

К-592



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-91-72

КОЗМА Петр

УДК 539.172.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ ЯДЕР
В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЯХ**

**Специальность 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1991

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических
наук, профессор

КАРНАУХОВ
Виктор Александрович

доктор физико-математических
наук, профессор

ЛОЖКИН
Олег Владимирович

доктор физико-математических
наук, старший научный сотрудник

МУХИН
Сергей Васильевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение -
Ленинградский институт ядерной физики АН СССР, г.Гатчина.

Защита диссертации состоится _____ 1991 года
в _____ час. на заседании специализированного совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований по адресу: г.Дубна, Московской
области, Лаборатория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

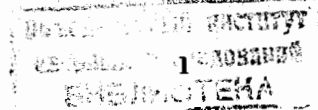
Автореферат разослан _____ 1991 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

М.Ф. Лихачев

М.Ф. Лихачев

Актуальность проблемы. Реакции с образованием многозарядных фрагментов в релятивистских столкновениях относятся к наименее изученным каналам распада возбужденных ядер. Новые данные по реакциям расщепления и фрагментации ядер-мишеней позволяют более детально взглянуть на механизм глубоководных взаимодействий, выделить основные черты этих процессов. Следует отметить, что эксперименты, в которых наблюдается образование остаточных ядер, проводятся не только на пучках релятивистских частиц и ядер в широком диапазоне масс и энергий, но и на пучках частиц и ядер промежуточных энергий. В настоящее время двумя основными ускорителями, на которых проводятся систематические эксперименты в области релятивистской физики, продолжают оставаться ускоритель БЭВАЛАК (Беркли, США) и синхрофазотрон ЛВЭ ОИЯИ (Дубна). Надо отметить, что экспериментальные исследования, проведенные по фрагментации ядер-мишеней американскими физиками в Беркли при энергии 2,1 ГэВ/нуклон, указывают на возможное нарушение некоторых фундаментальных концепций физики высоких энергий, таких как предельная фрагментация и факторизация в случаях мультибарионных систем. В этих исследованиях наблюдались изменения распределения выхода продуктов фрагментации ядра-мишени с изменением энергии налетающих ядер-снарядов, причем этот эффект был интерпретирован как возможное нарушение предельной фрагментации. Энергия релятивистских ядер, достигаемая на синхрофазотроне ОИЯИ, примерно в два раза превосходит энергию ядер на ускорителе БЭВАЛАК и охватывает так называемую область предельной фрагментации. С точки зрения проверки фундаментальных гипотез физики высоких энергий исследование образования остаточных ядер в реакциях, вызванных релятивистскими ядрами в диапазоне энергий 3-4 ГэВ/нуклон, представляют собой актуальную проблему.



Более того, высокая интенсивность пучков ядер углерода, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, позволяет детально изучить реакции, вызванные именно этими снарядами на ряде ядер-мишеней, расширить энергетический диапазон и получить полезную информацию для последующего теоретического анализа. Главным преимуществом дубненского синхрофазотрона является возможность ускорять частицы и ядра с той же самой энергией на нуклон, что позволяет более подробно сравнить экспериментальные данные, полученные в равных условиях и провести их теоретический анализ.

Эффективным методом экспериментального изучения образования остаточных ядер в релятивистских взаимодействиях является их регистрация посредством активационного анализа, основанного на гамма-спектроскопии. Измерение наведенной активности облученных мишеней, т.е. измерение основных характеристик гамма-переходов, позволяет идентифицировать широкий спектр остаточных ядер-нуклидов вплоть до массы мишени изучаемого ядра. Сечения образования, массовые и зарядовые распределения остаточных ядер, зависят от переданной энергии, типа налетающих снарядов, изотопного состава ядер-мишеней и т.д. В физике высоких энергий предложенный метод идентификации остаточных ядер-продуктов по наведенной гамма-активности может быть использован также и для определения угловых зависимостей сечений образующихся ядер-остатков и их кинематических характеристик: асимметрии вылета вперед-назад и среднего пробега. Методика таких экспериментов основана на использовании тонких мишеней, расположенных между лавсановыми сборниками: в них измеряются доли от полной активности ядер-нуклидов, зарегистрированных в передних и задних сборниках. Анализ данных позволяет детализировать кинематику процесса образования остаточных ядер, продуктов полного расщепления и фрагментации ядра-мишени и применить соответствующую модельную интерпретацию. Очень важно то, что методика

активационного анализа позволяет определить кинематические свойства ядер отдачи в диапазоне масс $20 \leq A \leq 30$, который недоступен для другой экспериментальной техники. Более того, эксперименты на разделенных изотопах могут быть очень важными для исследования изотопических эффектов, а именно, влияния структуры ядра-мишени на процесс взаимодействия, и зависимости сечений в реакциях типа (снаряд, x руп) от числа вылетающих нейтронов - эффекта множественности нейтронов.

Все сказанное определяет актуальность исследований, выполненных в настоящей диссертационной работе.

Цель работы - экспериментальное исследование механизмов образования остаточных ядер в ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях.

1) Постановка эксперимента для определения абсолютных сечений образования остаточных ядер.

2) Обработка экспериментальной информации и создание математического аппарата для корректной параметризации сечений в рамках общей систематики.

3) Изучение взаимодействия релятивистских ядер ^{12}C , ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ с максимальной энергией 44 ГэВ (3,65 ГэВ/нуклон), со среднетяжелыми и тяжелыми ядрами.

4) Изучение зависимости изотопического распределения остаточных ядер от типа бомбардирующего снаряда в реакциях со среднетяжелыми и тяжелыми ядрами.

5) Теоретическая интерпретация массовых распределений в рамках модельных представлений о взаимодействии.

6) Проверка основных гипотез релятивистской ядерной физики - предельной фрагментации и факторизации.

7) Изучение кинематических характеристик фрагментов промежуточных масс, образовавшихся в релятивистских столкновениях.

8) Изучение эффектов на изотопически разделенных мишенях, в том числе множественности нейтронов.

Научная новизна работы. Впервые проведены эксперименты, в которых определены сечения образования остаточных ядер в реакциях ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон со среднетяжелыми и тяжелыми ядрами. В связи с постановкой задач по изучению зависимости изотопического распределения остаточных ядер от типа бомбардирующих снарядов, а также проверке скейлинга и предельной фрагментации было решено провести аналогичные эксперименты на среднетяжелых и тяжелых ядрах-мишенях с протонами и дейтронами той же самой энергии на нуклон. Впервые измерены сечения образования остаточных ядер в реакциях с релятивистскими дейтронами. Впервые проведено сравнение зарядовых дисперсий и массовых распределений остаточных ядер, образующихся в реакциях с участием протонов и ядер ^{12}C с одинаковой энергией 3,65 ГэВ на нуклон, а также в реакциях с участием протонов и дейтронов с одинаковым импульсом 9 ГэВ/с.

Во время проведения экспериментов были обнаружены новые экспериментальные факты, которые расширили программу исследований: например, впервые был подробно изучен механизм образования остаточных ядер при взаимодействии ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядрами урана и тория.

Впервые выполнено систематическое экспериментальное исследование кинематики процесса образования остаточных ядер в релятивистских взаимодействиях. При исследовании кинематических свойств остаточных ядер большое внимание было уделено фрагментам ^{24}Na и ^{28}Mg , для которых наблюдались повышенные значения определенных кинематических характеристик.

Совокупность экспериментальных данных, полученных в настоящих экспериментах на мишенях из разделенных изотопов, позволил сделать выводы как о наблюдении эффекта "запоминания" структуры

исходного ядра, так и о множественности нейтронов в исследуемых реакциях.

Научно-практическая значимость. В работе представлен новый обширный экспериментальный материал, который может быть использован при изучении неупругих ядро-ядерных взаимодействий. В данной работе экспериментальные результаты обсуждаются в рамках модельных представлений о релятивистском взаимодействии, но экспериментальные данные представляют также определенный интерес к прикладным задачам, таким как, например, расчет защиты ускорителей и космических сооружений. Экспериментальные данные по сечениям образования остаточных ядер можно использовать для конструирования полуэмпирических формул в широком диапазоне по массам и зарядам. Такие формулы находят широкое использование как в ядерной физике и технике, так и в астрофизике. При этом точность расчета определяется, в основном, ошибками экспериментальных сечений, которые используются в процедуре подгонки методом наименьших квадратов (МНК) в качестве входных независимых переменных. Более точные аналитические формулы повышают качество теоретического анализа механизма изучаемых реакций.

Практическо-научное значение имеют также следующие результаты:

а) создание и применение системы мониторинга пучков релятивистских частиц и ядер, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ;
б) прецизионное измерение сечений "мониторных" реакций;
в) применение спектрометра со сцинтилляционным BaF_2 -детектором;

г) разработка программ полного математического обеспечения обработки данных (включая робастную минимизацию, а также метод сингулярного разложения), в том числе создание универсальной программы автоматической обработки гамма-спектров, измеряемых спектрометрами с полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами.

АППРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Результаты, вошедшие в диссертацию, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах ЛВЭ и ЛТФ ОИЯИ, специализированном научном семинаре по релятивистской ядерной физике ЛВЭ, научном семинаре по экспериментальной методике ЛВЭ, докладывались автором на фотоэмульсионном комитете (Дубна, 1989), на Всесоюзных рабочих совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Юрмала 1987, Баку 1988, Ленинград 1990), X Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна 1990), У Международном симпозиуме по физике ядерных реакций (Смоленце 1988). Эти результаты также докладывались на научных семинарах Ленинградского института ядерной физики АН СССР (Гатчина, 1987, 1988, 1989), Физического института АН Азербайджанской ССР (Баку 1989), Монгольского Государственного Университета (Улан-Батор, Монголия, 1989), Института ядерной физики ЧСАН (Ржеж, Чехословакия, 1990), Центра ядерных исследований Индианского Университета (Блумингтон, США, 1990) и Делфтского технологического Университета (Делфт, Нидерланды, 1989).

Основные результаты изложены в 40 публикациях. Список основных публикаций приводится в конце автореферата.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и раскрывается содержание темы диссертации, сформулирована цель работы, изложена новизна и научно-практическая ценность полученных результатов, описан план диссертации.

В первой главе описана экспериментальная методика определения сечений образования остаточных ядер в релятивистских взаимодействиях по измерению наведенной гамма-активности облученных мишеней. Особое внимание в настоящих экспериментах уделялось постановке эксперимента, мониторингованию пучков релятивистских частиц и ядер, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, определению вклада эффектов вторичных реакций, а также обработке экспериментальной информации и математическому анализу полученных данных.

Во второй главе представлены основные результаты по анализу экспериментальных данных, т.е. сечений образования остаточных ядер в ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях, а также по общей систематике зарядовых и массовых распределений. Систематика зарядовых и массовых распределений требует определения независимых выходов нуклидов с учетом β -распада в соответствующих цепочках изотопов. Описывается предложенный и экспериментально проверенный метод определения независимых выходов образующихся нуклидов с учетом процессов накопления распада всех генетически связанных ядер-нуклидов.

Установлено, что наиболее приемлемой для описания сечений образования остаточных ядер $\sigma(\Lambda, Z)$, образующихся на среднетяжелых ядрах-мишенях, является 6-параметрическая формула

$$\sigma(\Lambda, Z) = \exp[\alpha_1 + \alpha_2 \Lambda + \alpha_3 \Lambda^2 + \alpha_4 (Z - Z_p(\Lambda))] \quad (I)$$

где Λ и Z - массовые и зарядовые числа ядра-продукта, $Z_p(\Lambda)$ - наиболее вероятный заряд

$$z_p(A) = \alpha_5 A + \alpha_6 A^2. \quad (2)$$

Подгоночные параметры $\alpha_1 - \alpha_3$ определяют изобарические сечения $\sigma(A)$, α_5, α_6 - наиболее вероятный заряд z_p зарядового распределения

$$F = \exp\left[-\alpha_4 (z - z_p(A))^2\right], \quad (3)$$

где параметр α_4 определяет ширину гауссовского распределения.

Для описания сечений $\sigma(A, Z)$ остаточных ядер, образующихся в реакциях релятивистских частиц и ядер с тяжелыми ядрами-мишенями, можно с успехом применить общую параметризацию типа

$$\sigma(A, Z) = \sigma(A) F(z - z_p), \quad (4)$$

учитывая монотонную зависимость $\sigma(A)$ от массового числа ядра-продукта в определенном массовом диапазоне

$$\sigma(A) = \exp(a_0 + a_1 A + a_2 A^2 + \dots) \quad (5)$$

и зарядовую дисперсию в общей форме

$$F(z_p(A) - z) = (2\pi C_z^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(z_p(A) - z)^2}{2C_z^2}\right], \quad (6)$$

где

$$z_p(A) = (b_0 + b_1 A + b_2 A^2 + \dots). \quad (7)$$

Нами показано, что для такой параметризации можно успешно применить метод робастной минимизации. Результат для реакций $p + {}^{181}\text{Ta}$ и ${}^{12}\text{C} + {}^{181}\text{Ta}$ при энергии 3,65 ГэВ/нуклон приведен на рис. 1.

Обнаружено, что форма кривых зарядовых распределений для остаточных ядер, образующихся в релятивистских взаимодействиях протонов, дейтронов и ядер ${}^{12}\text{C}$ со среднетяжелыми и тяжелыми ядрами, не зависит от типа первичной частицы. Наблюдаемое сходство соот-

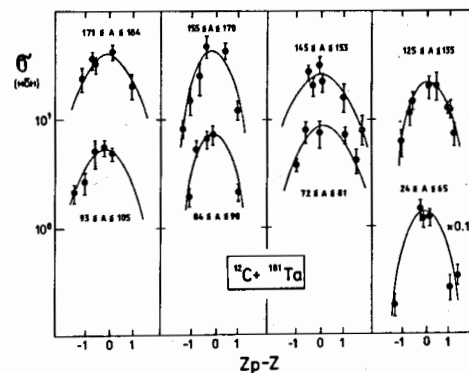
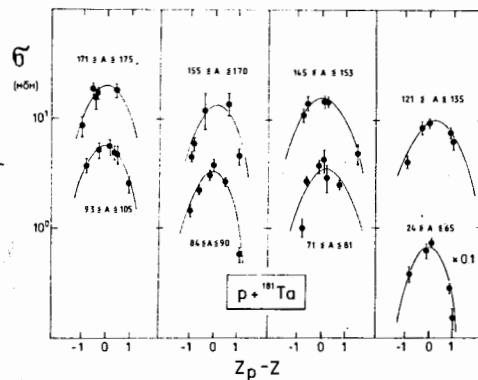


Рис. 1. Зарядовые распределения остаточных ядер, образующихся в реакциях $p + {}^{181}\text{Ta}$ и ${}^{12}\text{C} + {}^{181}\text{Ta}$ при энергии 3,65 ГэВ на нуклон. Сплошные кривые - результат подгонки по формуле (4) с применением робастной минимизации.

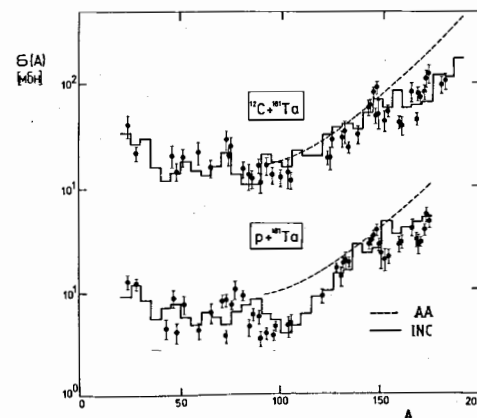


Рис. 2. Массовые распределения (изобарических сечений) остаточных ядер, образующихся во взаимодействиях протонов и ядер ${}^{12}\text{C}$ с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядром ${}^{181}\text{Ta}$.

ответствующих массовых распределений (изобарических сечений) остаточных ядер, указывает на сходный характер возбуждения ядер-мишеней, а также свидетельствует о наличии скейлинга. В качестве примера на рис.2 приведены массовые распределения остаточных ядер, образующихся в реакциях протонов и ядер ^{12}C с одинаковой энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядром ^{181}Ta .

Из представленных массовых распределений следует, что изобарические сечения $\sigma(A)$ во всех изучаемых реакциях уменьшаются при переходе от ^{24}Na к среднетяжелым ядрам-продуктам, достигая минимума в области массовых чисел $\sim A_T/2$ ядра-мишени. Затем значения $\sigma(A)$ возрастают, достигая максимума в области массовых чисел ядра-мишени. Наблюдаемое подобие массовых распределений в реакциях протонов, дейтронов и ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон со среднетяжелыми (Cu, Ni, Co, Mn, Nb, Ag) и тяжелыми (Tb, Ta, Au, Pb) ядрами также свидетельствует о наблюдении факторизации.

Описание распределений остаточных ядер в рамках теоретических модельных представлений позволила сделать выводы о механизме взаимодействия. Нами рассматривались два основных подхода: модель внутриядерного каскада INC (Intra Nuclear Cascade) и модель скалывания AA (Abrasion - Ablation), представляющие два разных взгляда на релятивистское взаимодействие - микроскопический и макроскопический. Оба представления рассматривают взаимодействие как процесс, происходящий в две стадии: возбуждение и статистический распад возбужденной остаточной ядерной системы путем испускания вторичных частиц. В INC-модели предполагается, что возбуждение остаточного продукта происходит из-за передачи некоторой части энергии нуклонами налетающего ядра нуклонам ядра-мишени. Энергия возбуждения рассчитывается по методу Монте-Карло

и перераспределяется по всему объему ядра. Возбуждение ядра снимается путем испускания вторичных частиц. В AA-модели представляется другой способ расчета энергии возбуждения остаточной ядерной системы: сталкивающиеся ядра рассматриваются как сферы с определенной границей и их взаимодействие происходит через две стадии. Первый этап - это скалывание, в ходе которого от налетающего ядра и ядра-мишени откалывается область геометрического перекрытия сталкивающихся ядер. Образовавшийся при этом осколок движется в направлении движения налетающего ядра. Второй этап - это развал ядер-остатков, которые получают энергию возбуждения в результате перераспределения избыточной поверхностной энергии, возникающей на первой стадии процесса. Далее ядра-остатки принимают сферическую форму и испускают вторичные частицы. Рис.2 иллюстрирует экспериментальные массовые распределения в сравнении с расчетными, полученными в рамках соответствующих модельных представлений.

Массовые распределения остаточных ядер, образующихся в изучаемых реакциях, довольно хорошо описываются именно в рамках модели внутриядерного каскада. Заметно расхождение между результатами AA-расчетов и экспериментальными данными в области масс остаточных ядер вблизи ядра-мишени. В этой области расчетные сечения почти в два раза превышают экспериментальные значения, хотя в диапазоне средних масс остаточных ядер согласие расчетных и экспериментальных сечений хорошее.

В вышеизложенном виде оба модельных представления не могут описать массовые распределения остаточных ядер, образующихся на ядрах урана и тория, где нами наблюдается широкий "пик деления" в области массовых чисел $80 \leq A \leq 140$ (см. рис.3). Ядра-остатки в этом диапазоне образуются не только в процессе глубокого расщепления,

но и за счет деления ядра-мишени и бинарного деления образующихся тяжелых ядер с массой, близкой к массе ядра-мишени. Этот факт требует введения в модельные представления дополнительных предположений, поэтому на стадии распада были приняты во внимание следующие обстоятельства:

а) учитывалась зависимость энергии возбуждения E^* от относительной ширины деления Γ_f и испускания частицы Γ_e

$$\frac{\Gamma_e}{\Gamma_f} = \frac{4A^{2/3}a_f(E^* - B)}{a_e[2\sqrt{a_e(E^* - B)} - 1]} \exp\left[2\sqrt{a_e(E^* - B)} - 2\sqrt{a_f(E^* - E_f)}\right], \quad (8)$$

где B - энергия связи и E_f - энергия барьера деления;

б) в распределение плотностей введены соответствующие отношения энергетических уровней

$$\frac{a_f}{a_e} = 1 + \frac{0,1}{\log(E^* - E_f)}. \quad (9)$$

Исходя из определения факторизации (скейлинга), отношение сечений образования ядра-продукта R в реакциях с двумя разными снарядами (p_1 и p_2) на ядре-мишени T можно представить в виде

$$\frac{\sigma^{R(p_1+T)}}{\sigma^{R(p_2+T)}} = \gamma_{p_1} / \gamma_{p_2} = \gamma, \quad (10)$$

где γ - относительный геометрический фактор.

Сравнение сечений образования достаточно большого числа остаточных ядер-нуклидов в реакциях ядер ^{12}C и протонов, как и в реакциях дейтронов и протонов на тех же самых ядрах-мишенях, при той же самой энергии на нуклон, позволяет исследовать фрагментацию более подробно. На рис.4 в качестве примера показаны относительные

геометрические факторы, определенные для отдельных нуклидов, образующихся под действием протонов, дейтронов, ядер ^{12}C на ядре ^{181}Ta при энергии 3,65 ГэВ/нуклон. Соответствующие значения относительных геометрических факторов хорошо согласуются между собой в рамках экспериментальных ошибок в реакциях на ядрах-мишенях Mn , Co , Ni , Cu , Ag , Ta и Au .

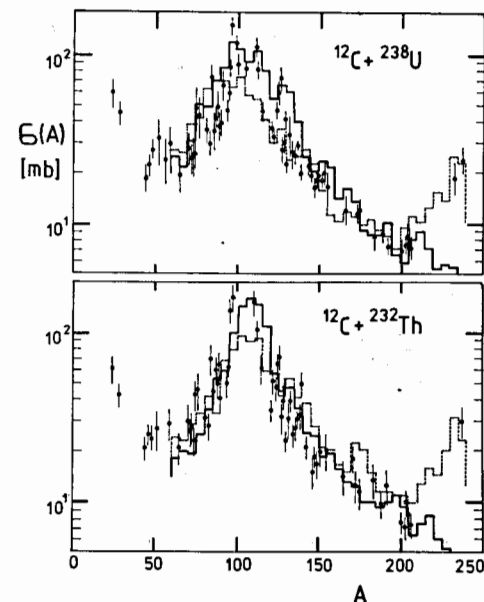


Рис.3. Сравнение массовых распределений остаточных ядер, образующихся в реакциях $^{12}\text{C} + ^{232}\text{Th}$ и $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ при энергии 3,65 ГэВ/нуклон с модельными предсказаниями.

В третьей главе изложены и обсуждаются результаты экспериментов по исследованию кинематических характеристик образующихся остаточных ядер.

Впервые измерены асимметрии вылета вперед-назад и средние пробеги остаточных ядер, образующихся в реакциях $p + ^{181}\text{Ta}$ и $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}$ при энергии 3,65 ГэВ/нуклон. В рамках модели вектора скоростей определены основные кинематические характеристики - кинематические

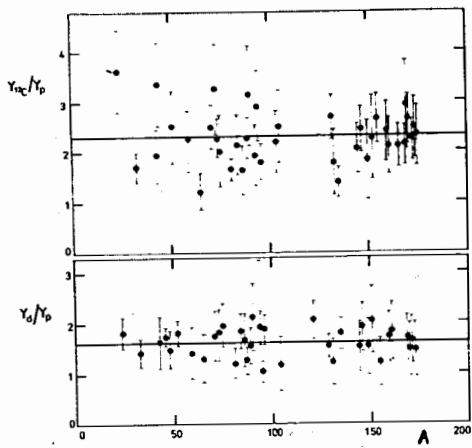


Рис. 4. Относительные геометрические факторы γ_{12C}/γ_p и γ_{Ta}/γ_p остаточных ядер, образующихся в реакциях протонов, дейтронов и ядер ^{12}C с ядрами ^{181}Ta при энергии 3,65 ГэВ/нуклон.

Рис. 5. Зависимость от $\Delta A/A_T$ для кинетической энергии остаточных ядер, образующихся в реакциях $p + ^{181}Ta$ и $^{12}C + ^{181}Ta$ при энергии 3,65 ГэВ/нуклон.

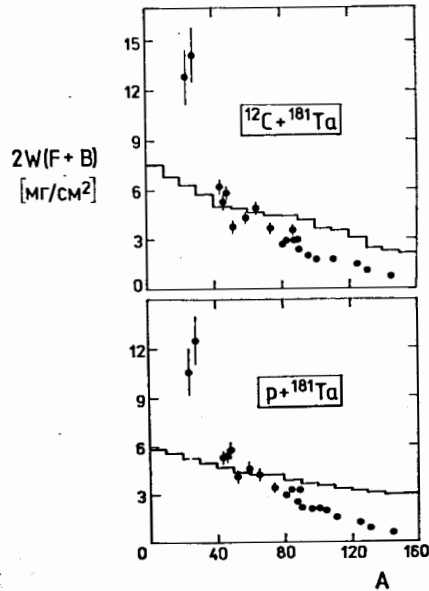
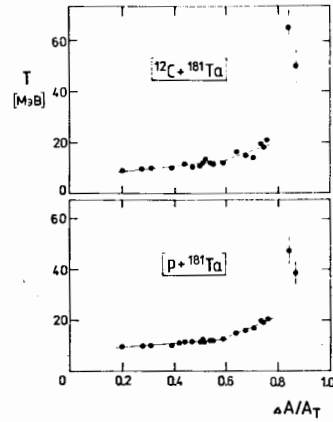


Рис. 6. Сравнение средних пробегов образующихся остаточных ядер в указанных реакциях с модельными расчетами.



Кинематическая энергия растет пропорционально разности масс до $\Delta A/A_T$ ($\Delta A = A_T - A$, A_T - массовое число ядра-мишени, A - массовое число остаточного ядра) - рис.5. Наблюдается также нечувствительность продольной скорости $v_{||}$ к $\Delta A/A_T$.

Кинематические характеристики испускаемых ядер-остатков, за исключением фрагментов промежуточных масс в диапазоне $20 \lesssim A \lesssim 30$, т.е. ^{24}Na и ^{28}Mg , можно описать в рамках каскадно-испарительной модели - рис.6. Отметим, что модельная интерпретация испускания фрагментов промежуточных масс в рамках Q_{GG} -систематики не позволяет определить реальное значение температуры (и, соответственно, энергии возбуждения) составного ядра.

Невозможность описания кинематических характеристик ядер ^{24}Na и ^{28}Mg в рамках модели внутреннего каскада и их большие отклонения от систематического поведения данных (см. рис.5 и рис.6), свидетельствует о другом механизме образования этих фрагментов. Имеется в виду, например, прямое выбивание или кластеризация нуклонов в легкие фрагменты в области, близкой к фазовому переходу типа жидкость - газ.

Нами было проведено систематическое исследование кинематических характеристик фрагментов ^{24}Na и ^{28}Mg , испускаемых в реакциях протонов и ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон на ряде среднетяжелых и тяжелых ядер-мишеней. Анализ полного набора экспериментальных данных показал, что

- средние пробеги ^{24}Na и ^{28}Mg в веществе мишени экспоненциально растут с массовым числом ядра-мишени, A_T ,
- в реакциях на более тяжелых ядрах-мишенях кинетическая энергия испускаемых фрагментов ^{24}Na и ^{28}Mg резко увеличивается,
- продольная скорость $v_{||}$ слабо зависит от относительной разности масс $\Delta A/A_T$,
- средний импульс $\langle p \rangle$ растет с массовым числом ядра-мишени A_T .

Впервые убедительно показано наличие скейлинга кинематических величин - асимметрии вылета, среднего пробега и продольной скорости - в широком диапазоне остаточных ядер.

Сравнение кинематических величин, полученных в настоящем эксперименте, с опубликованными ранее для других энергий (≥ 1 ГэВ на нуклон) протонов и ядер ^{12}C , не противоречит гипотезе предельной фрагментации.

Определенные нами коэффициенты анизотропии b/a углового распределения

$$C(\theta) = 1 + b/a(\cos \theta) \quad (II)$$

испускаемых ядер-продуктов свидетельствуют о большой анизотропии и эмиссии многозарядных фрагментов, происходящей преимущественно в переднюю полусферу.

В четвертой главе обсуждаются результаты экспериментов на изотопически разделенных мишенях.

Измерены изомерные отношения, то есть отношения выходов образования высокоспиновых и низкоспиновых состояний для ядер ^{99}Rh и ^{110}In , образующихся в реакциях протонов с энергией 3,65 ГэВ и 8,1 ГэВ, и ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон на изотопах олова $^{112}\text{Sn}, ^{116}\text{Sn}, ^{118}\text{Sn}, ^{120}\text{Sn}, ^{124}\text{Sn}$ - рис.7. Полученные результаты анализируются в зависимости от числа испускаемых нуклонов и состава ядра-мишени. Из рис.7 видно, что изомерные отношения растут с увеличением разности массовых чисел ядра-мишени и ядра-продукта. Рост отношений выходов изомерных состояний от числа испущенных нуклонов одинаков как в протон-ядерных, так и в ядро-ядерных реакциях глубокого расщепления. Это свидетельствует о том, что продукты рас-

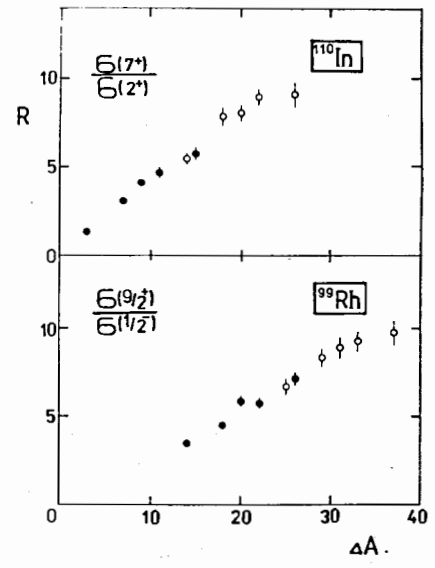


Рис. 7. Изомерные отношения для ^{99}Rh и ^{110}In , образующихся в реакциях $p + \text{Sn}(\bullet)$ и $^{12}\text{C} + \text{Sn}(\circ)$, при энергии 3,65 ГэВ/нуклон, в зависимости от числа вылетевших нуклонов ΔA .

Рис. 8. Отношения $(N/Z)_p$ для наиболее вероятного заряда в зависимости от соответствующих отношений для мишеней $(N/Z)_T$. Сплошная кривая - результат МНК-подгонки в диапазоне $1,0714 \leq (N/Z)_T \leq 1,2413$; штриховая линия представляет зависимость $(N/Z)_p = (N/Z)_T$.

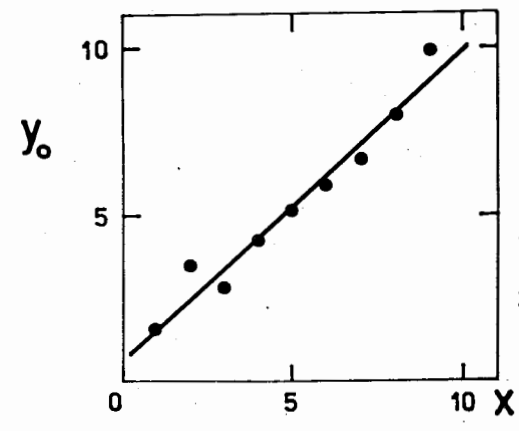
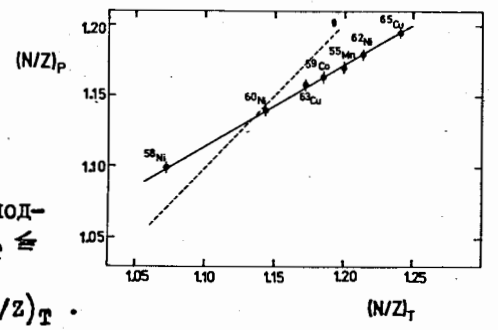


Рис. 9. Наиболее вероятное число нейтронов, образующихся в реакциях (р,хруп) при энергии 3,65 ГэВ/нуклон в зависимости от параметра X.

щепления образуются на испарительной стадии взаимодействия и их конечное состояние не зависит от типа снаряда. Нами также продемонстрировано подобие значений соответствующих изомерных отношений для обеих энергий протонов, что говорит об энергетической независимости этих величин. Обнаружена зависимость изомерных отношений от структуры исходного ядра. Показано, что изомерные отношения ядер ^{99}Rh и ^{110}In для изучаемых реакций растут линейно в зависимости от отношения числа нейтронов к числу протонов ядра-мишени, $(N/Z)_T$.

Зависимость углового момента от изомерных отношений чувствительна к индивидуальным свойствам ядер, в которых наблюдаются изомерные пары. Расчеты для изомерных отношений, полученных в реакциях при низких энергиях, сводятся к согласованию значения изомерного отношения с величинами углового момента образовавшегося остаточного ядра. Эти расчеты основаны на статистическом описании плотности ядерных уровней и momente инерции составного ядра. Следует отметить, что распределение по угловому моменту в значительной степени обусловлено спиновой зависимостью плотности энергетических уровней. Таким образом, количественное соотношение между величиной углового момента возбужденного ядра и изомерным отношением может быть оценено по функции спинового параметра, определенной из плотности уровней состояний с определенным спином. Нами установлена связь между функцией спинового параметра возбужденного ядра и соответствующими изомерными отношениями $^{110}\text{In} (7^+) / ^{110}\text{In} (2^+)$ и $^{99}\text{Rh} (9/2^+) / ^{99}\text{Rh} (1/2^-)$ в обеих реакциях. Обнаруженная в эксперименте корреляция изомерных отношений и угловых моментов возбужденных ядер оказывается полезной для выделения разных вариантов модельных представлений о протон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях.

Определение сечений на разделенных изотопах позволило изучить более детально влияние структуры ядер-мишеней на образование остаточных ядер в релятивистских взаимодействиях. Методом наведенной активности нами измерены сечения образования ядер-нуклидов, возникающих при облучении изотопических мишеней никеля $^{58,60,62}\text{Ni}$ и меди $^{63,65}\text{Cu}$ протонами с энергией 3,65 ГэВ. Анализ экспериментальных данных проводился по параметризации зарядовых дисперсий и массовым распределениям. Более тонким критерием для наблюдения эффекта структуры ядра-мишени является определение зависимости отношения $(N/Z)_P$ для наиболее вероятного заряда, $Z_P(2)$ от соответствующего отношения для мишени, $(N/Z)_T$. Использование наших данных для изотопов ^{55}Mn , ^{59}Co , $^{58,60,62}\text{Ni}$ и $^{63,65}\text{Cu}$ позволило в диапазоне $1,0714 \leq (N/Z)_T \leq 1,2413$ определить зависимость (см. рис.8)

$$(N/Z)_P = 0,486 + 0,571(N/Z)_T \quad (12)$$

Как следует из рис.8, точка для ^{58}Ni лежит под линией $(N/Z)_P = (N/Z)_T$, что противоречит остальным данным и каскадно-испарительной модели взаимодействия. В этой модели число испаряемых протонов и нейтронов должно быть пропорционально N и Z ядра-мишени, соответственно. При сохранении зарядовой независимости среднее отношение N/Z возбужденного ядра должно сравниваться с $(N/Z)_T$ в процессе самого каскада. Под действием кулоновского барьера, подавляющего вылет протонов, отношение $(N/Z)_P$ для продуктов ядерного расщепления должно быть меньше, чем $(N/Z)_T$.

Определение в нашем эксперименте с достаточно высокой точностью сечений остаточных ядер, образующихся в реакциях глубокого ядерного расщепления $(p, x\text{руп})$ на разделенных изотопах никеля и меди, а также на изотопах ^{55}Mn и ^{59}Co при той же самой энергии протонов 3,65 ГэВ, позволило провести их анализ, связанный с

множественностью нейтронов. Установлено, что для описания зависимости сечений $\sigma(A, Z)$ образования остаточных ядер в изучаемых ($p, \text{хруп}$) реакциях, от числа вылетающих нейтронов y , можно применить формулу

$$\sigma(A, Z) = \sigma_0 \exp \left[-a(y - y_0)^2 \right] . \quad (13)$$

в которой подгоночные параметры σ_0 (мбн) и a означают амплитуду и ширину распределения, соответственно, y_0 - наиболее вероятное число вылетающих нейтронов. Тот факт, что сечения образования остаточных ядер в ($p, \text{хруп}$) реакциях имеют гауссовское распределение как функции аргумента y для каждого значения X ($1 \leq X \leq 9$) и отличаются сильной зависимостью от структуры мишени, указывает на то, что нейтронная эмиссия сильно зависит от избытка нейтронов в ядре-мишени. Наиболее вероятное число вылетающих нейтронов y_0 , характеризующее в общем множественность нейтронов при облучении изотопических мишеней релятивистскими протонами, растет линейно с параметром X . Эта зависимость представлена на рис.9.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В приложении приводятся таблицы сечений образования остаточных ядер в изучаемых реакциях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

I. Проведен цикл экспериментальных исследований.

1) Выполнена большая программа экспериментов по исследованию образования остаточных ядер в протон-, дейтрон- и ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях с применением методики измерений наведенной активности облученных мишеней. Получен новый экспериментальный материал и обширные данные о сечениях образования и кинематических характеристиках остаточных ядер в реакциях на средне-тяжелых и тяжелых ядрах-мишенях. Экспериментальные данные на пучках ядер углерода с максимальной энергией 44 ГэВ (3,65 ГэВ на нуклон), и дейтронов с энергией 7,3 ГэВ (3,65 ГэВ/нуклон) получены впервые в мире. Полученные нами данные на пучках релятивистских протонов в особо важной области предельной фрагментации существенно расширяют информативность ранее опубликованных данных.

2) Экспериментально проверена методика определения независимых выходов образующихся ядер-продуктов с учетом всех изотопов из соответствующих цепей распада. На основе систематики зарядовых дисперсий остаточных ядер, образующихся в исследуемых релятивистских взаимодействиях, определены соответствующие массовые распределения. Проведен анализ кинематических величин - асимметрий вылета вперед-назад и среднего пробега испускаемых ядер в веществе мишени - в рамках двухстадийной векторной модели.

3) Изучены реакции на изотопически разделенных мишенях. Полученный экспериментальный материал по изомерным отношениям выходов и сечениям образования остаточных ядер в реакциях протонов и ядер ^{12}C на разделенных изотопах позволил изучить эффект структуры ядра-мишени. Анализировались также зависимости сечений в ($p, \text{хруп}$) реакциях от числа вылетающих нуклонов.

II. Выполнены методические разработки.

1) С использованием ядерных фотоэмульсий, камер деления, тяжелых сцинтилляторов наряду с активационной методикой разработана и применена система мониторинга пучков релятивистских частиц и ядер, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, с высокой точностью определены сечения мониторинговых реакций ^{27}Al (снаряд, X) ^{24}Na и ^{12}C (снаряд, X) ^{11}C при релятивистских энергиях.

2) Впервые применен спектрометр гамма-излучения со сцинтилляционным детектором BaF_2 . В рамках экспериментальной методики испытаны свойства нового сцинтилляционного материала BaF_2 .

3) Применением программы моделирования по методу Монте-Карло процессов взаимодействия гамма-квантов в однородном веществе детектора, вычислены абсолютные значения эффективностей $Ge/Li/$ и BaF_2 детекторов для определенной геометрии регистрации гамма-квантов из облученных мишеней.

4) Предложен новый алгоритм для идентификации и определения параметров гамма-пииков и на его основе создана программа, осуществляющая автоматическую обработку гамма-спектров, измеряемых спектрометрами с полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами. Создано полное математическое обеспечение обработки данных, включая робастную минимизацию, а также метод сингулярного разложения, позволяющий решать линейные задачи МНК в общем виде.

III. Получены новые физические результаты.

I) Получены данные о сечениях образования остаточных ядер в следующих реакциях:

а) протонов и дейтронов с одинаковым импульсом (9 ГэВ/с) с ядрами меди, никеля и тантала;

б) дейтронов с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядрами Nb , Ag , Tb , Au и Pb ;

в) протонов и ядер углерода с одинаковой энергией (3,65 ГэВ на нуклон) с ядрами Mn , Co , Ni , Cu , Ag , Ta , Au , Pb а также ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядрами U и Th ;

г) протонов с энергией 3,65 ГэВ с изотопически разделенными мишенями $^{58,60,62}Ni$ и $^{53,65}Cu$.

Сечения образования остаточных ядер анализировались по общей систематике зарядовых дисперсий и массовых распределений. Зарядовые дисперсии описываются гауссианом, причем нахождение соответствующих параметров в определенном диапазоне масс остаточных ядер требует предположение о плавной зависимости изобарических сечений и о линейной зависимости наиболее вероятного заряда от массового числа образовавшегося ядра. Форма кривых зарядовых распределений для остаточных ядер, образующихся в реакциях под действием разных снарядов, не зависит от типа первичной частицы. Наблюдается сдвиг наиболее вероятного заряда в соответствующих реакциях протонов и ядер ^{12}C с тяжелыми ядрами-мишенями. Наблюдаемое подобие массовых

распределений остаточных ядер, образующихся в реакциях на средне-тяжелых и тяжелых ядрах-мишенях под действием релятивистских протонов, дейтронов и ядер ^{12}C , указывает на однотипный характер возбуждения ядер-мишеней, а также свидетельствует о наличии скейлинга.

2) Особенностью массовых распределений остаточных ядер, образовавшихся в реакциях $^{12}C + ^{232}Th$ и $^{12}C + ^{238}U$ является широкий "пик деления" в массовом диапазоне $80 \leq A \leq 140$. Второй "пик деления" в диапазоне масс остаточных ядер $160 \leq A \leq 190$ не наблюдался.

3) Полученные параметры зарядовых дисперсий и массовых распределений соответствующих остаточных ядер указывают на наличие факторизации. Впервые определены геометрические факторы скейлинга для ряда среднетяжелых и тяжелых ядер-мишеней. Полученные средние значения относительных геометрических факторов

$$\langle \gamma_d / \gamma_p \rangle \approx 1,7 \text{ и } \langle \gamma_c / \gamma_p \rangle \approx 2,3$$

хорошо согласуются между собой в рамках экспериментальных ошибок во всех исследуемых реакциях.

4) Проведено сравнение экспериментальных данных по сечениям образования остаточных ядер в ряде релятивистских реакций в зависимости от энергии первичной частицы (ядра). Убедительным результатом этого сравнения является наличие предельной фрагментации в области энергий $\geq 1-2$ ГэВ/нуклон.

5) Экспериментально изучена эмиссия остаточных ядер и многозарядных фрагментов в процессе глубокого расщепления на среднетяжелых и тяжелых ядрах-мишенях. Получены данные о кинематических характеристиках - асимметрии вылета вперед-назад и среднего пробега в веществе мишени остаточных ядер, образующихся в реакциях $p + ^{181}Ta$ и $^{12}C + ^{181}Ta$ при энергии 3,65 ГэВ/нуклон. Обнаружение повышенных значений кинематических характеристик для фрагментов промежуточных масс ^{24}Na и ^{28}Mg привело к систематическому изменению этих величин в реакциях, вызванных протонами и ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон на ядрах Mn , Co , Cu , Y , Nb , Ag , Tb , Ta , Au , Th и U . Полученные нами кинематические данные об эмиссии фрагментов ^{24}Na и ^{28}Mg в разных реакциях позволили провести систематизацию данных и более подробный анализ механизма их образования. Асимметрия вылета и средние пробеги анализировались в рамках модели вектора скоростей, что позволило определить кинетическую энергию, переносимую скоростью и средний импульс испускаемого остаточного ядра. Определена также анизотропия угловых распределений многозарядных фрагментов, испускаемых в исследуемых релятивистских взаимодействиях.

6) Асимметрия вылета испускаемых ядер свидетельствует о большой анизотропии в эмиссии многозарядных фрагментов, происходящей преимущественно в переднюю полусферу. Анизотропия углового распределения испускаемых фрагментов ^{24}Na и ^{28}Mg имеет большие значения для среднетяжелых ядер-мишеней и уменьшается при переходе к более тяжелым ядрам-мишеням для реакций под действием протонов и ядер ^{12}C . Результаты, полученные нами для реакций с участием ядер ^{12}C с максимальной энергией 44 ГэВ, доступной на синхрофазотроне ЛБЭ ОИЯИ, не свидетельствуют об испускании фрагментов промежуточных масс в заднюю полусферу. Обнаружено экспоненциальное возрастание средних пробегов ^{24}Na и ^{28}Mg в веществе мишени в зависимости от массового числа ядра-мишени.

7) Обнаружено, что кинетическая энергия испускаемого остаточного ядра растет пропорционально относительной разности масс до $\Delta A/A_T \approx 0,8$. Отклонение от систематического поведения данных наблюдались для фрагментов ^{24}Na и ^{28}Mg . В реакциях на более тяжелых ядрах испускаемые фрагменты обладают более высокой кинетической энергией. Обнаружена нечувствительность переносной скорости v_n ядер отдачи к относительной разности масс.

8) Впервые показано наличие факторизации кинематических величин (асимметрии вылета вперед-назад, среднего пробега и переносной скорости) в широком массовом диапазоне остаточных ядер, образующихся в реакциях протонов и ядер ^{12}C с одинаковой энергией 3,65 ГэВ/нуклон на ядрах ^{181}Ta . Сравнение настоящих данных с опубликованными ранее для других энергий не противоречит гипотезе предельной фрагментации.

9) Получены данные для реакций на изотопически разделенных мишенях:

а) изомерные отношения выходов образования состояний с высоким и низким спином для ядер ^{99}Rh и ^{110}In , образующихся в реакциях под действием протонов и ядер углерода с энергией 3,65 ГэВ на нуклон на изотопах олова $^{112},^{116},^{118},^{120},^{124}\text{Sn}$;

б) абсолютные сечения образования остаточных ядер в реакциях протонов на разделенных изотопах никеля $^{58},^{60},^{62}\text{Ni}$ и меди $^{63},^{65}\text{Cu}$.

Обнаружено, что рост изомерных отношений ядер ^{99}Rh и ^{110}In в зависимости от числа вылетевших нуклонов одинаков как в протон-ядерных, так и ядро-ядерных реакциях, что свидетельствует об образовании продуктов расщепления на испарительной стадии взаимодействия и независимости их конечного состояния от типа первичной час-

типы. Показано, что изомерные отношения не зависят от энергии протонов в диапазоне 3,65 - 8,1 ГэВ.

Сечения образования остаточных ядер на разделенных мишенях анализировались по систематике зарядовых и массовых распределений, что позволило исследовать зависимость функции $(N/Z)_P$ от отношения числа нейтронов к числу протонов исходного ядра-мишени, $(N/Z)_T$.

10) Анализ данных, полученных на изотопически разделенных мишенях, позволил сделать выводы о наблюдении эффекта структуры исходного ядра и о множественности нейтронов, испускаемых в реакциях (p, xnp) при релятивистских энергиях.

IV. Изучены механизмы образования остаточных ядер в ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях.

1) Установлено, что сечения расщепления $\sigma^{(P)}$ представляют большую часть (60-75%) полного геометрического сечения данной реакции. Определенные значения соответствующих прицельных параметров $b \approx 1/2(R_p + R_T)$, R_p и R_T - радиусы налетающего снаряда и ядра-мишени, соответственно, свидетельствуют о том, что процесс, в основном, происходит как периферическое столкновение.

2) Массовые распределения изобарических сечений $\sigma(A)$ остаточных ядер можно описать в рамках модели скалывания и модели внутриядерного каскада, учитывая, что процесс взаимодействия происходит через две стадии: возбуждения и статистический распад посредством испускания вторичных частиц. Отметим, что форма массовых распределений чувствительна к энергии возбуждения. Расхождение между рассчитанными по модели скалывания и экспериментальными изобарическими сечениями $\sigma(A)$ наблюдалось для остаточных ядер вблизи ядра-мишени. Для описания массовых распределений остаточных ядер, образующихся в реакциях ядер углерода с энергией 3,65 ГэВ на нуклон с ядрами урана и тория, в которых наблюдался широкий "пик деления", необходимо учитывать также испускание осколков деления на стадии распада. При этом надо учесть зависимость энергии возбуждения от отношений ширины деления Γ_f и испускания частицы Γ_e , а также ввести соответствующие отношения энергетических уровней a_f/a_e в распределение плотностей.

Кинематические характеристики испускаемых ядер-продуктов с исключением фрагментов промежуточных масс ^{24}Na и ^{28}Mg можно также описать в рамках модели внутриядерного каскада. В пользу каскадного механизма образования испускаемых остаточных ядер в диапазоне

массовых чисел $A \geq 40$ свидетельствуют также данные об изомерных отношениях.

3) По видимому, полученные результаты указывают на существование разных механизмов образования остаточных ядер в релятивистских ядро-ядерных взаимодействиях. В основном процесс происходит как периферическое столкновение налетающего ядра или отдельных нуклонов из налетающего ядра с нуклонами ядра-мишени. Возбуждение первичной остаточной ядерной системы происходит за счет передачи большей части энергии нуклонами налетающего ядра нуклонам ядра-мишени. Ядро-мишень можно описать посредством модели Ферми-газа с учетом реальных распределений плотностей нуклонов в ядре, или посредством модели Краппе-Никса (для ядер-мишеней урана и тория) с учетом реальных "вязкостей" нуклонов в ядре. Статистический распад возбужденной системы происходит с испусканием вторичных частиц и образованием остаточного ядра, наблюдаемого в эксперименте.

Эмиссия фрагментов промежуточных масс с $20 \leq A \leq 30$ является одной из самых интересных особенностей ядро-ядерных взаимодействий при релятивистских энергиях. Исследование механизма образования и испускания остаточных ядер в этом массовом диапазоне связано, по видимому, с существованием аномально высокой плотности и температуры "сжатой" ядерной материи. Большие отклонения кинематических характеристик ядер ^{24}Na и ^{28}Mg от систематического поведения данных для остаточных ядер с $A \geq 40$, наблюдаемые в проведенных нами экспериментах с протонами и ядрами ^{12}C релятивистских энергий на ряде среднетяжелых и тяжелых ядер-мишеней, свидетельствуют о другом механизме их образования. Одним из них может быть кластеризация нуклонов в области, близкой к фазовому переходу типа жидкость-газ, не исключено также и прямое образование в стадии развала ядра. Маловероятным следует считать то, что фрагменты ^{24}Na и ^{28}Mg , образующиеся в релятивистских взаимодействиях, являются "последокаскадными" ядрами.

4) Обнаруженные "аномальные" значения сечения реакций $^{58}\text{Ni}(p, p2n)^{56}\text{Ni} = 1,7 \pm 0,25$ мбн; $^{58}\text{Ni}(p, 2pn)^{56}\text{Co} = 24,5 \pm 1,7$ мбн и $^{60}\text{Ni}(p, 2pn)^{58}\text{Co} = 28,5 \pm 1,8$ мбн, не подчиняющиеся - в отличие от подавляющего большинства настоящих данных - никакой систематике. Это, по всей вероятности, связано с другим механизмом взаимодействия. Возможно, что эти реакции являются прямыми реакциями выбивания дейтрона из ядра-мишени, т.е. $^{58}\text{Ni}(p, dn)^{56}\text{Ni}$, $^{58}\text{Ni}(p, dp)^{56}\text{Co}$ и $^{60}\text{Ni}(p, dp)^{58}\text{Co}$. Интересно то, что сечения зарядово-симметричных реакций (p, dp) и (p, dn) отличаются на порядок величины.

5) Сечения реакций $(p, \text{хруп})$ для данного значения x можно описать гауссовскими распределениями как функциями аргумента y с максимальными значениями при $y=y_0$, определяющими множественность вылетающих нейтронов. Анализ $(p, \text{хруп})$ реакций обнаружил эффект "запоминания" структуры исходного ядра, причем множественность нейтронов оказывается пропорциональной параметру x . В процессе испарения избыточные нейтроны ядра-мишени испускаются почти свободно, в то время, как нейтронная эмиссия из нейтронно-дефицитного ядра-мишени является сильно подавленной.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах :

1. П.Козма, Я.Климан и М.Леонард. Фрагментация ядер ^{181}Ta релятивистскими дейтронами. Тезисы докладов XXXVII совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра"., Юмала, 1987, с.359.
2. Ц.Дамдинсүрэн, В.М.Дьяченко, А.Дука-Зойоми, Я.Климан, П.Козма и Б.Тумэндэмбэрэл. Измерение полного сечения реакции $^{27}\text{Al}(^{12}\text{C}, X)^{24}\text{Na}$ при энергии 3.65 ГэВ/нуклон. Сообщения ОИЯИ, PI-87-932, Дубна, 1987.
3. П.Козма, Я.Климан и М.Леонард. Испускание ^{24}Na и ^{28}Mg в реакциях с релятивистскими протонами. Тезисы докладов XXXVIII совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра". Баку, 1988, стр.304.
4. Ц.Дамдинсүрэн, П.Козма, Б.Тумэндэмбэрэл, Р.Хоролжав и Д.Чултэм. Определение выходов нуклидов, образующихся во взаимодействии релятивистских ядер с ядрами. Сообщения ОИЯИ PI-88-135, Дубна, 1988.
5. Ц.Дамдинсүрэн, П.Козма и В.Б.Злоказов. Применение робастной подгонки для определения изобарических сечений остаточных ядер в релятивистских взаимодействиях. Сообщения ОИЯИ PI-88-312, Дубна, 1988.
6. P.Kozma, C.Damdinsuren, D.Chultem. Q_{GG} - systematics of fragments. Report JINR E1-88-433, Dubna, 1988.
7. P.Kozma, J.Kliman and M.Leonard. Target residues from the reactions of 9 GeV/c Protons and Deuterons with ^{181}Ta . Czech.J.Phys., B38, 1988, p.973.
8. P.Kozma, J.Kliman. Spallation of Copper by 9 GeV/c Protons and Deuterons. Czech.J.Phys., B38, 1988, p.1317.
9. V.Yanovsky, P.Kozma. Scintillator working with p-p' Diphenylstilbene Shifter. Nucl.Instr. and Meth., A276, 1989, p.659.

10. В.В.Яновский, Я.А.Валбис и П.Козма. Фторид бария. Новые возможности для регистрации ионизирующих излучений. Препринт ЛИАФ, № 1499, Ленинград, 1989.
11. P.Kozma, J.Kliman and M.Leonard. Light fragment emissions in reactions induced by high-energy protons. Physics and Applications., Vol.15, 1988, p.73., /Proceedings of the Vth Int.Symp. "Nucleon Induced Reactions", June 20-25, 1988, Smolenice, Czechoslovakia./.
12. P.Kozma and J.Kliman. The Interpretation of Large Mass Fragment Yields from Reactions Induced by High-Energy Protons on Heavy-Target Nuclei. Physics and Applications., Vol.15, 1988, p.77., /Proceedings of the Vth Int.Symp. "Nucleon Induced Reactions", June 20-25, 1988, Smolenice, Czechoslovakia./.
13. C.Damdinsuren, V.I.Ilyushchenko, P.Kozma, D.Chultem. Yields of Radionuclides Formed in the Interaction of 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and Protons with $^{\text{nat}}\text{Pb}$. Report JINR E1-89-481, Dubna, 1989.
14. P.Kozma, V.I.Ilyushchenko and J.Kliman. Target Residues from the Reaction of 3.65 A·GeV ^{12}C with ^{232}Th and ^{238}U . Report JINR E1-89-482, Dubna, 1989.
15. V.I.Ilyushchenko and P.Kozma. The Solution of Least-Squares Problems by Standart and SVD Codes. Report JINR E10-89-521, Dubna, 1989.
16. P.Kozma and V.Yanovsky. Comparison of Properties of Large BaF_2 and BaF_2 +DPS scintillators. Nucl.Instr. and Meth., A281, 1989, p.346,
17. C.Damdinsuren, V.M.Dyachenko, P.Kozma and K.D.Tolstov. Monitoring System for Relativistic Particles and Nuclei. Nucl.Instr. and Meth., A288, 1990, p.319.
18. P.Kozma. Application of the Monte Carlo Method to Determine the Thickness of a ΔE -detector. Nucl.Instr. and Meth., A281, 1989, p.660.
19. P.Kozma, K.D.Tolstov and V.V.Yanovsky. Cross Sections for the Production of ^{11}C in C -Targets by 3.65 A·GeV Projectiles. Nucl.Instr. and Meth., A291, 1990, p.662.
20. P.Kozma, B.Tumendemberel and D.Chultem. Nuclear Reactions of Medium and Heavy Target Nuclei with High-Energy Projectiles. I. Spallation of ^{55}Mn , ^{59}Co , $^{\text{nat}}\text{Ni}$ and $^{\text{nat}}\text{Cu}$ by 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and 3.65 GeV protons. Czech.J.Phys., B40, 1990, p.29.
21. P.Kozma, C.Damdinsuren. Nuclear Reactions of Medium and Heavy Target Nuclei with High-Energy Projectiles. II. Fragmentation of $^{\text{nat}}\text{Ag}$ and ^{197}Au by 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and 3.65 GeV protons. Czech.J.Phys., B40, 1990, p.38.
22. P.Kozma. Nuclear Reactions of Medium and Heavy Target Nuclei with High-Energy Particles. III. Emission of ^{24}Na and ^{28}Mg Fragments. Czech.J.Phys., B40, 1990, p.513.
23. P.Kozma, K.Hanssgen. Nuclear Reactions of Medium and Heavy Target Nuclei with High-Energy Projectiles. IV. Interpretation of Mass Fragment Yields. Czech.J.Phys., B40, 1990, p.613.
24. P.Kozma and J.Kliman. Spallation of Nickel by 9 GeV/c Protons and Deuterons. J.Phys.G.: Nucl.Part.Phys., V.16, 1990, p.45.
25. P.Kozma, J.Kliman and V.I.Ilyushchenko. Uranium and Thorium Target Fragmentation by 3.65 A·GeV ^{12}C - ions. J.Phys.G.: Nucl.Part.Phys., V.16, 1991, p.61.
26. P.Kozma, C.Damdinsuren, D.Chultem and B.Tumendemberel. Nuclear Reactions of Tantalum with 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and 3.65 GeV Protons. J.Phys.G.: Nucl.Part.Phys. в печати; JINR Report E1-89-252, 1989, Dubna.
27. Ц.Дамдинсүрэн, В.И.Илющенко, П.Козма, Б.Тумэндэмбэрэл и Д.Чултэм. Образование остаточных ядер при взаимодействии дейтронов с энергией 3.65 А·ГэВ с ядрами ^{93}Nb , ^{108}Ag , ^{159}Tb , ^{197}Au и ^{207}Pb . Ядерная физика, т.52, вып.2(8), 1990, с.330.
28. Ц.Дамдинсүрэн, П.Козма и Д.Чултэм. Изомерные отношения в реакциях с релятивистскими дейтронами. Сборник тезисов докладов XXXX совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра". Ленинград, 1990, стр.346.
29. П.Козма, В.И.Илющенко и В.Гнатович. Расщепление изотопов никеля и меди протонами с энергией 3.65 ГэВ. Ядерная физика, т.53, вып.3, 1991, стр.722.
30. P.Schotanus, P.Dorenbos, P.Kozma, V.Yanovsky. Test of Large Volume BaF_2 Scintillators from JINR. TU Delft Report 90-1, Straatech, 1990, Delft, Netherlands.
31. P.Kozma, V.V.Yanovsky. Application of BaF_2 Scintillator to Off-line Gamma-Ray Spectroscopy. Czech.J.Phys., B40, 1990, p.393
32. P.Kozma. Systematics of Target Recoil Properties of Intermediate Fragments Produced in the Interaction of 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and Protons with Complex Nuclei. JINR Report E1-90-185, 1990, Dubna.
33. P.Kozma. Recoil Properties of Deep Spallation and Fragmentation Products in the Interactions of Tantalum with 3.65 A·GeV ^{12}C -ions and Protons. Physica Scripta, в печати; JINR Report E1-90-189, 1990, Dubna.
34. P.Kozma, J.Kozmova, E.Streit, V.Hnutowicz. A Program FEDEF for the Parametrization of Experimental Data. Report JINR E10-86-430, 1986, Dubna.
35. V.Hnutowicz, V.I.Ilyushchenko, P.Kozma. GSAP: Fortran Code for Gamma-Spectrum Analysis. Comp.Phys.Comm., V.60, 1990, p.111.
36. P.Kozma, V.Yanovsky. BaF_2 Scintillators-New Possibility in the Detection of Ionizing Radiation. Czech.J.Phys., A40, 1990, p.231.

37. P.Kozma. Mass Yields in Reactions Induced by 3.65 A·GeV Deuterons. Proc.of the Xth Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 1990, p.70.
38. P.Kozma and J.John. Investigation of the Isotopic Effect via Isomer Yield Ratios. Proc.of the Xth Seminar on High-Energy Physics Problems, Dubna, 1990, p.70.
39. P.Kozma. Application of Simple Monte-Carlo Model to Determine Efficiencies of BaF₂ and Ge(Li) Detectors. Czech.J.Phys., B41, 1991, в печати.
40. P.Kozma and J.John. Isomer Yield Ratios of ⁹⁹Rh and ¹¹⁰In Produced in the p+Sn and ¹²C + Sn Reactions at 3.65 A·GeV. Czech.J.Phys., B41, 1991, в печати.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 февраля 1991 года.