

На правах рукописи

ШАБЛЯ ЕГОР ЯРОСЛАВОВИЧ

НЕУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР ЗОЛОТА С ЭНЕРГИЕЙ В ДИАПАЗОНЕ 100 -
1147 МЭВ/НУКЛОН С ЯДРАМИ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Экспериментальная ядерная физика»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Богданов Сергей Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент Блинов Александр Всеволодович, доктор физико-математических наук, профессор Нестеров Михаил Мефодьевич
Ведущая организация: Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

Защита состоится 21 декабря 2005 года в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, кор. 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «__» октября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.05 доктор физико-математических наук профессор Титовец Ю.Ф.

Общая Характеристика работы

Актуальность работы

Изучение механизма столкновения высокоэнергетических ядер с ядрами является одной из наиболее актуальных задач современной ядерной физики. Известно, что при взаимодействии двух многонуклонных систем, в условиях сильного сжатия и высокой температуры ядерной материи, возможно существование экзотических состояний ядерной материи с рождением новых эффектов.

В качестве прикладного значения исследований взаимодействий быстрых ядер с ядрами в первую очередь можно выделить оценку радиационных эффектов, вызванных многозарядными частицами. Эти данные необходимы в качестве константного обеспечения расчетов защиты космических и летательных аппаратов, конструирования новых ускорителей, для решения задач радиационной стойкости материалов и применением в медицине.

Одним из основных методов изучения взаимодействий ядер с ядрами является фотографический способ регистрации, поскольку в нем прослеживаются все процессы, связанные с элементарными взаимодействиями: возможность проводить исследования в условиях полной геометрии, регистрация всех заряженных частиц в каждом индивидуальном акте взаимодействия, возможность селекции событий по параметру удара. При этом необходимо отметить, что с помощью эмульсионной методики удобно проводить систематические исследования столкновений ядер, ибо преимуществом эмульсии являются: высокое пространственное разрешение, неограниченная чувствительность к различным энергетическим потерям, анализируются отдельные события. А одинаковые условия экспериментов и единые критерии отбора позволяют произвести последовательный анализ результатов.

Первые сведения о свойствах неупругих взаимодействий двух ядер получены посредством анализа прохождения частиц галактического космического излучения через фотоэмульсии в классических работах Остроумова В.И.

Новый этап исследований начался с получением пучков релятивистских ядер на синхрофазотроне в Дубне и на ускорителе Бэвалак в Беркли. Серия экспериментов с участием ядер-снарядов от протонов до ядер ^{56}Fe позволила систематически изучать влияние масс сталкивающихся ядер на характеристики вторичных частиц, образующихся в расщеплении.

Однако характеристики взаимодействий более тяжелых ядер типа ^{197}Au с ядрами фотоэмульсии в настоящее время практически не изучены. Таким образом, для решения ряда задач ядерной, космической, медицинской физики необходимо иметь информацию о экспериментальных и теоретических параметрах фрагментации налетающих тяжелых ядер, множественности вторичных частиц различного типа, об угловых и импульсных характеристиках этих частиц.

Цель работы

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование процесса неупругого взаимодействия тяжелых ядер золота с нуклонами и ядрами фотоэмульсии при энергиях 100 – 1147 МэВ/нуклон в условиях полного опыта, предоставляемого методом ядерных эмульсий.

Основные задачи:

Разработка и апробирование методики обработки взаимодействий ядер золота с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, включающую в себя создание электронной базы данных характеристик индивидуальных взаимодействий тяжелых ядер ^{197}Au с ядрами фотоэмульсии.

Получение новых экспериментальных данных по взаимодействиям налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, таких как, длины свободных пробегов ядер до неупругого ядерного взаимодействия, множественности вторичных частиц различного типа, их энергетические, импульсные и угловые распределения.

Исследование влияния масс и энергии взаимодействующих ядер на характеристики акта неупругого взаимодействия двух ядер имеющихся в мировой литературе.

Проведение последовательного сравнения полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по каскадно-испарительной модели, рассмотрение возможности описания характеристик изучаемых ядро-ядерных взаимодействий при помощи полуэмпирических моделей.

Научная новизна работы

Научная новизна результатов заключается в том, что впервые проведено подробное исследование процесса неупругого взаимодействия ядер золота с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии. Уточнены средние длины свободного пробега ядер до неупругого ядерного взаимодействия. Впервые в мире определены множественности вторичных частиц различных типов, их корреляционные зависимости, зарядовые,

энергетические, импульсные и угловые характеристики испускаемых частиц при взаимодействии налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии. Проведен анализ влияния энергии и масс взаимодействующих ядер на интегральные характеристики процесса. Проведено последовательное сравнение полученных данных с результатами расчетов по каскадно-испарительной модели, рассмотрены возможности более простых полуэмпирических моделей и сделан ряд выводов их применения.

Научная и практическая значимость

Получены новые экспериментальные данные, отсутствовавшие в мировой литературе по характеристикам взаимодействий налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии.

Поставленный эксперимент позволил установить влияние энергии, массы налетающего ядра и массы ядра мишени на характеристики изучаемого процесса, количественно и качественно сравнить полученные результаты с предсказаниями разного рода моделей.

Практическая ценность результатов исследования определена возможностью их использования для создания новых и развития имеющихся моделей прохождения частиц через гомогенную среду и планирования экспериментов на современных ускорителях, создания баз константного обеспечения расчетов защит ускорителей.

Положения, выносимые на защиту:

Разработана и апробирована методика обработки взаимодействий ядер золота с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, включающая в себя создание электронной базы данных характеристик индивидуальных взаимодействий тяжелых ядер ^{197}Au с ядрами фотоэмульсии.

Новые экспериментальные данные по взаимодействиям налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, такие как, длины свободных пробегов ядер до неупругого ядерного взаимодействия, множественности вторичных частиц различного типа, их энергетические, импульсные и угловые распределения.

Сравнительный анализ влияния масс и энергии взаимодействующих ядер на характеристики акта неупругого взаимодействия двух ядер имеющихся в мировой литературе.

Результаты сравнения полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по каскадно-испарительной модели (КИМ), выводы о возможности описания характеристик изучаемых ядро-ядерных взаимодействий при помощи полуэмпирических моделей.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийских конференциях по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах» (Санкт-Петербург, 1999; 2004; 2005), Всероссийском конкурсе студенческих НИР (Санкт-Петербург, 2002), Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2002; 2003; 2004; 2005), LV National conference on nuclear physics «Frontiers in the physics nucleus» (St. Petersburg, 2005).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 4 статьи в реферируемых ВАК журналах. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 154 страниц машинописного текста, 46 рисунков и 18 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана методика эксперимента: облучение и обработка камеры, поиск неупругих ядерных взаимодействий, измерения и их ошибки, методика обработки, идентификации и способы хранения данных.

Для получения количественных результатов в работе использовалась фотоэмульсионная камера, составленная из 30-40 слоев эмульсии типа БР-2 ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ стандартного состава. Камера была облучена ядрами золота с энергией 1147.2 МэВ/нуклон и средним флюенсом при облучении 500-2000 частиц/см² на ускорителе Бэвалак, Беркли, США.

Пучок входил в стопку фотоэмульсионных пластин примерно параллельно поверхности слоев. Так как фотоэмульсионная камера была разделена на пластинки для облегчения просмотра, то каждой пластинке присваивался свой номер Нпл. Пластинки фотоэмульсии брались размерами 10×10 см². Фотографическая обработка камер осуществлялась в Лаборатории Высоких Энергий ОИЯИ.

Поиск взаимодействий первичных ядер осуществлялся методом двойного, быстрого и медленного, просмотра вдоль первичного следа на микроскопах МБИ-9 при увеличениях

10×15, 20×15 и 60×15. Для определения энергии ядра в точке взаимодействия, использовалась координатная методика измерения расстояний в эмульсии и расчетные зависимости пробег-энергия для всех стабильных ядер от водорода до урана в ядерной фотоэмульсии типа БР-2 с учетом влияния Z³- поправки в ионизационных потерях энергии.

Был проведен сравнительный анализ возможностей различных фотоэмульсионных методик, в результате которого, создана и апробирована методика измерения характеристик ядер ¹⁹⁷Au с ядрами фотоэмульсии. Методика позволяет определять пробег налетающего ядра до взаимодействия, энергию ядра, вызывающего взаимодействие, тип ядра мишени, тип вторичных частиц, азимутальный и полярный угол вылета вторичных частиц, включая тяжелые фрагменты налетающего ядра, энергию вторичных частиц и их заряд, создавать базу индивидуальных взаимодействий тяжелых ядер с ядрами фотоэмульсии.

Предложена традиционная для фотоэмульсионных работ классификация вторичных частиц, возникающих в результате неупругих взаимодействий ядер золота с ядрами фотоэмульсии. Произведена оценка ионизационных потерь. За параметр сравнения I₀ выбиралась ионизация, создаваемая стрипинговой однозарядной частицей налетающего ядра.

Все вторичные частицы из неупругих взаимодействий ядер золота с ядрами фотоэмульсии были разделены на следующие типы:

b-частицы - фрагменты ядра мишени с энергией $E \leq 26$ МэВ/нуклон (пробег в эмульсии $R \leq 3$ мм), испускающиеся в основном на второй стадии реакции;

g-частицы - в основном однозарядные частицы выбитые на первой стадии процесса взаимодействия из ядра мишени с пробегом $R \geq 3$ мм и $I/I_0 > 1.4$;

s-частицы - однозарядные частицы с относительной ионизацией $I/I_0 \leq 1.4$ представляют собой совокупность рожденных мезонов и однозарядных фрагментов ядра-снаряда, поперечный импульс которых превышает 222.6 МэВ/с на нуклон (соответствует $E \geq 26$ МэВ/нуклон в поперечном направлении);

g+s-частицы - совокупность *g*-частиц и *s*-частиц;

s'-частицы - однозарядные частицы ядра снаряда с энергией $E \geq 26$ МэВ/нуклон, поперечный импульс которых меньше 222.6 МэВ/с на нуклон и относительная ионизация $I/I_0 \leq 1.4$;

g'-частицы - двухзарядные частицы ядра снаряда с энергией $E \geq 26$ МэВ/нуклон, поперечный импульс которых меньше 222.6 МэВ/с на нуклон, относительная ионизация таких частиц составляет порядка 3.5I₀;

b' -частицы - многозарядные ($Z_{\text{фр}} \geq 3$) частицы ядра снаряда с энергией $E \geq 26$ МэВ/нуклон, поперечный импульс которых меньше 222.6 МэВ/с на нуклон, относительная ионизация таких частиц превышает 4.510.

Для проверки правильности деления частиц на типы были построены распределения для всех типов частиц по азимутальному углу. Полученные распределения по азимутальному углу близки к прямоугольным для всех типов вторичных частиц. Данный результат подтверждает отсутствие каких-либо существенных ошибок при измерении азимутальных углов вторичных частиц и определения типов вторичных частиц в настоящем эксперименте. Результаты измерений по выбранным методикам были внесены в электронную базу данных, составившую статистический материал настоящей работы.

Вторая глава содержит сведения об экспериментальном и расчетном материале, средних свободных пробегах до неупругого взаимодействия, множественности вторичных частиц различного типа, возникающих в результате неупругих взаимодействий, угловых характеристик этих частиц и связи рассматриваемых характеристик ядро-ядерных взаимодействий с массами и энергией сталкивающихся ядер. Проведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов по существующим моделям взаимодействий ядер и имеющимся экспериментальными данными, опубликованными в различных литературных источниках.

Методом быстрого и медленного просмотра вдоль трека было прослежено 1122 следа от их входа в эмульсию до остановки или взаимодействия. В результате на длине около 30 м было обнаружено 585 взаимодействий ядер ^{197}Au в энергетическом диапазоне 0-1147 МэВ/нуклон. Из них было обработано 332 неупругих взаимодействий ядер ^{197}Au со средней энергией 100-1147 МэВ/нуклон. В процессе обработки расщеплений были определены заряды, полярные и азимутальные углы испускания всех фрагментов налетающего ядра.

Для ансамбля из 108 неупругих взаимодействий ядер ^{197}Au со средней энергией 741.2 ± 19.8 МэВ/нуклон были проведены угловые, ионизационные и пробеговые измерения всех вторичных заряженных частиц (статистика ансамбля 4444 частиц). Дополнительно было обработано 173 нерелятивистских взаимодействий ^{197}Au , в которых атомный номер фрагмента, превышающий 20, определялся по остаточному пробегу фрагмента, а измерения других зарядовых частиц не проводились.

Для проведения сравнительного анализа влияния масс и энергии взаимодействующих ядер на характеристики акта неупругого взаимодействия двух ядер были использованы

известные результаты исследований взаимодействий ядер ^{20}Ne с энергией 0.28 ГэВ/нуклон (296 событий со статистикой ансамбля 3408 частиц), ^{40}Ar с энергией 0.27 ГэВ/нуклон (202 события со статистикой ансамбля 2932 частицы), ^{56}Fe с энергией 1.8 ГэВ/нуклон (625 событий со статистикой ансамбля 8934 частицы), ^{197}Au с энергией 10.2 ГэВ/нуклон (543 события со статистикой ансамбля 44799 частиц) с ядрами фотоэмульсии.

Для проведения последовательного сравнения полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по каскадно-испарительной модели использовались расчетные данные взаимодействий ядер ^{197}Au при энергии 700 МэВ/нуклон с отдельными ядрами, входящими в состав эмульсии любезно предоставленные С. Вокалом.

Расчетная статистика была получена генерацией взаимодействий ядер ^{197}Au при энергии 700 МэВ/нуклон с отдельными ядрами, входящими в состав эмульсии (^1H , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{80}Br , ^{107}Ag), по методу Монте-Карло и дальнейшим суммированием с весами, соответствующими вычисленным сечениям и составу эмульсии. При этом на быстрой (первой) стадии учитывались процессы мезонообразования, лоренцевское сжатие, влияние принципа Паули, эффект изменения плотности ядерной материи по мере развития каскадной стадии взаимодействия. Процесс снятия возбуждения остатков ядер после прохождения быстрой стадии (вторая - медленная стадия) описывался с помощью статистической модели. Суммарная статистика, полученная в рамках каскадно-испарительной модели, составила 1000 событий.

Автор глубоко признателен коллегам по кафедре «Экспериментальная ядерная физика» СПбГПУ, Плющеву В.А. и коллегам по сотрудничеству EMU-01 за предоставленную возможность использовать экспериментальный материал по взаимодействиям быстрых ядер с ядрами фотоэмульсии, С. Вокалу за предоставленный расчетный материал по каскадно-испарительной модели.

На основе экспериментальных измерений были определены длины свободных пробегов ядер ^{197}Au в ядерной фотоэмульсии типа БР-2 до неупругого взаимодействия в различных энергетических интервалах. Полученные результаты приведены на рисунке 1. Там же приведены экспериментальные результаты работы С. J. Waddington, где в качестве мишени использовалась эмульсия типа Ilford-G5, а в качестве снаряда - ^{197}Au .

Из большого числа моделей для расчета неупругих сечений ядро-ядерных реакций мы использовали модель - Карола, Барашенкова В.С. и Брадта-Петерса, по которым были рассчитаны соответствующие длины свободного пробега сечения ядер ^{197}Au до неупругого

взаимодействия. При расчете сечений ядро-ядерных реакций методом Брэдта-Петерса рамках данной работы был проведен подбор эмпирических параметров, значения которых составили $r_0=0.99\pm 0.07$ фм, $\beta=0.98\pm 0.15$.

Из эксперимента и расчетов следует, что длины свободных пробегов до неупругого взаимодействия ядер ^{197}Au в ядерной фотоэмульсии достаточно слабо зависят от энергии налетающего ядра, несмотря на заметную энергетическую зависимость сечений нуклон-нуклонных взаимодействий в рассматриваемом энергетическом диапазоне.

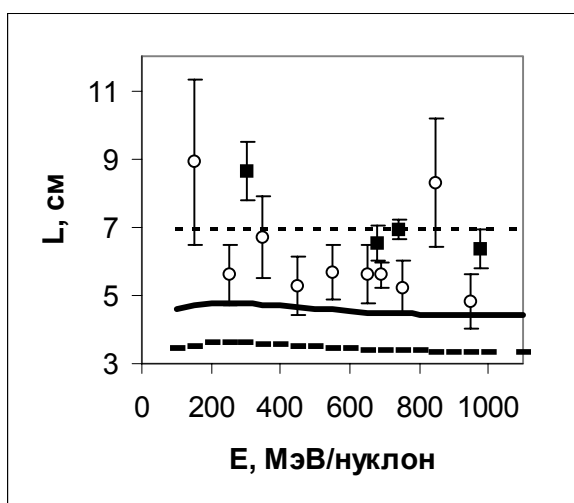


Рисунок 1. Длины средних свободных пробегов до неупругого взаимодействия ядер ^{197}Au в эмульсии (L) в зависимости от энергии налетающего ядра (E). Квадраты - экспериментальные данные настоящей работы, кружки - экспериментальные данные работы С.Дж. Уаддингтона. Сплошная линия - расчет по модели Карола, штриховая линия - расчет по модели Барашенкова, пунктирная линия - расчет по модели Брэдта-Петерса

Экспериментальные данные настоящей работы и работы С.Дж. Уаддингтона близки друг к другу с учетом различия состава и плотности эмульсий БР-2 и Ilford-G5. Расчетные данные предполагают большие сечения взаимодействий ядер золота и, как следствие, меньшие длины свободных пробегов. Наблюдаемые различия между расчетом и экспериментом могут быть связаны с возможным пропуском малолучевых событий в экспериментах и/или неточностью подгоночных параметров в использованных моделях.

Множественности вторичных частиц

На основе экспериментальных измерений в работе были получены множественности всех типов частиц. В таблице 1 приведены средние множественности вторичных частиц в

ядро-ядерных взаимодействиях ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии.

Таблица 1

Средние множественности вторичных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии
Ядро-мишень $\langle N_{g+s} \rangle$, $\langle N_b \rangle$, $\langle N_{s'} \rangle$, $\langle N_{g'} \rangle$, $\langle N_{b'} \rangle$,
 $\langle N_{Em} \rangle$ 21.71 ± 0.45 3.24 ± 0.17 8.96 ± 0.29 4.76 ± 0.21 2.52 ± 0.15 0.82 ± 0.27 0.09 ± 0.09 2.27 ± 0.45 2.27 ± 0.45 1.73 ± 0.40 CNO 13.39 ± 0.57 0.49 ± 0.11 11.32 ± 0.53 5.83 ± 0.38 3.77 ± 0.29 Ag

Br 31.91 ± 0.76 5.88 ± 0.32 8.55 ± 0.39 4.46 ± 0.28 2.05 ± 0.19 Анализ множественности вторичных частиц показал, что увеличение масс сталкивающихся ядер от 20 до 197 и энергии ядра-снаряда в диапазоне 0.28 - 10.2 ГэВ/нуклон в наибольшей степени влияет на число частиц первой стадии процесса и приводит к увеличению всех типов частиц кроме фрагментов ядра мишени.

Для взаимодействий с энергией менее 1 ГэВ/нуклон средняя множественность частиц первой стадии ($g+s$ -частиц) прямо пропорциональна произведению масс взаимодействующих ядер в степени близкой к 0.7 $\langle N_{g+s} \rangle \sim (\text{Анал} \cdot \text{Амиш})^{0.7}$.

Средняя множественность одно (s')-, двух (g')- и многозарядных (b' , $Z_{фр} \geq 3$) фрагментов ядра снаряда $\langle N_{s'} \rangle$, $\langle N_{g'} \rangle$, $\langle N_{b'} \rangle$ последовательно увеличивается при росте массы ядра-снаряда, но немонотонно зависит от массы ядра-мишени.

При росте энергии налетающего ядра золота от 741 до 10200 МэВ/нуклон $\langle N_{g+s} \rangle$ увеличивается почти в три раза, в основном за счет рожденных мезонов, наблюдается более высокая степень разрушения ядра-снаряда, а именно средняя множественность $\langle N_{g'} \rangle$ и $\langle N_{b'} \rangle$ уменьшается, а средняя множественность $\langle N_{s'} \rangle$ увеличивается. Вместе с тем, множественность фрагментов ядра мишени с энергией $E \leq 26$ МэВ/нуклон (b -частиц) имеет слабую зависимость от энергии налетающего ядра золота.

Экспериментальные средние множественности вторичных частиц и средняя множественность всех вторичных заряженных частиц, полученные в результате расчетов по КИМ, близки к экспериментальным значениям соответствующих величин, несколько занижая при этом общую множественность всех заряженных частиц на величину 5-10%

Следует отметить, что расчет по КИМ не учитывает процессов деления и/или мультифрагментации ядра-снаряда, поэтому распределение по числу b' -частиц представляет собой синглет (не приводится) т. е. в любом расщеплении количество b' -частиц равно 1.

Для выяснения причин своеобразной зависимости средней множественности ν -частиц от масс сталкивающихся ядер был проведен анализ корреляционных соотношений между числом различных вторичных частиц в звезде. При этом считалось, что число $g+s$ -частиц (частицы покинувшие ядра на первой стадии) полностью определяет дальнейшую историю события. Поэтому, связь между медленной и быстрой стадиями реакции неупругого взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии выявлялась путем анализа корреляций вида $\langle N_{\nu} \rangle (N_{g+s})$ (см. рисунок 2).

Из рисунка 2 следует, что во взаимодействиях золота до $N_{g+s} \approx 40$ наблюдается примерно линейный рост $\langle N_{\nu} \rangle$ от числа N_{g+s} . В диапазоне изменения параметра $N_{g+s} > 40$ для тяжелого ядра-мишени наблюдается уменьшение множественности ν -частиц при увеличении числа $g+s$ -частиц в расщеплении. Эксперименты с легкими налетающими ядрами Ne_{20} описывают увеличение N_{ν} при росте N_{g+s} . Однако уменьшение N_{ν} при дальнейшем росте N_{g+s} на корреляционных зависимостях не наблюдалась, так как отсутствовали взаимодействия с $N_{g+s} > 40$. Наиболее простым объяснением наблюдаемого вида корреляции $\langle N_{\nu} \rangle (N_{g+s})$, которая характеризует связь между медленной и быстрой стадиями реакции, является учет эффекта "конечности" тяжелого ядра-мишени.

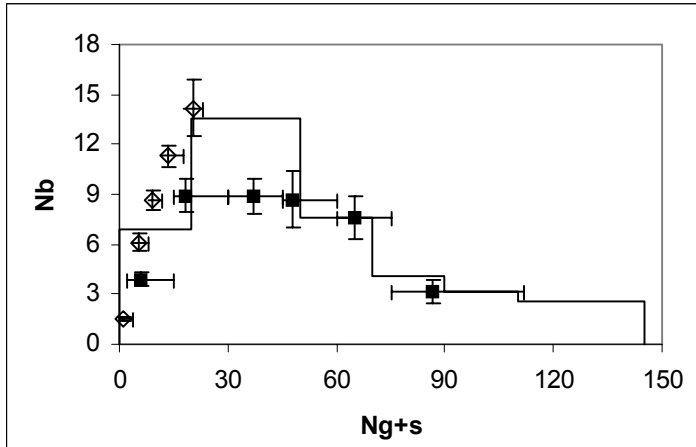


Рисунок 2. Корреляционные зависимости множественности ν -частиц от числа $g+s$ -частиц в расщеплении тяжелых ядер фотоэмульсии, вызванных ядрами ^{20}Ne с энергией 280 МэВ/нуклон (ромбы), ^{197}Au с энергией 741 МэВ/нуклон (квадраты). Сплошная линия - расчет по КИМ.

Потеря тяжелым ядром мишенью $^{107}Ag_{47}$ в процессе быстрой стадии реакции 35-47 протонов, приведет к отсутствию заметного остатка ядра-мишени и, соответственно, отсутствию большой множественности ν -частиц. Наблюдаемый эффект "конечности"

тяжелого ядра-мишени не отмечался ранее в диапазоне масс налетающего иона от 2 до 56 атомных единиц массы, так как малые размеры налетающих ионов не позволяли выбить необходимое число нуклонов из тяжелого ядра фотоэмульсии.

Результаты расчетов, полученных по каскадно-испарительной модели, изображены на рисунке сплошной линией. Легко заметить, что примененная модель довольно хорошо описывает сложную экспериментальную зависимость $\langle N_b \rangle(N_{g+s})$ включая эффект "конечности" тяжелого ядра-мишени, наблюдаемый в эксперименте.

Угловые характеристики вторичных частиц

Анализ угловых характеристик позволил сделать следующие выводы. Увеличение массы ядра-мишени увеличивает изотропность угловых распределений всех типов вторичных частиц. Увеличение массы ядра-снаряда приводит к возрастанию коллимации $g+s$ - и $s'+g'+b'$ -частиц в переднюю полусферу и слабо влияет на направление b -частиц. Особенно это влияние проявляется в характеристиках частиц первой стадии процесса. При уменьшении энергии ядра-снаряда возрастает направленность вперед медленных частиц, выпускаемых ядром-мишенью (b -частиц). Для частиц первой стадии процесса ($g+s$ -частиц) и фрагментов ядра-снаряда второй стадии процесса ($s'+g'+b'$ -частиц) напротив наблюдается увеличение изотропности угловых распределений. Увеличение энергии вторичных частиц приводит к уменьшению их средних углов испускания. Данные расчетов по КИМ удовлетворительно воспроизводят вид угловых распределений и их средние характеристики для согласуются с $g+s$ - и $s'+g'+b'$ -частиц, отличаясь не более чем на 10%, и завышают характеристики для b -частиц.

В третьей главе рассматривается анализ возможных механизмов испускания вторичных частиц. Проведен анализ фрагментации ядра мишени и ядра снаряда. Выявлен характер влияния энергии и масс взаимодействующих ядер на характеристики фрагментов. Получены новые экспериментальные данные по направлению движения фрагментов, образующихся на медленной стадии в результате неупругого взаимодействия ядер золота при энергиях 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии и проведен анализ угловых и импульсных распределений фрагментов налетающих ядер золота и ядер мишени в азимутальной плоскости. Проведено систематическое исследование влияния степени разрушения сталкивающихся ядер на характеристики элементарного акта ядро-ядерных взаимодействий.

Фрагментация ядра мишени. Экспериментальные измерения пробегов, азимутального и полярного угла испускания позволили определить компоненты 3-импульса для каждой из ν -частиц. Для анализа были выбраны компоненты P_z ($P_{||}$) - компонента импульса, направленная вдоль движения ядра снаряда и P_x ($P_{\perp} \cos \psi$) - проекция импульса на ось в азимутальной плоскости, перпендикулярной направлению движения ядра снаряда.

На рисунке 3 представлены экспериментальные (а, б) и расчетные по КИМ (в, г) распределения ν -частиц по указанным компонентам 3-импульса. Эти распределения, как в случае эксперимента, так и в случае расчета, близки к распределениям Гаусса, что позволяет ввести в рассмотрение систему, испускающую частицы изотропным образом с характерной температурой и скоростью движения (двухпараметрическая модель). Оценку "эффективной" температуры системы, испускающей частицы, можно получить, предполагая, что распределение однозарядных частиц по каждому компоненту 3-импульса соответствует распределению Гаусса с параметром $\sigma = (2/\pi)^{0.5} \cdot P_{\perp}$, а дисперсия связана с температурой как $T_0 = \sigma^2/m$. Проведенные оценки дают значения "эффективной" температуры испускания частиц в случае взаимодействий с тяжелыми ядрами порядка 6 МэВ и скоростью движения $\langle \beta_{||} \rangle = 0.025$ скорости света, как для эксперимента, так и для расчетных по КИМ событий.

Фрагментация ядра снаряда. Аналогично фрагментам ядра мишени, для однозарядных (s' -частиц) и двухзарядных (g' -частиц) фрагментов ядра снаряда были построены распределения по проекции P_x для взаимодействий с тяжелыми ядрами эмульсии (рисунок 4). Проведенные оценки дают значения "эффективной" температуры испускания частиц в случае взаимодействий с тяжелыми ядрами порядка 10 МэВ для s' -частиц и порядка 25 МэВ для g' -частиц.

Также был проведен анализ зарядовый спектра тяжелых фрагментов ядра снаряда. На рисунке 5 приведен зарядовый спектр вторичных фрагментов из взаимодействий ^{197}Au с $E=741$ МэВ/нуклон и $E=700$ МэВ/нуклон (по каскадно-испарительной модели) с ядрами фотоэмульсии.

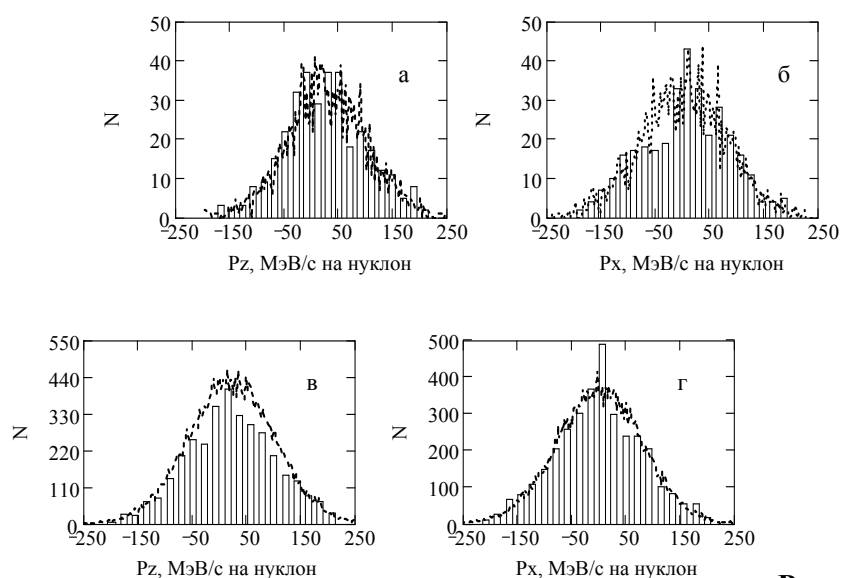
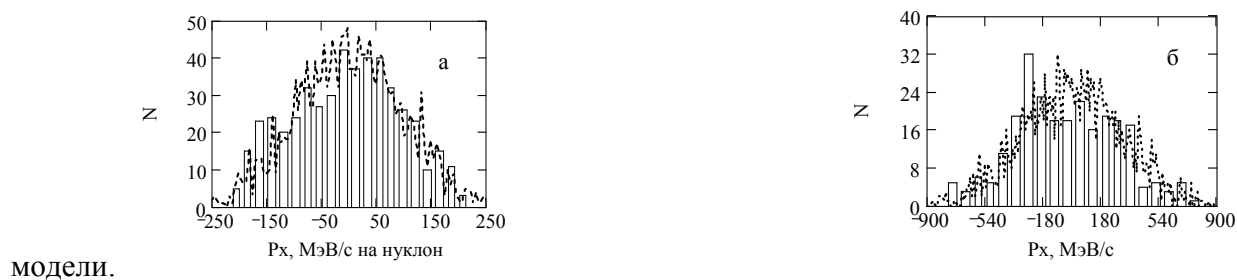


Рисунок 3. Распределения по двум компонентам (P_z, P_x) 3-импульса b -частиц во взаимодействиях ядер ^{197}Au со средней энергией 0.741 ГэВ/нуклон (эксперимент - (а,б), расчет по КИМ (в,г)). Пунктирной линией показаны результаты расчетов по двухпараметрической



модели.

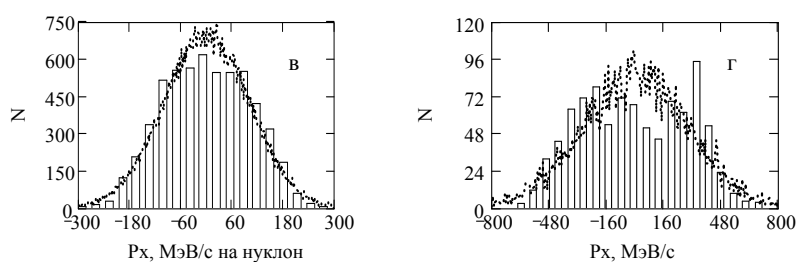


Рисунок 4. Распределения по компоненте (P_x) 3-импульса во взаимодействиях ядер ^{197}Au со средней энергией 0.741

ГэВ/нуклон (эксперимент - s' -частицы (а); g' -частицы (б) расчет по КИМ - s' -частицы (в); g' -частицы (г)). Пунктирной линией показаны результаты расчетов по двухпараметрической модели. Видно, что в эксперименте наблюдаются пики распределений при зарядах $Z_{\text{фр}}=3-10$ и постепенное уменьшение вероятности выхода фрагментов с большим атомным номером. Из рисунка 5 следует, что в теоретических и экспериментальных данных при $E \approx 700$

МэВ/нуклон, наблюдаются две области различия - в области зарядов фрагментов близких к заряду налетающего ядра ($Z_{фр}=70-79$) - расчетные данные значительно превышают эксперимент и в области зарядов фрагментов ($Z_{фр}=3-20$) - в этом случае расчет предсказывает меньший выход фрагментов по сравнению с наблюдаемым на практике.

Полученные различия в экспериментальных и расчетных данных показывают, что КИМ слабо учитывает процессы мультифрагментации возбужденных сверхтяжелых ядер остатков. Как следствие, в расчетах практически отсутствуют взаимодействия с испусканием двух и более тяжелых фрагментов налетающего ядра. Кроме этого в эксперименте наблюдаются взаимодействия с присутствием двух фрагментов с $Z_{фр}$ более 20, что свидетельствует о наличии «делительных» процессов в экспериментальных ансамблях. В расчете подобных взаимодействия не наблюдается, поскольку в алгоритме использованной версии каскадно-испарительной модели процессы «деления» отсутствовали.

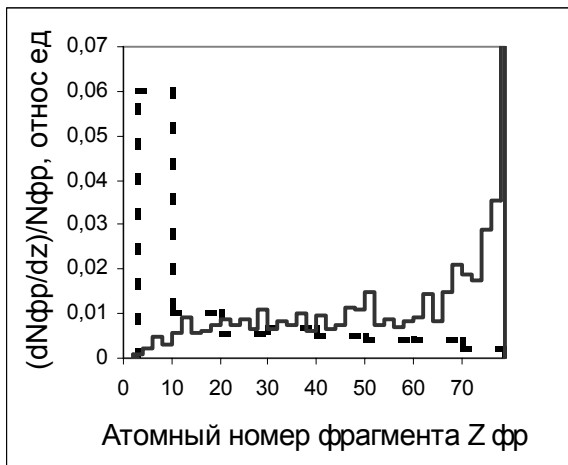


Рисунок 5. Зарядовый спектр вторичных фрагментов из экспериментальных взаимодействий ядер ^{197}Au с $E=741$ МэВ/нуклон (штриховая линия) и расчет по каскадно-испарительной модели с $E=700$ МэВ/нуклон - (сплошная линия) с ядрами фотоэмульсии. Нормировка графика проведена по площади. Для каскадно-испарительной модели значение dN/dZ при $Z_{фр}=79$ достигает 0.11.

Корреляции азимутальных углов вылета вторичных частиц. Для того чтобы определить азимутальный угол индивидуального столкновения двух ядер, было сделано предположение о том, что азимутальный угол многозарядного фрагмента налетающего ядра равен этому углу. Поэтому были построены распределения по азимутальному углу и компоненте 3-импульса ($P_{xb'}$), считая азимутальный угол суммарного импульса тяжелых фрагментов за ноль градусов. Эта начальная точка отсчета азимутального угла была

индивидуальной для каждого взаимодействия, что позволило учесть азимутальный угол каждого столкновения. Следует отметить что, после взаимодействия налетающего ядра с ядром мишенью, b' -частицы наследуют основную долю импульса остатка налетающего ядра. Поэтому направление данных частиц весьма удобно для анализа относительного движения более легких фрагментов налетающего ядра и фрагментов ядра мишени в азимутальной плоскости.

Распределения $P_{xb'}$ для b - и $g'+s'$ -частиц, полученных при взаимодействии налетающего ядра ^{197}Au с ядрами фотоэмульсии на основе экспериментальных и расчетных данных, довольно близки к распределениям Гаусса. Следует отметить, что среднее значение рассматриваемой компоненты для b -частиц находится в отрицательной области значений и составляет -25.2 ± 4.2 МэВ/с на нуклон для нерелятивистских взаимодействий (-11.2 ± 1.2 МэВ/с на нуклон для расчетных по КИМ данных), -6.9 ± 1.7 МэВ/с на нуклон для релятивистских взаимодействий. Это свидетельствует об отталкивании в азимутальной плоскости более легкого ядра мишени по оси, соответствующей направлению движения остатка тяжелого ядра снаряда.

Отметим, что движение $g'+s'$ -частиц по этой оси менее заметно, поскольку масса ядра ^{197}Au почти в два раза превышает массу тяжелых ядер мишени ^{80}Br и ^{107}Ag . Среднее значение рассматриваемой компоненты 3-импульса в азимутальной плоскости $P_{xb'}$ для $g'+s'$ -частиц находится в положительной области значений и составляет 3.6 ± 0.9 МэВ/с на нуклон для взаимодействий с энергией 741 МэВ/нуклон (5.3 ± 0.8 МэВ/с на нуклон для расчетных по КИМ данных), 4.2 ± 1.2 МэВ/с на нуклон для взаимодействий с энергией 10200 МэВ/нуклон. Следует также отметить, что абсолютное значение средних величин $P_{xb'}$ для $g'+s'$ -частиц существенно меньше, чем соответствующие значения для b -частиц. Таким образом, можно предположить, что наблюдается взаимное отталкивание взаимодействующих ядер в азимутальной плоскости.

Для изучения относительности движения двух многозарядных фрагментов налетающего ядра (b' -частицы) между собой из массива обработанных расщеплений ядер ^{197}Au с энергией 0.741 ГэВ/нуклон были отобраны тринадцать событий, имевших, как минимум, два фрагмента налетающего ядра с зарядами $Z_{\text{фр}} \geq 20$ элементарных единиц заряда каждый. Средний азимутальный угол разлета составил $160^\circ \pm 2^\circ$, при этом минимальный угол разлета в азимутальной плоскости составил 108.2° , а шесть из них превышают 170° . Если

предположить, что нет взаимной зависимости движений двух тяжелых фрагментов с $Z_{фр} \geq 20$, то вероятность наблюдаемого события составит 1.2×10^{-4} . Таким образом, можно с уверенностью сказать, что при наличии в событии двух тяжелых фрагментов ядер золота с $Z_{фр} \geq 20$ влияние фрагментов друг на друга существенно выше чем влияние пары ядро снаряд - ядро мишень.

Влияние степени разрушения ядра снаряда и/или ядра мишени на характеристики вторичных частиц. Проведенный систематический анализ влияния степени разрушения сталкивающихся ядер на характеристики элементарного акта ядро-ядерных взаимодействий позволил отметить следующие результаты:

С увеличением степени разрушения ядра снаряда и/или ядра мишени наблюдается рост множественности фрагментов как ядра мишени, так и ядра снаряда.

С увеличением степени разрушения ядра снаряда и/или ядра мишени довольно резко уменьшается средний заряд (4.5 раза) тяжелых фрагментов налетающего ядра. При этом для периферических взаимодействий наблюдается смещение зарядового спектра в область больших $Z_{фр}$, а для центральных взаимодействий напротив максимальное количество реакций приходится на область $Z_{фр} = 3 \div 5$.

Спектры однозарядных и двухзарядных стриппинговых фрагментов ядра снаряда с ростом степени развала ядер ужесточаются, растет средняя энергия, поперечный и продольный импульсы.

При увеличении ядра снаряда и, как следствие, числа взаимодействующих нуклонов в 2.7 раза наблюдается уменьшение степени влияния провзаимодействовавшего протона налетающего ядра на характеристики фрагментов, т.е. наблюдается в какой-то степени процесс насыщения.

В заключении сформированы основные результаты и выводы.

В условиях полного опыта, выполненного методом ядерных эмульсий, проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов неупругого взаимодействия ядер ^{197}Au с водородом (H), легкими (C, N, O) и тяжелыми (Ag, Br) ядрами фотоэмульсии при энергиях 100 – 1147 МэВ/нуклон.

Разработана и апробирована методика обработки взаимодействий ядер золота с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, разработан ряд программ, обрабатывающих результаты измерений, использующих как стандартные, так и

оригинальные алгоритмы, создана электронная база данных характеристик индивидуальных взаимодействий тяжелых ядер ^{197}Au с ядрами фотоэмульсии.

Получены новые экспериментальные данные по взаимодействиям налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии, такие как, длины свободных пробегов ядер до неупругого ядерного взаимодействия, множественности вторичных частиц различного типа, их энергетические, импульсные и угловые распределения.

Проведено систематическое исследование влияния масс и энергии сталкивающихся ядер на множественность и корреляции множественности различных вторичных частиц в расщеплении. Показано, что качественный характер изменений множественностей, угловых и импульсных характеристик вторичных частиц аналогичен характеру изменений, обнаруженных при взаимодействии более легких ядер.

Проведен последовательный анализ относительности движения фрагментов налетающего ядра и ядра мишени в азимутальной плоскости. Обнаружено отталкивание взаимодействующих частиц в азимутальной плоскости. Показано, что частицы одного происхождения слабо влияют на направление движения друг друга. При наличии в событии двух тяжелых фрагментов ядер золота с $Z_{\text{фр}} \geq 20$ влияние фрагментов друг на друга существенно выше, чем влияние пары ядро снаряд - ядро мишень.

Проведено систематическое исследование влияния степени разрушения сталкивающихся ядер на характеристики элементарного акта ядро-ядерных взаимодействий.

Проведено детальное сравнение полученных и имеющихся экспериментальных данных с результатами расчетов по КИМ. Каскадно-испарительная модель, успешно зарекомендовавшая себя при описании взаимодействий более легких ядер, оказалась в целом пригодной для описания характеристик взаимодействия налетающих ядер ^{197}Au с энергией в диапазоне 100 - 1147 МэВ/нуклон с ядрами фотоэмульсии.

Существует принципиальная возможность описания угловых, энергетических и импульсных распределений частиц, испускаемых на второй стадии процесса, при помощи двухпараметрической модели. Пробеги ядер ^{197}Au до неупругого взаимодействия неплохо согласуются с расчетами по модели Брэдта-Петерса с параметрами $r_0=0.99\pm 0.07$ фм, $\beta=0.98\pm 0.15$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- Богданов С.Д., Журкин Е.Е., Рабинович Л.В., Шабля Е.Я. Электронная база данных характеристик прохождения тяжелых ионов через ядерную эмульсию БР-2 // Сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции "Фундаментальные исследования в технических университетах", Изд-во СПбГТУ -1999. -С.106. (проект РФФИ 98-02-18173).
- Бакаев В.А., Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Молчанов В.М., Шабля Е.Я. Средняя длина пробега быстрых ионов до неупругого взаимодействия // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -2003, -вып.4, -С.41-44.
- Богданов С.Д., Шабля Е.Я., Космач В.Ф., Леонов Н.Н., Плющев В.А. Импульсные распределения фрагментов из взаимодействий ионов золота с ядрами фотоэмульсии. // Материалы VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах»: СПбГПУ, -2004. - С.65.
- Бакаев В.А., Богданов С.Д., Богданов С.С., Космач В.Ф., Молчанов В.М., Плющев В.А., Шабля Е.Я. Фрагментация быстрых ионов. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -2004. -вып.4. -С.45-47.
- Богданов С.Д., Бакаев В.А., Шабля Е.Я. и др. Множественность вторичных заряженных частиц, образующихся при прохождении ионов золота через фотоэмульсию.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -2005. -вып.3. -С.43-46.
- Богданов С.Д., Шабля Е.Я., Вокал С. и др. Взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии при релятивистских и нерелятивистских энергиях. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. -2005. -№1(39). -С.91-99.
- Богданов С.Д., Шабля Е.Я., Леонов Н.Н. Угловые характеристики вторичных частиц в столкновениях ядер золота с ядрами фотоэмульсии. // Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах». СПб.: Изд-во СПбГПУ. -2005. С.117.