



Ю-681

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2006-123

На правах рукописи
УДК 539.173+539.172.84

ЮРЕВИЧ
Владимир Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР
И ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ПУЧКАХ
ЛЕГКИХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2006

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера
и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Е.А. Строковский

доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. Сумачев

доктор физико-математических наук

Ю.Е. Титаренко

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий, г. Протвино.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2006 г.

на заседании диссертационного совета Д 720.001.02

в Лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

Объединенного института ядерных исследований

по адресу г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь совета:
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

 В.А. Арефьев

Актуальность темы. Взаимодействие легких ядер с тяжелыми ядрами при энергиях 0,5–5 АГэВ, относящихся к области промежуточных энергий, является одним из эффективных способов получения горячих ядер с малым возбуждением коллективных степеней свободы. В таких взаимодействиях реакция деления ядер и эмиссия нейтронов относятся к основным процессам распада и девозбуждения ядерной системы. В то же время эта область энергий характеризуется появлением новых каналов быстрого распада, реакции расщепления с вылетом большого числа нуклонов и легких фрагментов и реакции мультифрагментации с образованием нескольких фрагментов промежуточной массы, сечения которых возрастают с повышением энергии. Наличие нескольких мод распада возбужденной ядерной системы – расщепление, мультифрагментация, деление и испарение – порождает определенные трудности на пути экспериментального и теоретического подходов по исследованию динамики ядро-ядерного взаимодействия, реакции деления ядер и эмиссии нейтронов в области энергий выше 0,5 ГэВ/нуклон.

Несмотря на длительную историю экспериментального и теоретического изучения деления ядер, задача получения надежных данных по сечениям деления ядер различных нуклидов в области промежуточных энергий и их адекватного теоретического описания является весьма актуальной. Результаты наших измерений сечений деления ^{181}Ta , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и ^{237}Np на пучках протонов и дейтронов [1, 2] являются существенным вкладом в базу экспериментальных данных, служащей основой для проверки теоретических моделей и получения оценочных зависимостей.

Эмиссия нейтронов сопровождает все стадии распада возбужденной ядерной системы, образующейся в столкновении, и на нее приходится значительная доля энергии налетающей частицы. Исследование двойных дифференциальных сечений образования нейтронов дает ценную информацию

для понимания процесса распада возбужденной ядерной материи и является весьма актуальным для развития теории ядерных реакций в области промежуточных энергий. Высокая актуальность таких исследований при энергиях $E \geq 1$ АГэВ объясняется также тем, что имеется только несколько экспериментов на пучке протонов в этой области энергий, выполненных в КЕК (Япония), SACLAY (Франция), ИТЭФ и нашей группой в ОИЯИ [3, 4]. Измерения на ядерных пучках были впервые проведены в ОИЯИ автором диссертации совместно с сотрудниками Радиевого института им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург [3].

В недавних экспериментах по изучению эмиссии заряженных ядерных фрагментов было показано, что в центральных столкновениях протонов и ядер промежуточных энергий с тяжелыми ядрами образуются состояния ядерной системы с возбуждением в несколько МэВ на нуклон и плотностью существенно меньшей плотности ядер в нормальном состоянии. Это приводит к быстрому тепловому расширению ядерной системы и ее распаду через фазовый переход «жидкость-газ» согласно статистической теории мультифрагментации. Естественно ожидать, что в процессе распада одновременно с заряженными фрагментами происходит также быстрый сброс части нейтронов, при этом их характеристики должны отражать свойства данного процесса. В наших работах [3, 4] показано, что экспериментальное изучение эмиссии нейтронов может дать новую ценную информацию об этом явлении. Это подчеркивает актуальность нейтронных исследований на пучках релятивистских ядер.

Трудности на пути создания теории ядро-ядерных взаимодействий при энергиях несколько ГэВ на нуклон и связанная с этим проблема разработки эффективных компьютерных кодов для моделирования таких взаимодействий делают актуальной задачу развития феноменологических моделей для описания характеристик испускаемых частиц. Примером такой модели является модель движущихся источников, развиваемая для анализа нейтронных спектров в КЕК (Япония). В наших работах [3, 4] предпринято дальнейшее развитие модели на основе четырех движущихся источников, отражающих основные моды распада

возбужденной ядерной системы и вносящие существенный вклад в эмиссию нейтронов. Модель хорошо воспроизводит двойные дифференциальные распределения нейтронов в области углов $\theta \geq 30^\circ$, т.е. в области фрагментации ядра-мишени, и позволяет выделить нейтроны, испускаемые на стадии мультифрагментации, оценить сечение их образования и характерную температуру возбужденной ядерной системы в момент ее распада.

На создание базы ядерных данных для различных ядерно-физических задач и научно-технических приложений в области промежуточных энергий, таких как, развитие на основе сильноточных ускорителей более безопасной ядерной энергетики и установок для трансмутации отходов атомных станций и ряда других, нацелены международные и национальные программы в США, Европейском союзе, Японии и России. Важной составляющей этой деятельности является получение новых экспериментальных данных по реакциям деления и образованию нейтронов в экспериментах со свинцовыми мишенями на пучках легких релятивистских ядер, так как свинец является наиболее часто используемым материалом при проектировании нейтронопроизводящей мишени. Дискуссия о преимуществе использования пучка дейтронов вместо протонов для генерации нейтронов и трансмутации радиоактивных отходов требует для окончательного решения вопроса проведения сравнительных экспериментов на пучках протонов и дейтронов. Такие систематические исследования, включающие в себя изучение пространственно-угловых распределений реакций деления в поле нейтронного источника, двойных дифференциальных сечений и выходов нейтронов, множественности нейтронов и уносимой ими энергии, были выполнены автором диссертации вместе с соавторами на пучках протонов и дейтронов в ОИЯИ [4-6].

От развития экспериментальных методов в значительной степени зависит прогресс в получении новых данных по реакциям деления и нейтронным распределениям в измерениях на ускорителях, в том числе в условиях «плохой» геометрии. Методы твердотельных трековых детекторов ядер (ТТД), пороговых

детекторов нейтронов и времени пролета широко используются в различных ядерно-физических исследованиях. Автором диссертации вместе с группой сотрудников Радиевого института им. В.Г. Хлопина были предприняты значительные усилия по развитию этих экспериментальных методов для проведения исследований на ускорителях и получения надежных данных по сечениям и выходам реакций деления и нейтронов [7,8].

Основная цель диссертации состоит в исследовании на основе развитых методов и созданных установок процессов деления ядер и образования нейтронов в экспериментах с тонкими и толстыми мишенями на пучках легких релятивистских ядер и в изучении закономерностей, присущих этим физическим явлениям.

Научная новизна. В результате систематических многолетних исследований на выведенных пучках релятивистских ядер синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ впервые получены экспериментальные данные по двойным дифференциальным сечениям образования нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях несколько ГэВ на нуклон и оценены средние множественности нейтронов. Впервые подробно изучена зависимость дифференциальных распределений, интегральных и энергетических характеристик нейтронов от энергии и типа частиц пучка и размера мишени на примере взаимодействия протонов и дейтронов со свинцовыми мишенями в наиболее интересной для приложений области энергий 1–3,7 ГэВ. Сделан значительный вклад в базу данных по сечениям деления протонами и дейтронами в области промежуточных энергий. Впервые проведено сравнительное исследование пространственно-угловых распределений и полных выходов реакций деления для различных тяжелых ядер в нейтронном поле протяженной свинцовой мишени на пучках протонов и дейтронов в зависимости от их энергии.

В диссертации предложен новый экспериментальный метод исследования

эволюции и распада возбужденной ядерной системы, образуемой в ядро-ядерных столкновениях в области промежуточных энергий, путем изучения эмиссии нейтронов. Эмиссия нейтронов сопровождает все стадии распада возбужденной ядерной системы, и на нее приходится значительная доля энергии налетающей частицы. Показано, что изучение эмиссии нейтронов является эффективным методом получения ценной и в ряде случаев уникальной информации о характеристиках возбужденной ядерной системы на различных стадиях ее эволюции.

Развита модель движущихся источников на основе выделения физических процессов, вносящих значительный вклад в эмиссию нейтронов. Модель направлена на анализ результатов измерений двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в ядро-ядерных столкновениях в области промежуточных энергий и их параметризацию. Она оказалась эффективным инструментом для изучения динамики ядро-ядерных столкновений и оценки параметров температуры ядерной системы на различных стадиях ее распада. Модель применена для анализа эмиссии нейтронов во взаимодействиях протонов и легких ядер с ядром свинца. Впервые на основе нейтронных данных оценены параметр температуры для горячей неравновесной стадии взаимодействия и температура возбужденного ядерного остатка в момент распада по каналу мультифрагментации.

Впервые экспериментально подробно изучены преимущества, которые дает переход от пучка протонов к пучку дейтронов для генерации нейтронов и деления тяжелых ядер. Систематические исследования включают в себя сравнение сечений деления, пространственно-угловых распределений и полных выходов реакций деления в нейтронном поле протяженной свинцовой мишени, двойных дифференциальных сечений и выходов нейтронов, множественности нейтронов и уносимой ими энергии.

Для выполнения исследований на ускорителях развиты метод твердотельных трековых детекторов ядер на основе лавсана для регистрации ядерных фрагментов и осколков деления, метод пороговых детекторов

нейтронов для изучения нейтронных полей с жестким энергетическим спектром и метод экспериментального определения эффективности нейтронных детекторов на базе органических сцинтилляторов для спектрометрии нейтронов методом времени пролета. Развитые методы послужили методической основой для исследований, описанных в диссертации.

Практическая ценность диссертации. В диссертации приведен большой набор новых экспериментальных данных по сечениям и выходам реакций деления ядер, дифференциальным распределениям и интегральным характеристикам нейтронов, испускаемых из свинцовых мишеней, полученным на пучках легких ядер промежуточных энергий. Многие представленные в диссертации результаты получены впервые. Совокупность представленных экспериментальных результатов может быть использована для развития теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий и компьютерных кодов для моделирования прохождения частиц высоких энергий в веществе. Они также будут полезны при проектировании установок и планировании новых исследований для широкого круга приложений ускорителей в науке, технологии и медицине, а также для подготовки пилотируемых длительных космических полетов к другим планетам.

Развитые методы измерения и анализа данных являются эффективным инструментом для исследования динамики ядро-ядерных взаимодействий, эмиссии нейтронов и нейтронных полей на ускорителях, деления ядер высокоэнергетическими частицами в области промежуточных энергий.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Получен большой объем новых экспериментальных данных по делению тяжелых ядер и образованию нейтронов на пучках релятивистских легких ядер на базе развитых методов и созданных установок. Представленные в диссертации результаты имеют важное значение для развития теоретических

представлений о динамике ядро-ядерных взаимодействий и взаимодействия высокоэнергетических частиц с веществом, компьютерных кодов для моделирования этих физических процессов и ряда важных современных ядерных технологий на базе ускорителей.

Впервые измерены двойные дифференциальные сечения образования нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях при энергии несколько ГэВ на нуклон.

Впервые проведено систематическое изучение двойных дифференциальных распределений нейтронов для различных свинцовых мишеней на пучках протонов и дейтронов в зависимости от их энергии в наиболее интересной для приложений области энергий 1–3,7 ГэВ.

Сделан значительный вклад в базу данных по сечениям деления тяжелых ядер, что позволило проанализировать тенденцию в изменении делимости различных ядер в области энергий от 100 МэВ до 10 ГэВ и впервые провести сравнение делимостей ядер для протонов и дейтронов при энергии 1 ГэВ.

Впервые подробно исследованы пространственно-угловые распределения выходов реакций деления в нейтронном поле протяженной свинцовой мишени для материалов мишени и blankets, а также минорного актинида ^{237}Np , как функция энергии пучка протонов и дейтронов.

2. Предложен новый экспериментальный метод исследования эволюции и распада возбужденной ядерной системы, образуемой в ядро-ядерных столкновениях в области промежуточных энергий, основанный на изучении эмиссии нейтронов. Предложенный метод базируется на анализе двойных дифференциальных сечений образования нейтронов с помощью развитой модели движущихся источников и является эффективным инструментом для изучения характеристик возбужденной ядерной системы на различных стадиях ее эволюции.

Развита модель четырех движущихся источников, соответствующих физическим процессам, вносящим значительный вклад в эмиссию нейтронов,

для анализа и параметризации двойных дифференциальных сечений образования нейтронов и изучения динамики ядро-ядерных взаимодействий.

Показано на примере взаимодействий легких ядер с ядром свинца при промежуточных энергиях, что предложенный метод позволяет произвести прямое измерение средней температуры возбужденной ядерной системы на различных стадиях ее распада, в том числе оценить с относительно высокой точностью значение T_f , соответствующее моменту распада на независимые ядерные фрагменты.

Впервые изучена зависимость значений средней множественности нейтронов и средней энергии возбуждения ядер-остатков от массового числа ядра-снаряда с энергией несколько ГэВ на нуклон.

3. Впервые на базе совокупности экспериментальных данных по эмиссии нейтронов в реакции $Pb(p, nx)$ проанализированы зависимости средней множественности нейтронов и средней энергии, затрачиваемой на образование нейтронов, от энергии налетающих протонов.

Показано, что в области энергий выше 1 ГэВ имеет место эффект насыщения значения средней множественности нейтронов с повышением энергии протонов и предложено аналитическое выражение этой зависимости.

Установлено, что с повышением энергии протонов средняя энергия, затрачиваемая протоном пучка на образование нейтронов, стремится к постоянному значению и вносит значительный вклад в энергетический баланс реакции.

4. Впервые на основе анализа двойных дифференциальных распределений нейтронов показано, что протоны и дейтроны генерируют близкие по форме энергетические и пространственные распределения нейтронов; средняя энергия нейтронов монотонно возрастает с увеличением энергии пучка; процесс размножения нейтронов в мишени определяет дальнейшее почти линейное возрастание нейтронного выхода с увеличением энергии пучка;

относительная доля энергии частиц пучка, затрачиваемая на образование нейтронов, возрастает с увеличением энергии частиц пучка и одинакова для протонов и дейтронов. Этот эффект может быть использован для дальнейшего размножения нейтронов вblankете, что может привести к увеличению значения оптимальной энергии пучка для производства нейтронов.

Показано, что использование для производства нейтронов пучка высокоэнергетических дейтронов вместо протонов такой же энергии не дает каких-либо существенных преимуществ.

5. Впервые на основе анализа сечений и выходов реакций деления показано, что делимости ядер для дейтронов и протонов с энергией 1 ГэВ имеют близкие значения; форма пространственно-угловых распределений для выходов реакций деления в нейтронном поле протяженной свинцовой мишени слабо зависит от типа ионов пучка, полные выходы реакций деления приблизительно линейно возрастают с энергией частиц пучка, а переход от протонов к дейтронам позволяет на ~20 % повысить выходы реакций деления для ^{235}U и ^{237}Np и перспективен для трансмутации нептуния, но не дает какой-либо выгоды для деления нуклидов, имеющих более высокое значение пороговой энергии для реакции деления, таких как ^{232}Th и ^{238}U .

Таким образом, представленный в диссертации материал является наиболее полным и всесторонним изучением явлений деления ядер и образования нейтронов на пучках релятивистских легких ядер в области энергий несколько ГэВ на нуклон, являясь итогом многолетних экспериментальных исследований на ядерных пучках ускорительного комплекса Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Апробация диссертации. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории высоких энергий ОИЯИ; Радиевского института им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург; PSI, Швейцария; и

были представлены на следующих международных конференциях и совещаниях:

Рабочее совещание «Твердотельные трековые детекторы ядер и их применения», Дубна, 1990; 15-th Int. Conf. on Particle Tracks in Solids, Marburg, Germany, 1990; 11-th Int. Conf. on Advanced Neutron Sources ICANS-XI, KEK, Tsukuba, Japan, 1990; Specialists' Meeting on Accelerator-Based Transmutation, PSI, Villigen, Switzerland, 1992; Proc. Int. Conf. ICRS-10/RPS 2004, Madeira, Portugal, 2004; Int. Conf. on Accelerator Applications AccApp05, Venice, Italy, 2005; 11-th Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Italy, 2006.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 175 страниц. Диссертация содержит 23 таблицы, 56 рисунков и библиографический список литературы, включающий 199 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении очерчен круг рассматриваемых физических вопросов, обосновывается их актуальность, сформулированы тема и цели диссертации, схематично изложено содержание диссертации.

Кратко обсуждается современное представление об основных модах распада возбужденной ядерной системы, образуемой во взаимодействиях легких ядер с тяжелым ядром-мишенью при промежуточных энергиях. Отмечается, что появление новых процессов быстрого распада при энергиях выше ~500 МэВ/нуклон, реакции расщепления и мультифрагментации, должны приводить к изменению делимости тяжелых ядер и отражаться на процессе эмиссии нейтронов. Несмотря на длительную историю экспериментального и теоретического изучения деления ядер и эмиссии нейтронов имеется высокая

потребность в новых экспериментальных данных и развитии теоретических моделей и кодов в области промежуточных энергий. Дается краткий обзор экспериментальных работ и отмечается, что наименее изученной является область выше 0,5 АГэВ. Отмечается, что экспериментальное изучение эмиссии нейтронов может дать новую информацию об эволюции возбужденной ядерной системы. Перспективным направлением для анализа и интерпретации результатов измерений является развитие феноменологических моделей, в частности модели движущихся источников. Это может позволить выделить и изучить ряд характеристик ядерной системы на различных стадиях ее распада, не прибегая к теоретическим моделям.

Кратко обсуждается потребность в результатах по сечениям и выходам реакций деления и образованию нейтронов для современных приложений в области промежуточных энергий. Отмечается, что требуются еще большие усилия по проведению новых экспериментальных исследований. Важной составляющей этой деятельности является получение новых экспериментальных данных по реакциям деления и образованию нейтронов в экспериментах со свинцовыми мишенями на пучках легких релятивистских ядер. Дискуссия о преимуществе использования пучка дейтронов вместо протонов для генерации нейтронов и трансмутации радиоактивных отходов требует для окончательного решения вопроса проведения сравнительных экспериментов на пучках протонов и дейтронов в наиболее интересной для приложений области энергий 1–3 ГэВ.

Излагается логика представления материала в диссертации. Во введении к главам делается краткий обзор состояния проблемы, на которое нацелено исследование. В заключительных разделах приводятся основные результаты и выводы и обсуждается их практическое применение. В первой главе изложение материала начинается с общего обзора многолетних исследований на выведенных пучках релятивистских ядер синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ, результаты которых положены в основу диссертации. Основной материал главы посвящен описанию экспериментальных методов и установок. Последующие две главы посвящены изучению элементарных процессов – сечений реакций деления

и эмиссии нейтронов во взаимодействиях легких ядер с тяжелыми ядрами. Последние две главы посвящены результатам измерений с толстыми мишенями, важными для современных приложений в области промежуточных энергий.

В главе 1 дано описание экспериментальных методов и установок, на базе которых проводились исследования по измерению сечений и выходов реакций деления и эмиссии нейтронов.

В разделе 1.1 (введение) кратко изложено содержание главы.

В разделе 1.2 дана краткая характеристика исследований, посвященных развитию экспериментальных методов и изучению деления ядер и эмиссии нейтронов. Приведен перечень экспериментальных площадок и выполненных на них экспериментов на базе выведенных пучков синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Расположение экспериментальных установок схематически показано на рис. 1.

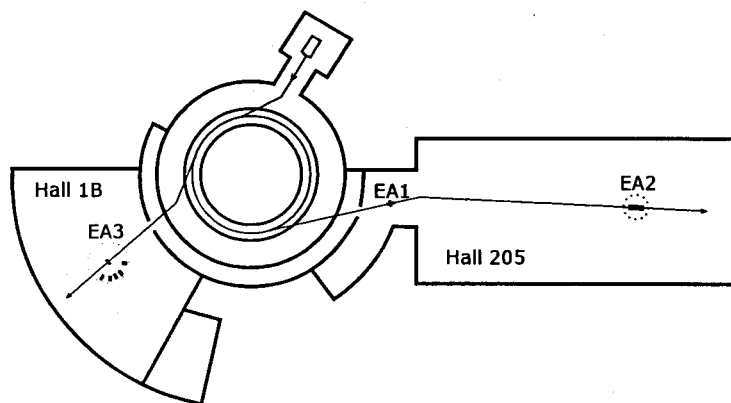


Рис. 1 Расположение экспериментальных установок на каналах выведенных пучков синхрофазотрона: EA1 – площадка для методических исследований; EA2 – установка «Нейтронный источник» для исследований с протяженной свинцовой мишенью; EA3 – времяпролетный спектрометр.

В разделе 1.3 рассмотрено развитие и применение метода твердотельных трековых детекторов ядер в измерениях на ускорителе. Использование твердотельных трековых детекторов ядер на основе лавсана (ТТД) с автоматизированным съемом информации с помощью искрового счетчика треков позволило провести детальные исследования по регистрации вторичных ядер, выходящих с поверхности различных мишеней под действием протонов в широком интервале энергий от 200 МэВ до 3,65 ГэВ [8], а также в нейтронном поле протяженной свинцовой мишени, облучавшейся пучком высокоэнергетических протонов [7]. Выполненные исследования выявили ряд методических особенностей применения метода в измерениях на ускорителях. Полученные экспериментальные данные позволили существенно уменьшить и учесть различные фоновые и искажающие эффекты. Сделанные выводы были учтены при конструировании детекторов и проведении измерений.

В разделе 1.4 рассматривается метод пороговых детекторов и его развитие для детектирования высокоэнергетических нейтронов. Исследования, выполненные на пучках протонов методом ТТД, позволили оценить зависимость пороговой энергии от массового числа ядер мишени, выше которой начинается быстрый рост числа регистрируемых треков от вторичных ядер, возникающих в реакциях расщепления и фрагментации [8]. Особенно резкий рост наблюдается для мишеней Cd и Cu, для которых значения пороговой энергии составляют нескольких сотен МэВ. Полученные данные были использованы для создания новых детекторов с толстыми слоями меди, кадмия и свинца, которые вместе с детектором на основе тонкого слоя ^{209}Bi были применены для определения выхода нейтронов с энергиями выше ~ 90 МэВ. Вместе с детекторами деления ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U и ^{232}Th новые детекторы позволили провести детальные исследования пространственно-энергетических распределений нейтронов для протяженной свинцовой мишени на пучках протонов и дейтронов. Обсуждаются эффективность регистрации нейтронов, конструкция детекторов, методика обработки результатов измерений и восстановления энергетических распределений нейтронов.

Заключительные два раздела 1.5 и 1.6 посвящены описанию экспериментальных установок «Нейтронный источник» и времяпролетный спектрометр [4].

На первой установке, показанной на рис. 2, кинетическая энергия ускоренных протонов и дейтронов конвертировалась в нейтронное излучение в протяженной свинцовой мишени длиной 60 см, которая соответствует практически полному поглощению пучка за счет ядерных взаимодействий. Обсуждаются геометрия измерений, мониторинг пучка и процедура проведения облучений.

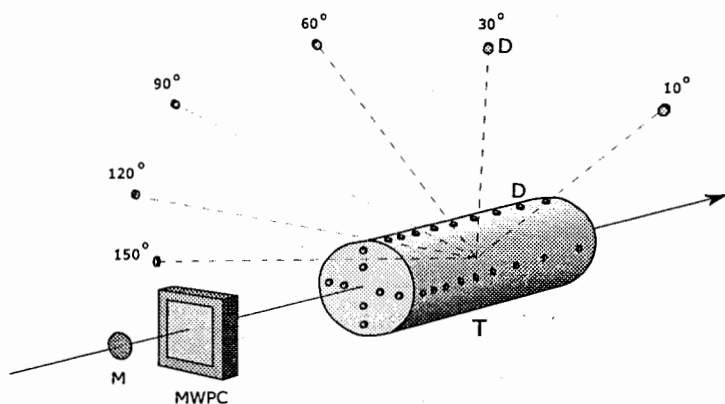


Рис. 2. Схема установки «Нейтронный источник»: М – алюминиевый диск монитора пучка, MWPC – многопроволочные пропорциональные камеры, Т – мишень, D – сборки с детекторами деления и фрагментации.

Времяпролетный спектрометр, показанный на рис. 3, был создан для проведения измерений двойных дифференциальных сечений и выходов нейтронов и заряженных адронов с мишенями небольшого размера, удовлетворяющих условию «хорошей» геометрии.

Регистрация нейтронов осуществлялась с помощью трех типов нейтронных детекторов на основе кристаллов стильбена, позволяющих выполнять дискриминацию гамма-квантов по форме импульса, и пластических сцинтилляторов

большого объема. Это позволило перекрыть широкий диапазон энергий нейтронов от 300 кэВ до ~400 МэВ.

Подробно описана процедура измерений и получения результатов. Обсуждаются используемые в измерениях методы идентификации частиц, характеристики нейтронных детекторов и методики, использованные для определения эффективности регистрации нейтронов.

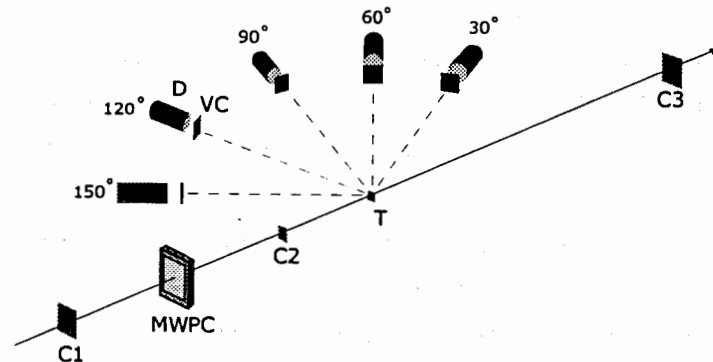


Рис. 3. Схема времяпролетного спектрометра: C₁–C₃ – пучковые сцинтилляционные счетчики, MWPC – многопроволочные пропорциональные камеры, Т – мишень, VC – сцинтилляционные вето-счетчики, D – нейтронные детекторы.

В разделе 1.7 (заклучение) перечисляются основные результаты, связанные с развитием экспериментальных методов и созданием установок на выведенных пучках синхрофазотрона ОИЯИ и рассматривается возможное приложение развитых методов.

В главе 2 приведены и обсуждаются результаты исследований сечений деления ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и ^{237}Np на пучках протонов и дейтронов в наиболее трудной для исследования области энергий $E \geq 1$ ГэВ [1], а также сечения деления ^{181}Ta протонами в интервале энергий 0,2–1 ГэВ [2].

В разделе 2.1 (введение) кратко изложена физическая мотивация изучения

сечений деления в области промежуточных энергий и описанию цели исследования.

В разделе 2.2 изложен экспериментальный метод, описаны сборки детекторов, процедура получения результатов, вводимые поправки и экспериментальные погрешности.

В разделе 2.3 обсуждается геометрия эксперимента и приведен список выполненных измерений. Подробно описана процедура определения сечения деления ^{181}Ta в измерениях с толстыми делящимися слоями, где в качестве опорного было использовано сечение деления ^{nat}Pb при энергии 1 ГэВ.

В разделе 2.4 приведены результаты измерений. Представлены табличные данные для отношений чисел осколков деления, зарегистрированных в интервалах углов $\theta < 61^\circ$ («вперед») и $\theta > 119^\circ$ («назад») в измерениях на пучке протонов, и для сечений деления при нескольких энергиях протонов в интервале 1,0–3,65 ГэВ и дейтронов с энергией 1 ГэВ для ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и ^{237}Np . Так же приведено сечение деления ^{181}Ta , определенное при семи энергиях протонов в интервале 0,2–1,0 ГэВ.

Раздел 2.5 посвящен сравнению полученных результатов с существующими наиболее надежными экспериментальными данными, с предсказаниями модельного расчета и существующими оценками зависимости сечений деления ядер от энергии бомбардирующих протонов. В большинстве случаев измеренные сечения деления хорошо согласуются с результатами других авторов и удовлетворительно – с оцененными зависимостями и выполненными расчетами. На пучке дейтронов были выполнены относительные измерения, и для получения сечений деления использовалась нормировка к значению, взятому из литературы для деления ^{232}Th дейтронами с энергией 1 ГэВ. Проведенные исследования внесли существенный вклад в базу данных по сечениям деления высокоэнергетическими протонами и дейтронами.

Раздел 2.6 посвящен анализу делимости тяжелых ядер в области промежуточных энергий. Анализ совокупности экспериментальных результатов при энергии протонов 1 ГэВ, показанных на рис. 4, свидетельствует об

экспоненциальном возрастании делимости тяжелых ядер с увеличением параметра Z^2/A ядра-мишени вплоть до области актиноидов, где сечения деления составляют более 50% от сечений неупругого взаимодействия, что приводит к насыщению исследуемой зависимости.

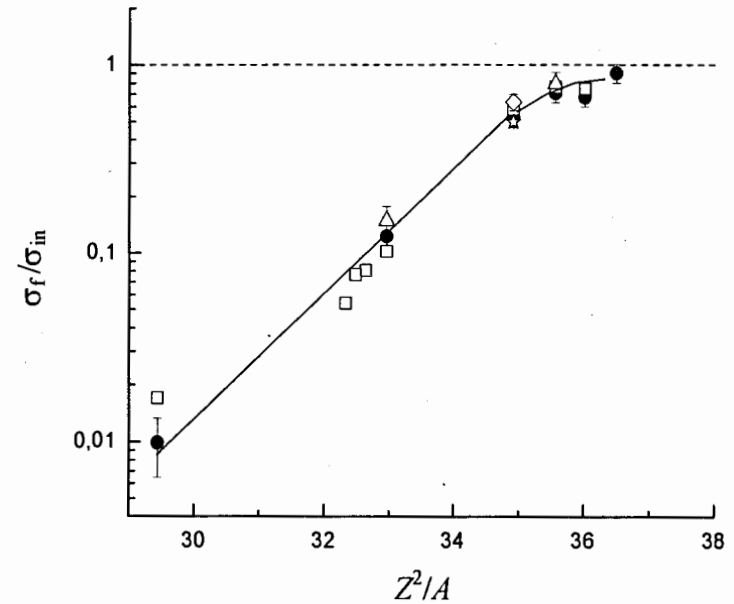


Рис. 4. Зависимость делимости ядер от Z^2/A ядра-мишени для энергии протонов 1 ГэВ: ● – наши измерения, светлые символы – данные других экспериментов, кривая – подгонка к экспериментальным данным.

Полученные результаты показывают, что в среднем делимости тяжелых ядер имеют близкие значения для дейтронов и протонов с энергией 1 ГэВ.

На основе анализа энергетической зависимости сечений деления ядер актиноидов протонами сделано заключение, что область энергии 0,5–5 ГэВ является переходной от режима, когда сечение деления сравнимо с сечением неупругого взаимодействия, к режиму, когда делимость составляет ~40 %. Для более легких ядер ($A \approx 200\text{--}210$) эта область энергий соответствует слабой

зависимости сечения деления от энергии протонов. С повышением энергии делимость для ^{209}Bi стремится к уровню $\sim 10\%$.

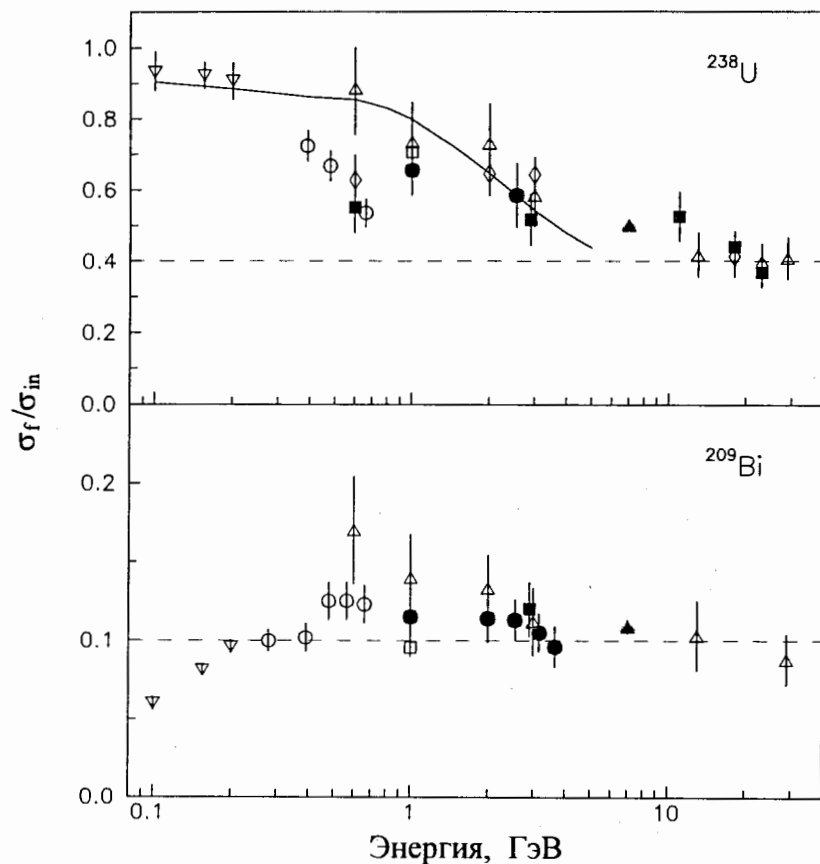


Рис. 5. Делимость для ^{209}Bi и ^{238}U в области энергий протонов выше 0,1 ГэВ: ● – данные наших измерений, кривая – результат расчета, другие символы – данные других экспериментальных работ.

Такое поведение делимостей тяжелых ядер с изменением энергии протонов показано на рис. 5 на примере ядер-мишеней ^{209}Bi и ^{238}U . Наблюдаемый

характер энергетических зависимостей делимости актинидов и висмута обусловлен быстрым ростом сечений процессов расщепления и мультифрагментации с энергией протонов в интервале 0,5–5 ГэВ.

В разделе 2.7 (заключение) изложены основные результаты и выводы, а также рассмотрено возможное их практическое применение.

Глава 3 посвящена исследованию эмиссии нейтронов в столкновениях легких ядер с энергией несколько ГэВ/нуклон с тяжелым ядром-мишенью [3,4].

В разделе 3.1 (введение) дается краткий обзор исследований эмиссии нейтронов в реакциях при промежуточных энергиях путем измерения множественности и двойных дифференциальных сечений образования нейтронов. Для пучков легчайших ядер с энергией до 0,6 АГэВ энергетические спектры нейтронов были недавно измерены под различными углами в Японии. При более высоких энергиях впервые такие данные были получены в наших измерениях, где была изучена также область низкоэнергетических испарительных нейтронов. Дается критический анализ развития феноменологической модели движущихся источников для описания двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в области промежуточных энергий.

В разделе 3.2 описаны измерения двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в неупругих взаимодействиях протонов и дейтронов с энергией 2 ГэВ, ядер ^4He с энергией 4 ГэВ и ядер ^{12}C с энергией 24 ГэВ с ядрами свинца, выполненные на времяпролетном спектрометре. Представлены полученные результаты в области углов $\theta \geq 30^\circ$ (в области фрагментации ядра мишени), в том числе в виде сравнения с результатами измерений на пучках протонов с энергиями в интервале 1,5–3,0 ГэВ, выполненными в КЕК (Япония), SACLA (Франция) и ИТЭФ (Россия). Сравнение показало хорошее согласие данных, полученных в разных лабораториях. При этом необходимо отметить, что область испарительных нейтронов с энергиями ниже 5 МэВ наиболее подробно измерена лишь в нашем эксперименте.

В разделе 3.3 обсуждаются сечения образования нейтронов протонами и дейтронами. Измерения показали, что дифференциальные и полные сечения образования нейтронов в неупругих взаимодействиях протонов и дейтронов с ядрами свинца имеют близкие значения.

Раздел 3.4 посвящен анализу результатов в рамках модели движущихся источников. Обсуждается модифицированная модель движущихся источников (МДИ), предложенная автором диссертации для анализа и интерпретации экспериментальных результатов по двойным дифференциальным сечениям образования нейтронов в области энергий выше $\sim 0,5$ АГэВ. Физической основой предложенной МДИ является современное понимание основных процессов распада ядерной системы, возникающей в рассматриваемых столкновениях, которое базируется на полученных в последнее время экспериментальных и теоретических результатах, и, прежде всего, по эмиссии ядерных фрагментов промежуточной массы в процессе мультифрагментации. В модели предполагается, что основной вклад в эмиссию нейтронов дают четыре физических процесса распада возбужденной ядерной системы (четыре источника), отвечающие за испускание нейтронов на каскадной стадии в периферических (1-й источник) и центральных (2-й источник) столкновениях, в процессе фрагментации (3-й источник) и на испарительной стадии (4-й источник). Модельное выражение, используемое для подгонки к экспериментальным данным, имеет следующий вид

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \sum_{i=1}^4 p A_i \exp\left\{-\left(\frac{E+m-p\beta_i \cos\theta}{(1-\beta_i^2)^{1/2}} - m\right)/T_i\right\},$$

где импульс нейтрона $p = (E^2 + 2Em)^{1/2}$, E – кинетическая энергия нейтрона в л.с. в МэВ, m – масса покоя нейтрона в МэВ, θ – угол вылета нейтрона в л.с. Каждый движущийся источник характеризуется параметрами амплитуды A_i , температуры T_i и скорости β_i , выраженной в единицах скорости света. Всего выражение (1) имеет 12 параметров, которые находятся во время его подгонки к результатам измерений под различными углами θ .

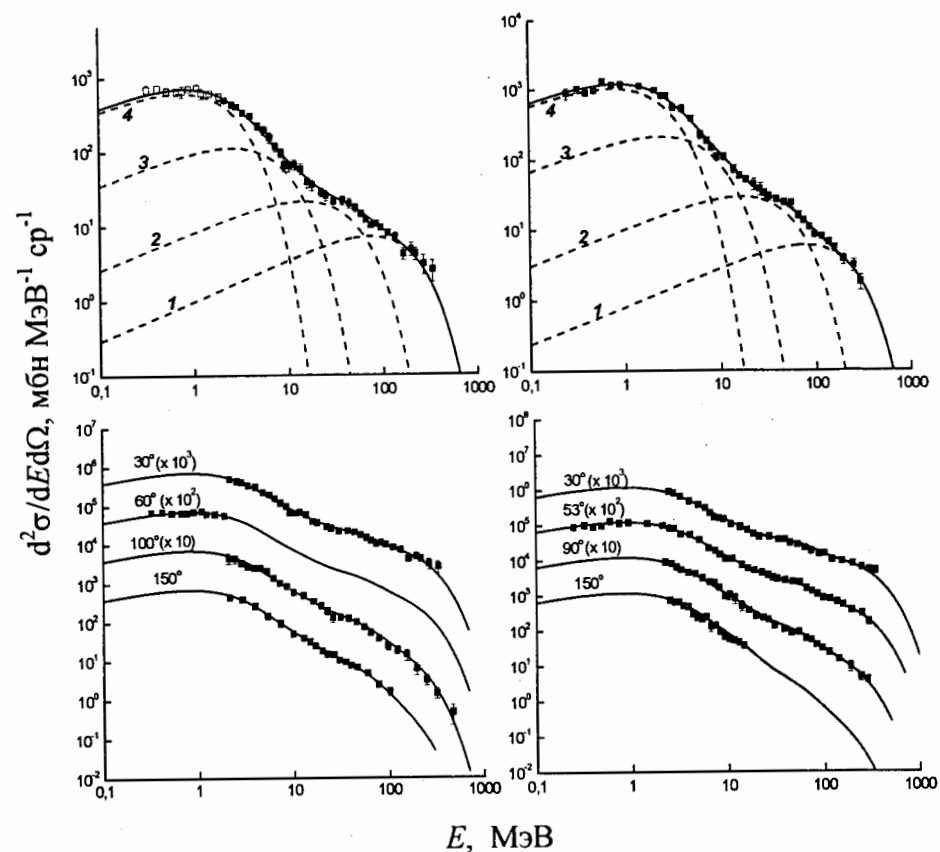


Рис. 6. Двойные дифференциальные сечения образования нейтронов, измеренных на пучках ядер ^4He с энергией 1 ГэВ/нуклон (слева) и ядер ^{12}C с энергией 2 ГэВ/нуклон (справа). Символы – результаты измерений, пунктирные кривые на верхних рисунках показывают вклады от различных движущихся источников, сплошные кривые – результат подгонки с помощью модельного выражения.

Предложенная МДИ использована для анализа результатов измерений в области энергий протонов 0,25–6,6 ГэВ, а также на пучках более тяжелых ядер. Модель позволяет добиться хорошего описания двойных дифференциальных сечений во всем диапазоне энергий нейтронов и, тем самым, оценить вклады различных процессов в эмиссию нейтронов. Пример описания предложенным

модельным выражением результатов измерений для столкновений ядер ^4He с энергией 1 ГэВ/нуклон и ^{12}C с энергией 2 ГэВ/нуклон с ядрами свинца показан на рис. 6.

Интересным результатом является независимость параметров температуры для всех четырех источников от типа и энергии падающей частицы в области энергий выше примерно 0,5 АГэВ, как это показано на рис. 7.

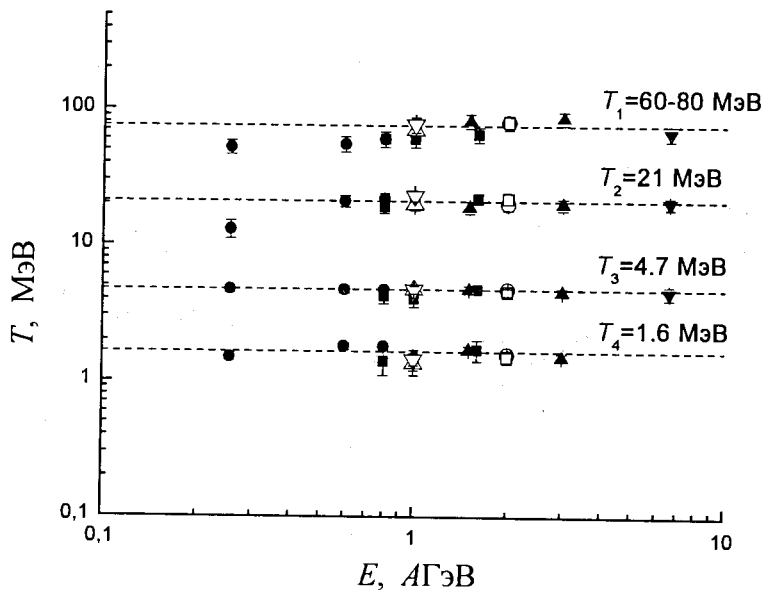


Рис. 7. Параметры температуры нейтронных источников, найденные при подгонке модельного выражения к результатам измерений LANL, KEK и ИТЭФ (темные символы) для реакции $\text{Pb}(p, nx)$ при различных энергиях протонов и ЛВЭ ОИЯИ для пучков p (\circ), ^2H (Δ), ^4He (∇) и ^{12}C (\square).

Величина температуры для нейтронов, испускаемых на стадии фрагментации высоковозбужденного остатка, составила $4,7 \pm 0,3$ МэВ, что находится в хорошем согласии со значением температуры T_f в точке распада системы на независимые фрагменты (температура фазового перехода «жидкость-газ»), найденной в экспериментах по изучению эмиссии заряженных

фрагментов промежуточной массы. Этот результат представляется важным, так как впервые значение температуры T_f определено методом, в котором отсутствуют поправки на кулоновские эффекты. Равенство температур и скоростей источников нейтронов и фрагментов промежуточной массы свидетельствует, по-видимому, об одинаковой их физической природе. Полученные значения параметра температуры для испарительной стадии эмиссии нейтронов примерно на 50% превышают величины, характерные для реакций при низких энергиях.

В разделе представлены и обсуждаются результаты по сечению образования нейтронов, средней множественности и энергии нейтронов для взаимодействий p , d , ^4He , ^{12}C с ядрами Pb , проводится сравнительный анализ парциальных вкладов от процесса фрагментации. Показано, что вклад от нейтронов, испускаемых в процессе фрагментации ядра-остатка, составляет 20–26% для всех реакций. Оценка средней энергии возбуждения ядра остатка на испарительной стадии для исследованных реакций составила ~ 100 МэВ.

В разделе 3.5 анализируется зависимость эмиссии нейтронов от энергии протонов в реакции $\text{Pb}(p, nx)$. На основе анализа имеющихся экспериментальных данных дифференциальных и интегральных измерений выполнена оценка средней множественности нейтронов всех энергий и с энергией выше 20 МэВ в интервале энергий налетающих протонов 0,1–3,5 ГэВ. Средняя множественность нейтронов в неупругих p - Pb взаимодействиях стремится к насыщению с повышением энергии протонов в области энергий выше 1 ГэВ, как это показано на рис. 8. Там же приведены результаты аппроксимации средних множественностей нейтронов всех энергий M и с энергиями выше 20 МэВ M_{20} . Полученные для этих величин аналитические выражения путем подгонки к экспериментальным данным имеют вид

$$M = 39(1 - \exp(-0.22E_p))^{0.55} \quad \text{и} \quad M_{20} = 8(1 - \exp(-0.4E_p)) ,$$

где E_p – кинетическая энергия протонов в ГэВ.

Анализ данных также показал, что в реакции $Pb(p, n)$ при энергии протонов 1–3 ГэВ около 40 % энергии налетающих протонов идет на образование нейтронов, причем 31 % приходится на кинетическую энергию нейтронов, из которых 27 % уносят нейтроны с энергией выше 20 МэВ, составляющие $\sim 1/5$ от полного выхода нейтронов. Полученные результаты свидетельствуют, что эмиссия нейтронов является важным фактором, который должен обязательно учитываться при рассмотрении энергетического баланса реакции.

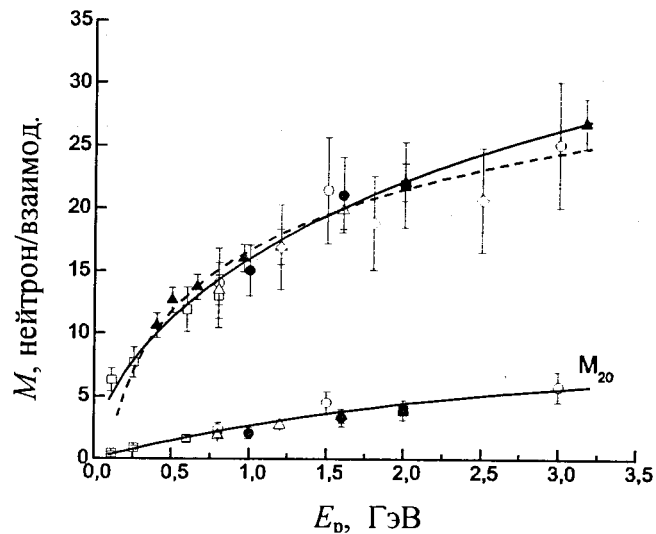


Рис. 8. Средняя множественность всех нейтронов M и нейтронов с энергией выше 20 МэВ M_{20} на неупругое взаимодействие протона с ядром свинца: символы – величины, полученные из анализа результатов экспериментальных работ, сплошные кривые – оценки, полученные для M и M_{20} , пунктирная кривая – зависимость, предложенная Кугноном (J. Cugnon) и др..

В разделе 3.6 (заключение) приведены основные выводы и результаты, полученные в исследовании эмиссии нейтронов в $p, d, ^4He, ^{12}C - Pb$ взаимодействиях и рассмотрены возможные приложения развитой МДИ и результатов.

В главе 4 изложены результаты исследования деления ядер в радиационном поле протяженной свинцовой мишени $\varnothing 20 \times 60$ см, являющейся мишенью практически полного поглощения пучка за счет ядерного взаимодействия [5]. Измерения на установке «Нейтронный источник» были выполнены для $^{209}Bi, ^{232}Th, ^{235}U, ^{238}U$ и ^{237}Np при пяти энергиях протонов и шести энергиях дейтронов в области энергий 1–3,7 ГэВ.

Разделы 4.1 и 4.2 посвящены мотивации исследований и описанию экспериментальной установки соответственно.

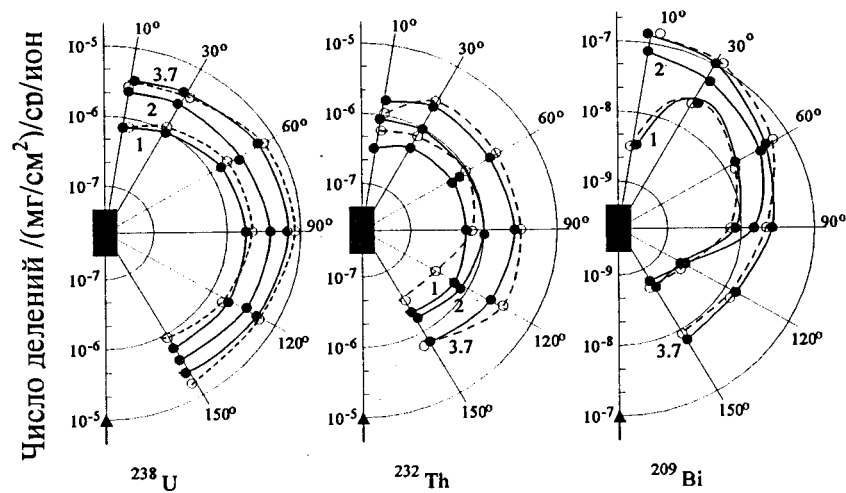


Рис. 9. Выходы реакций деления для $^{209}Bi, ^{232}Th$ и ^{238}U в слое толщиной 1 мг/см^2 , измеренные под различными углами к пучку протонов и дейтронов при трех различных энергиях протонов 1, 2 и 3,7 ГэВ и двух энергиях дейтронов 1 и 3,7 ГэВ: темные кружки и сплошные кривые – данные для протонов, светлые кружки и пунктирные кривые – данные для дейтронов.

Анализ и обсуждение полученных результатов являются содержанием разделов 4.3 и 4.4. Показано, что наблюдается слабая зависимость формы пространственных и угловых распределений выходов реакций деления от энергии и типа ионов пучка при приблизительно линейном увеличении

энергии и типа ионов пучка при приблизительно линейном увеличении выходов реакций деления с энергией ионов. На рис. 9 приведен пример измеренных угловых распределений выходов реакций деления ^{209}Bi , ^{232}Th и ^{238}U при нескольких энергиях протонов и дейтронов.

Установлено, что переход от протонов к дейтронам позволяет увеличить выход реакций деления на ~20 % для ^{235}U и ^{237}Np , но не приносит какой-либо выгоды для нуклидов, реакции деления которых имеют более высокий порог по энергии нейтронов. Следствием этого является вывод о том, что для трансмутации такого важного минорного актинида как ^{237}Np путем реакции деления использование дейтронов вместо протонов приводит к существенному выигрышу, в то время как для бланкета на основе ^{232}Th и ^{238}U дейтроны не дают каких-либо преимуществ по сравнению с протонами той же энергии.

В разделе 4.5 (заключение) перечислены основные выводы и полученные результаты по изучению выходов реакций деления в радиационном поле протяженной свинцовой мишени и обсуждается их практическая значимость.

В главе 5 рассматриваются результаты исследований по образованию нейтронов в толстых свинцовых мишенях на пучках протонов и дейтронов с энергией несколько ГэВ [4].

В разделе 5.1 изложена мотивация данных исследований и приведен краткий обзор работ, посвященных систематическому изучению образования нейтронов в толстых мишенях протонами, дейтронами и легчайшими ядрами в области энергий 0,1–10 ГэВ.

В разделе 5.2 приведен список измерений, выполненных методом времени на пучках протонов и дейтронов с энергией около 2 ГэВ с толстыми свинцовыми мишенями $8 \times 8 \times 8$, $\varnothing 20 \times 20$ см. Приведены двойные дифференциальные выходы нейтронов и заряженных адронов для этих мишеней. Показано, что измеренные распределения нейтронов слабо зависят от типа частиц пучка, а выход нейтронов значительно превышает выход заряженных адронов уже для мишени $8 \times 8 \times 8$ см и это расхождение возрастает с увеличением размера мишени.

В разделе 5.3 обсуждаются измерения методом пороговых детекторов нейтронов на основе реакций деления и фрагментации, выполненные с протяженной свинцовой мишенью $\varnothing 20 \times 60$ см на пучках протонов и дейтронов в интервале энергий 1–3,7 ГэВ. Приведены примеры измеренных распределений нейтронов на боковой поверхности мишени вдоль ее оси и угловые распределения для всех энергий нейтронов и высокоэнергетической компоненты с $E > 20$ МэВ. Также показаны энергетические спектры нейтронов, испускаемых мишенью в полный телесный угол.

В разделе 5.4 проводится сравнение двойных дифференциальных распределений нейтронов, измеренных на пучках протонов с энергией около 2 ГэВ с тонкими и толстыми свинцовыми мишенями, с предсказаниями кода, в котором для описания первичной стадии взаимодействия используется модель кварк-глюонных струн (код QGSM), неравновесная стадия воспроизводится экситонной моделью, распад горячего ядерного остатка описывается на базе статистической модели мультифрагментации, а эмиссия нейтронов из возбужденных ядер-остатков (включая деление) реализуется на базе испарительной модели. Для моделирования размножения нейтронов в толстых мишенях применен код SHIELD. Удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических распределений для тонкой и толстых свинцовых мишеней свидетельствует о том, что в коде, включающем основные физические механизмы образования и распада возбужденной ядерной системы в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях, по-видимому, правильно учтены физические процессы, приводящие к эмиссии нейтронов. Однако имеющиеся некоторые расхождения показывают, что положенные в основу кода теоретические подходы еще требуют своего дальнейшего развития и тестирования.

В разделе 5.5 обсуждается выход нейтронов из свинцовых мишеней на падающую частицу пучка. Приведены численные значения измеренных выходов нейтронов для различных мишеней. Для протяженной мишени анализируется зависимость выхода нейтронов от энергии падающих протонов и дейтронов

путем сравнения полученных данных с результатами других работ и предсказаниями кода HERMES. Наши измерения методом пороговых детекторов дали значения среднего выхода нейтронов близкие к полученным методом замедления, если последние пересчитать для учета утечки высокоэнергетических нейтронов. Анализ показал, что в области энергий выше 1 ГэВ дейтроны дают на ~10–15 % больший выход нейтронов, чем протоны той же энергии.

Раздел 5.6 посвящен исследованию явления размножения нейтронов в свинце за счет вторичных ядерных взаимодействий в мишени на основе анализа данных, полученные на пучке протонов.

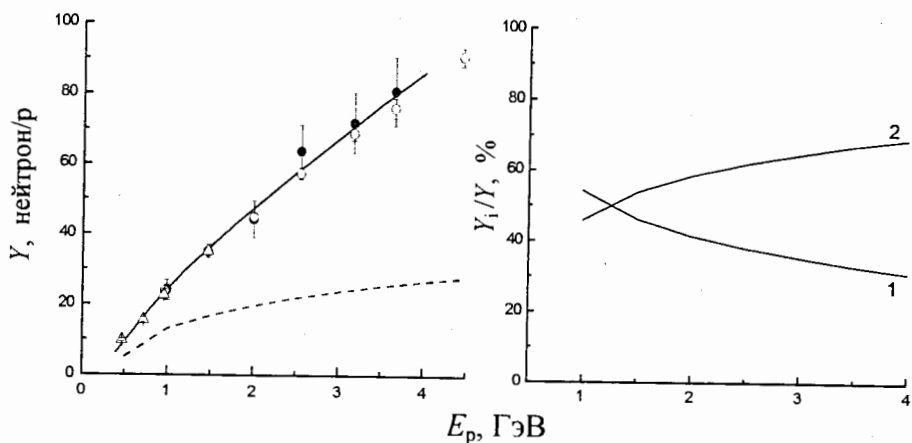


Рис. 10. На левом рисунке представлен средний выход нейтронов на падающий протон для свинцовой мишени $\varnothing 20 \times 60$ см: светлые символы – результаты измерений методом замедления, ● – результаты наших измерений методом пороговых детекторов, сплошная кривая – предсказание кода HERMES, пунктирная кривая – оцененный средний выход нейтронов в первичных ядерных взаимодействиях. На правом рисунке показаны относительные вклады в полный выход нейтронов от первичных (кривая 1) и вторичных (кривая 2) ядерных взаимодействий.

Показано, что с увеличением толщины и поперечного размера мишени средняя множественность нейтронов существенно возрастает за счет вторичных

взаимодействий в мишени. С ростом энергии протонов вклад процесса размножения нейтронов в выход нейтронов увеличивается, и при энергии 2 ГэВ он примерно в 2 раза превышает среднюю множественность нейтронов от первичных взаимодействий протонов в свинцовой мишени $\varnothing 20 \times 60$ см как это показано на рис. 10, где на левом рисунке приведены экспериментальные результаты вместе с предсказанием кода HERMES для среднего выхода нейтронов вместе с оцененным средним выходом нейтронов в первичных взаимодействиях протонов пучка в мишени, а на правом рисунке показаны отношения вкладов от первичных и вторичных взаимодействий к полному выходу нейтронов.

В разделе представлены численные данные по средней энергии нейтронов, средним величинам кинетической энергии нейтронного излучения и энергии, идущей на образование нейтронов, в зависимости от энергии и типа частиц пучка. При одинаковой энергии пучка протоны по сравнению с дейтронами производят нейтроны с большей средней энергией. Эффект возрастания средней энергии нейтронов и средней кинетической энергии нейтронного излучения, рассчитанных на единицу энергии налетающих протонов, с ростом энергии частиц пучка может быть использован для дальнейшего размножения нейтронов в blankets, окружающим свинцовую мишень. При этом, по-видимому, оптимальная энергии пучка протонов для получения наибольшего выхода нейтронов на единицу энергии частицы пучка может существенно превышать 2 ГэВ. Сказанное выше продемонстрировано на рис. 11, где приведены полученные на основе анализа экспериментальных данных зависимости среднего выхода нейтронов и средней кинетической энергии нейтронного излучения, приведенных на единицу энергии протонов пучка, от энергии налетающих протонов для свинцовой мишени $\varnothing 20 \times 60$ см.

На основе совокупности полученных результатов для протяженной мишени можно сделать вывод, что переход от протонов к дейтронам не дает каких-либо существенных преимуществ для производства нейтронов.

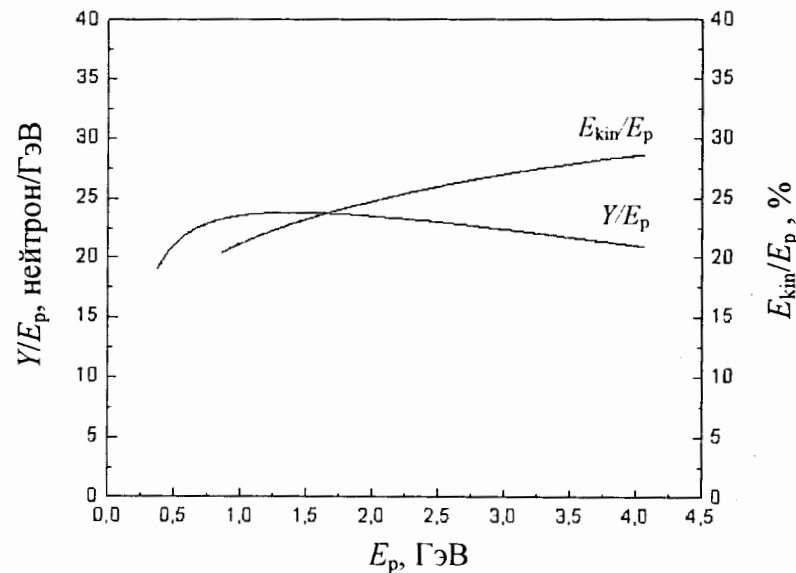


Рис. 11. Отношения среднего выхода нейтронов и средней кинетической энергии нейтронного излучения к энергии протонов пучка. Кривые получены путем подгонки к экспериментальным данным.

В разделе 5.7 (заключение) приводятся основные выводы и результаты, полученные в исследовании образования нейтронов протонами и дейтронами в свинцовых мишенях, и рассматривается их возможное приложение.

В заключение приводятся основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.И. Юревич, В.А. Николаев и др. Сечения деления ядер ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и ^{237}Np протонами и дейтронами промежуточных энергий. ЯФ, Т. 65, С. 1417, 2002.
2. V.I. Yurevich, V.A. Nikolaev, et al. Fission cross section of ^{181}Ta for protons in the energy range 200-1000 MeV. Письма в ЭЧАЯ, Т. 2, N.1 (124), С. 49, Дубна, 2005.
3. В.И. Юревич, Р.М. Яковлев, и др. Изучение эмиссии нейтронов при взаимодействии ядер ^1H , ^2H , ^4He , ^{12}C с энергией 1–2 А ГэВ с ядрами свинца. ЯФ, Т. 69, С. 1531, 2006.
4. В.И. Юревич, Р.М. Яковлев, и др. Исследование эмиссии нейтронов при взаимодействии релятивистских протонов и дейтронов со свинцовыми мишенями. Письма в ЭЧАЯ, Т. 3, N. 3 (132), С. 49, Дубна, 2006.
5. V.A. Nikolaev, R.G. Vassilkov, V.I. Yurevich, R.M. Yakovlev Fission of ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , and ^{237}Np in spallation neutron field. Краткие сообщения ОИЯИ, N.4[90]-98, С. 25, Дубна, 1998 (Письма в ЭЧАЯ с 2000 г.).
6. A.D. Kovalenko, Yu.A. Panebratsev, V.I. Yurevich Spallation neutron source with hard energy spectrum for detector component testing at the Dubna synchrophasotron. Краткие сообщения ОИЯИ, №1[64]-94, С. 12, Дубна, 1994 (Письма в ЭЧАЯ с 2000 г.).
7. V.I. Yurevich, V.A. Nikolaev, et al. Study of disintegration of materials in the radiation field of thick lead target. Письма в ЭЧАЯ, Т. 2, N. 1 (124), С. 53, Дубна, 2005.
8. V.I. Yurevich, V.A. Nikolaev, et al. Study of nuclear fragment emission from targets bombarded by intermediate-energy protons. Письма в ЭЧАЯ, Т. 1, N. 5 (122), С. 97, Дубна, 2004.

Получено 4 сентября 2006 г.