003. V.713. P.3-23.
- [24] Bondorf J. P., Botvina A. S., Iljinov A. S., Mishustin I. N., Sneppen K. Statistical multifragmentation of nuclei // Phys. Reports 1995. V.257. P.133-221.
- [25] Baltz A. J., Rhoades-Brown M. J., Weneser J. Heavy-ion partial beam lifetimes due to Coulomb induced processes // Phys. Rev. C. 1996 V.54. P.4233-4239.
- [26] Klein S. R. Localized beampipe heating due to e^- capture and nuclear excitation in heavy-ion colliders // Nucl. Instr. Meth. A. 2001 V.459. P.51-57.
- [27] <http://aliceinfo.cern.ch/static/aliroot-new/html/roothtml/AliGenReaderEMD.h>

- [28] Fissum K., Caplan H.S., Hallin E.L., Skopik D.M., Vogt J.M., Frodyma M., Rosenzweig D.P., Storm D.W., O'Rielly G.V., Garrow K.R. Inclusive positive pion photoproduction // Phys. Rev. C. 1996. V.53. P.1278-1289.
- [29] Leprêtre A., Beil H., Bergère R., Carlos P., Fagot J., De Miniac A., Veyssière A. Analysis of neutron multiplicities in photonuclear reactions from 30 to 140 MeV in heavy elements // Nucl. Phys. A. 1982. V. 390. P. 221-239.
- [30] Baltz A.J., Chasman C., White S.N. Correlated forward backward dissociation and neutron spectra as a luminosity monitor in heavy-ion colliders. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1998. V.417. P.1-8.
- [31] Cecchini S., Giacomelli G., Giorgini M., Mandrioli G., Patrizii L., Popa V., Serra P., Sirri G., Spurio M., Fragmentation cross sections of 158 A GeV Pb ions in various targets measured with CR39 nuclear track detectors // Nucl. Phys. A. 2002. V.707. P.513-524.
- [32] Dekhissi H., Giacomelli G., Giorgini M., Mandrioli G., Manzoor S., Patrizii L., Popa V., Serra P., Togo V. Fragmentation studies of 158 A GeV Pb ions using CR39 nuclear track detectors // Nucl. Phys. A. 2000. V.662. P.207-216.
- [33] Geer L.Y., Klarmann J., Nilsen B.S., Waddington C.J., Binns W.R., Cummings J.R., Garrard T.L. Charge-changing fragmentation of 10.6 GeV/nucleon ^{197}Au nuclei // Phys. Rev. C. 1995. V.52. P.334-345.
- [34] Hirzebruch S.E., Becker E., Hüntrup G., Streibel T., Winkel E., Heinrich W. Charge-changing interactions of ^{197}Au at 10 GeV/nucleon in collisions with targets from H to Pb // Phys. Rev. C. 1995. V.51. P.2085-2090.
- [35] Bertulani C.A., Dolci D.S. Charge exchange in relativistic heavy-ion collisions //Nucl. Phys. A. 2000. V.674. P.527-538.
- [36] Benesh C.J., Friar J.L. Simultaneous projectile-target excitation in heavy ion collisions // Phys. Rev. C. 1994. V.50. P.3167-3169.
- [37] Hencken K., Trautmann D., Baur G. Equivalent photon approach to simultaneous excitation in heavy ion collision // Phys. Rev. C. 1996. V. 53. P.2532-2535.
- [38] Chiu M., Denisov A., Garcia E., Katzy J., Makeev A., Murray M., White S. // Measurement of mutual coulomb dissociation in $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV Au + Au collisions Phys. Rev. Lett. 2002. V.89. P.012302.1-4.
- [39] Adler C., Strobele H., Denisov A., Garcia E., Murray M., White S. The RHIC zero-degree calorimeters // Nucl. Inst. Meth. A. 2001. V.461. P.337-340.