

69637



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2009-5

На правах рукописи  
УДК 539.17

Б-20

БАЛАБЕКЯН  
Анаит Рафиковна

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ  
РАЗДЕЛЕННЫХ ИЗОТОПАХ И НА ТЯЖЕЛЫХ  
РАДИОАКТИВНЫХ ЯДРАХ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

С 343

Дубна 2009

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова Объединенного института ядерных исследований и на кафедре ядерной физики Ереванского государственного университета.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Чубарян Эдвард  
Варганович  
доктор физико-математических наук  
Ковалик Алоиз  
доктор физико-математических наук  
Демьянова Алла Сергеевна

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в «\_\_\_» час, на заседании  
диссертационного совета по защите диссертации Д 720.001.03 при  
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по адресу: Россия, 141980,  
Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в НТБ Объединенного института  
ядерных исследований.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Ю.А.Батусов

В настоящей диссертации представлены экспериментальные результаты в области ядерных реакций на разделенных изотопах олова ( $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ ) под действием протонов с энергиями 0.66, 1.0, 3.65 и 8.1 ГэВ и под действием дейтронов с энергией 3.65 ГэВ/нуклон. Приведены также результаты исследований для выходов реакций под действием протонов с энергией 0.66 ГэВ на радиоактивных ядрах  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$ . Проведено детальное сравнение полученных результатов с соответствующими теоретическими моделями.

### Актуальность темы:

Согласно современным представлениям взаимодействие высокоэнергетичных заряженных частиц с атомными ядрами описывается двухступенчатой, каскадно-испарительной моделью. В первой, быстрой стадии реакции, налетающая частица взаимодействуя на своем пути с ограниченным числом нуклонов ядра, вылетая из ядра уносит с собой определенное число быстрых частиц. На второй стадии, оставшееся после каскада, возбужденное ядро относительно изотропно испускает нуклоны (гамма кванты) и превращается в ядро-продукт [1]. Эта модель описывает ядерные реакции в широкой области масс мишеней, ядер-продуктов и энергий налетающих частиц. В тоже время, несмотря на многочисленные экспериментальные факты, накопленные за многолетнюю историю в физике ядерных реакций, некоторые из важных проблем, таких как механизм адрон- и ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях, поиск нового острова стабильности сверхтяжелых элементов, свойства экзотических ядер и т.д. все еще ожидают своего решения. Одна из них связана с выяснением механизма образования легких ядер-продуктов (механизм мультифрагментации).

Ядерная фрагментация была открыта 70 лет назад при изучении космических лучей, как неожиданный феномен сопровождающий соударение релятивистских протонов с мишенями. Она выявилась в виде испускания медленных фрагментов, масса которых была тяжелее чем масса  $\alpha$ -частиц, но легче чем масса фрагментов деления [2]. В настоящее время их называют Фрагментами Промежуточной Массы (ФПМ  $7 \leq Z \leq 20$ ). В дальнейшем,

Объединенный институт  
ядерных исследований  
ОИЯИ

ядерная фрагментация была обнаружена в экспериментах на ускорителях. Ситуация сильно изменилась в 1982 году, когда на ускорителе в Беркли Якобсоном и др. во взаимодействиях  $^{12}\text{C}$  (250 МэВ/нуклон) с ядрами фотоэмульсий было открыто множественное рождение ФПМ (ядерная мультифрагментация) [3]. Это стимулировало появление многих теоретических моделей, в которых образование легких ядер-продуктов объяснялось фазовым переходом "жидкость-газ", который происходил при большой температуре горячего ядра, образующейся при облучении ядра-мишени высокоэнергетичной частицей [4,5]. Горячие ядра образуются при столкновении высокоэнергичных тяжелых ионов с ядрами. Нагревание ядра сопровождается сжатием, сильным вращением и искажением формы, что в свою очередь влияет на распад самого высоковозбужденного ядра. В таких случаях говорят о «динамической» мультифрагментации. Картина становится более ясной когда в качестве бомбардирующих частиц используются легкие релятивистские снаряды (протоны, дейтроны,  $\alpha$ -частицы). В результате энергия возбуждения ядра почти целиком тепловая и можно применить термодинамические подходы для описания ядерного фазового перехода «жидкость-газ» («тепловая мультифрагментация»).

В настоящее время накоплен богатый экспериментальный материал в исследовании ядерной мультифрагментации. Несмотря на это все еще остается открытым вопрос: можно ли механизм мультифрагментации применить только для ФПМ ( $7 \leq Z \leq 20$ ) или более тяжелые остаточные ядра тоже могут образоваться как остаточные партнеры ФПМ в ядерной мультифрагментации.

Другое важное направление в области ядерных реакций исследуемое в настоящей диссертации это трансмутация продуктов деления и трансурановых элементов, интерес к которым сильно возрос в последнее десятилетие в связи с проблемой утилизации ядерных отходов при работе атомных электростанций. Сделанные различными группами оценки показывают, что при трансмутации всех трансурановых элементов (ТУЭ) радиационный риск, обусловленный их утечкой из глубинного могильника, сравнивается с естественной радиоактивностью урановой руды не через  $5 \cdot 10^6$  лет, как в случае переработанных отходов, а примерно через  $10^3$  лет. Но при этом увеличивается обращение с ТУЭ на всех этапах топливного цикла [6].

Оценки радиационной опасности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) показывают, что после выделения актиноидов уран-плутониевого ряда и продуктов деления типа  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , главным источником воздействия на население остаются  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$ . При этом среди актиноидов наибольший вклад в радиоактивность дает  $^{241}\text{Am}$ . Опасность от  $^{237}\text{Np}$  заключается во первых в том, что, по массе этот элемент преобладает в ОЯТ, а во вторых у  $^{237}\text{Np}$  повышенная миграционная способность в биосфере, по сравнению с другими актиноидами, что приводит к большой вероятности попадания его в организм человека по пищевым цепочкам. Среди продуктов деления ОЯТ  $^{129}\text{I}$  тоже обладает повышенной миграционной способностью.

Несомненно, экспериментально полученные поперечные сечения образования ядер продуктов в радиоактивных мишенях  $^{129}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  имеют важное значение для проектов сжигания трансурановых отходов на прямом протонном пучке.

**Цель и задачи работы** формулируются следующим образом:

1. Исследование сечений образования и кинематических характеристик остаточных ядер в реакциях протонов и дейтронов с разделенными изотопами олова с целью определения механизма образования продуктов в массовой области ( $40 \leq A \leq 80$ ).
2. Исследование сечений образования выходов остаточных ядер в реакциях протонов с радиоактивными ядрами с целью систематизации и планирования трансмутации радиоактивных отходов.
3. Развитие современных спектроскопических методик для решения поставленных задач, автоматизации эксперимента и обработки данных.

**Научная новизна:**

Усовершенствована и автоматизирована методика идентификации и определения сечений образования короткоживущих  $\beta$ -нестабильных продуктов ядерных реакций методом наведенной активности.

Разработана методика расчета оптимальных параметров эксперимента по изучению ядер-продуктов находящихся в сложных цепочках распада.

Экспериментально определены сечения образования ядер-продуктов в широкой массовой области  $7 \leq A \leq A_t$  из обогащенных

изотопов олова ( $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ) под действием протонных пучков с энергиями 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ и дейтронового пучка с энергий 3,65 ГэВ/нуклон. Из исследований следует, что легкие продукты образуются в процессе мультифрагментации, которая предполагает фазовый переход «жидкость-туман» происходящий в горячем ядре при бомбардировке его высокоэнергетическими частицами. Сделана оценка вклада механизма мультифрагментации в образовании продуктов в средней массовой области.

Получены новые результаты кинематических характеристик ядер-отдачи в реакциях на  $^{118}\text{Sn}$  под действием протонов и дейтронов с энергиями 3.65 ГэВ/нуклон. Сравнение передаваемых продольных импульсов на нуклоне указывает на более эффективную передачу импульсов протонами, чем дейтронами. Анализ этих экспериментальных результатов также указывает на вклад механизма мультифрагментации в образование лёгких и среднетяжелых продуктов.

Получены новые данные о процессах  $(p, xn)$ ,  $(p, pxn)$ ,  $(d, xn)$  и  $(d, pxn)$  при  $1 \leq x \leq 14$  на обогащенных изотопах олова  $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$  при энергиях 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ/нуклон. Исследован характер изменений сечений реакций  $(p, xn)$ ,  $(p, pxn)$  в области энергий 1-8.1 ГэВ.

Исследованы изомерные отношения 20 ядер-остатков из разделенных изотопов  $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$ . Из полученных результатов следует, что характер изменений изомерных отношений сечений в зависимости от числа испущенных мишенью нейтронов обусловлен присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова (испарение нейтронов с поверхности ядра), а также тем, что наряду с каскадно-испарительным процессом существует процесс поглощения отрицательных вторичных пионов поверхностными квазидейтронами  $\pi^- + d \rightarrow n + n$ .

Впервые найдены сечения образования  $\sim 70$  остаточных ядер из каждой радиоактивной мишени  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{129}\text{I}$ , соответственно, при облучении протонами с энергией 660 МэВ. Сделана оценка эффективности трансмутации на прямом пучке протонов.

#### Научная и практическая ценность:

Исследование явления ядерной мультифрагментации не ограничивается сугубо областью ядерной физики, а находит свое

применение в астрофизике и космологии. Привлекает особое внимание существенное подобие термодинамических характеристик (температура, плотность, изоспиновая асимметрия) наблюдаемых при ядерной мультифрагментации и при сжатии/вспышке массивных звезд. Данный факт, в свою очередь, открывает широкую возможность для использования хорошо известных моделей ядерных реакций при описании распределения и эволюции материи во время взрыва суперновой.

Полученные в этой работе экспериментальные данные могут быть использованы для формирования библиотек ядерных данных (EXFOR, NSR).

#### На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Усовершенствована и автоматизирована методика идентификации и определения сечений образования короткоживущих  $\beta$ -нестабильных продуктов ядерных реакций методом наведенной активности.
2. Разработана методика для расчета оптимальных параметров эксперимента по изучению ядер-продуктов находящихся в сложных цепочках распада.
3. Получены новые экспериментальные данные о процессах  $(p, xn)$ ,  $(p, pxn)$ ,  $(d, xn)$  и  $(d, pxn)$  при  $1 \leq x \leq 14$  на обогащенных изотопах олова  $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$  при энергиях 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ/нуклон. Анализ энергетических зависимостей этих выходов указывает на наличие вкладов в выходы измеряемых остаточных продуктов канала с образованием пионов.
4. Исследованы изомерные отношения  $\approx 20$  ядер-остатков из разделенных изотопов  $^{112}, ^{118}, ^{120}, ^{124}\text{Sn}$ , из которых для 10 пар продуктов ( $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Tc}$ ) – новые данные. Из полученных результатов следует, что характер изменения изомерных отношений сечений, в зависимости от числа испущенных мишенью нейтронов, обусловлен присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова (испарение нейтронов с поверхности ядра), а также тем, что наряду с каскадно-испарительным процессом существует процесс поглощения

отрицательных вторичных пионов поверхностными квазидейтронами ( $\pi^- + d \rightarrow n + n$ ).

5. Получены сечения образования ядер продуктов в широкой массовой области из обогащенных изотопов олова ( $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ) под действием протонов и дейтронов. Из исследований следует, что легкие продукты реакции образуются в процессе мультифрагментации, которая предполагает фазовый переход жидкость-газ происходящий в горячем ядре при бомбардировки его высокоэнергетическими частицами. Впервые оценен вклад механизма мультифрагментации в образовании продуктов реакции в массовой области  $40 < A < 80$ .

6. Получены новые результаты кинематических характеристик ядер-отдачи в реакциях на  $^{118}\text{Sn}$  под действием протонов и дейтронов с энергиями 3.65 ГэВ/нуклон. Сравнение передаваемых продольных импульсов на нуклоне указывает на более эффективную передачу импульсов протонами, чем дейтронами. Анализ этих экспериментальных результатов также указывает на вклад механизма мультифрагментации в образование лёгких и среднетяжелых продуктов.

7. В диссертации впервые получены сечения образования  $\approx 70$  остаточных ядер из каждой радиоактивной мишени  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$ , соответственно, при облучении протонов с энергией 660 МэВ. Сделана оценка эффективности трансмутации на прямом пучке протонов.

#### Апробация работы:

Результаты представленные в диссертации, многократно докладывались на семинарах в отделе НЭОЯС и РХ Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна), в Ереванском государственном университете, Ереванском институте физики, на международных конференциях по структуре атомного ядра (1997—2007гг), на XXV международном коллоквиуме «Теоретика групповые методы в физике» (Мексика 2004г.)

#### Публикации:

Основные результаты исследований представлены в 15 работах, опубликованных в реферируемых журналах. В целом, по материалам исследований представленных в диссертации, опубликовано 20 работ.

#### Структура и объем диссертации:

Диссертация написана на основе двадцати работ, состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 206 страниц, включая 57 рисунков, 34 таблицы и список литературы из 193 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность выполненной работы. Кратко изложено состояние теоретических и экспериментальных исследований механизма мультифрагментации. Сформулирована цель диссертации и приведено ее краткое содержание.

Первая глава посвящена методике эксперимента. Исследование продуктов реакций расщепления, деления или фрагментации активационным методом как правило связано с трудностями обработки большого массива спектрометрического материала. На основе накопленного опыта по исследованию сечений ядерных реакций глубокого расщепления и фрагментации была усовершенствована методика обработки экспериментальных данных и создана автоматизированная система программ, позволяющая существенно повысить точность и эффективность обработки, что в свою очередь способствует решению поставленной задачи.

В таблице 1 приведен выход пакета программ, определяющей сечения образования ядер остатков из мишени олова ( $^{118}\text{Sn}$ ) в эксперименте проведенном в рамках данной работы. В таблице приведены средневзвешенные значения сечений некоторых ядер остатков и их погрешности – статистические (internal) и из разброса (external).

При расчете сечений образования остаточных ядер учитывалось, что спектрометрический тракт, как правило, имеет

определенное «мертвое» время, в течение которого излучение не регистрируется, площадь пика полного поглощения  $\gamma$ -квантов оказывается заниженной по сравнению с действительной. Особенно заметным это становится при больших нагрузках, в частности, при измерении «горячих» радиоактивных мишеней. Поэтому в формуле сечения образования остаточных ядер этот эффект был учтен умножением площади пика полного поглощения на множитель  $\frac{t_r}{t_l}$ ,

где  $t_r$  - реальное время измерения, а  $t_l$  - живое время измерения.

В данной работе был рассмотрен распад генетически связанных ядер и определены независимые сечения образования этих ядер. Определен параметр оптимизации эксперимента, в котором методом наведенной активности исследуются спектры остаточных ядер.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию ядерных реакций под действием протонов с энергиями 0,66, 1, 3,65 и 8,1 ГэВ и дейтронов с энергией 3,65 ГэВ/нуклон на разделенных изотопах олова ( $^{112,118,120,124}\text{Sn}$ ).

Получены новые экспериментальные данные о процессах  $(p, xn)$ ,  $(p, pxn)$  при  $1 \leq x \leq 14$  на обогащенных изотопах олова  $^{112, 118, 120, 124}\text{Sn}$  при энергиях 0.66, 1.0, 3.65 и 8.1 ГэВ и  $(d, xn)$ ,  $(d, pxn)$  при 3.65 ГэВ/нуклон. По теоретическим предсказаниям сечения исследуемых реакций практически остаются постоянными, что наблюдается для экспериментальных сечений реакций с вылетом более четырех нейтронов (Рис.1). Для реакций  $(p, 2n)$  (Рис.1а) и  $(p, p2n)$  (Рис.1б) сечения сначала уменьшаются, а потом растут, с ростом энергии, в области выше 1 ГэВ. Указанный рост сечений объясняется наличием вкладов в выходы измеряемых остаточных продуктов канала с образованием пионов. Отношения сечений реакций  $(d, xn)/(p, (x-1)n)$  и  $(d, pxn)/(p, p(x-1)n)$  не согласуются с предсказаниями каскадно-испарительной модели. Экспериментальные значения превышают расчетные в среднем в 1.5-2 раза (Рис.2). Это объясняется тем, что экспериментальные сечения чувствительны к двухнуклонной структуре дейтрона, в то время как теоретические расчеты не полностью учитывают эту структуру.

В работе получены изомерные отношения (отношение сечения образования высокоспиновых состояний ядер к низкоспиновым)  $\sim 20$  остаточных ядер (Таблица 2). Исследование показали, что изомерные отношения сначала растут, а потом остаются постоянными с ростом числа испущенных мишенями нейтронов. На основе полученных данных утверждается, что такое поведение изомерных отношений сечений обусловлено присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова (испарение нейтронов из поверхности ядра), а также тем, что наряду с каскадно-испарительным процессом существует процесс поглощения отрицательных вторичных пионов поверхностными квазидейтронами ( $\pi^- + d \rightarrow n + n$ ).

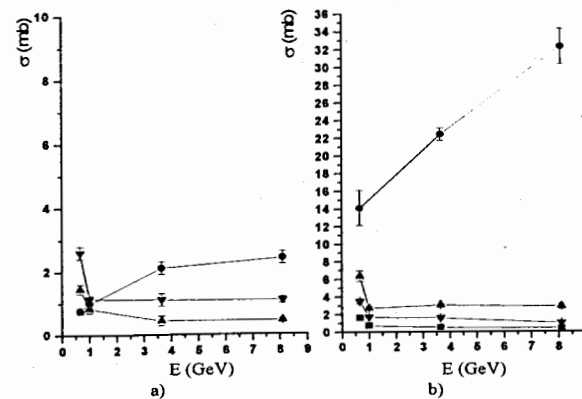


Рис. 1 Зависимость сечения образования ядер остатков от энергии налетающего протона. а)  $^{116m}\text{Sb}$  ● - из мишени  $^{118}\text{Sn}$ ; ▼ - из мишени  $^{120}\text{Sn}$ ; ▲ - из мишени  $^{124}\text{Sn}$ . б)  $^{110}\text{Sn}$  ● - из мишени  $^{112}\text{Sn}$ ; ▲ - из мишени  $^{118}\text{Sn}$ ; ▼ - из мишени  $^{120}\text{Sn}$ ; ■ - из мишени  $^{124}\text{Sn}$ .

В данной работе исследованы также выходы образования остаточных ядер в широкой массовой области продуктов. Наблюдается зависимость этих выходов от третьей проекции изоспинов как остаточных ядер, так и ядер-мишеней. Изоспиновая зависимость имеющихся экспериментальных данных указывает на

скейлинговый характер. В случае мультифрагментации отношение выходов фрагментов образованных из разных мишеней экспоненциально зависит от изотопического спина ядер-продуктов:

$$R_{21} = Y_2(A, Z) / Y_1(A, Z) = \exp(C + B \cdot t_3)$$

где  $Y(N, Z)$  сечение образования фрагмента с  $Z$  протонами и  $N$  нейтронами. Индексы 1 и 2 относятся к двум мишеням с разными изоспиновыми составами, 2 относится к более нейтроноизбыточному источнику.  $C$  и  $B$  подгоночные параметры,  $t_3 = (N-Z)/2$  третья проекция изотопического спина образованного фрагмента.

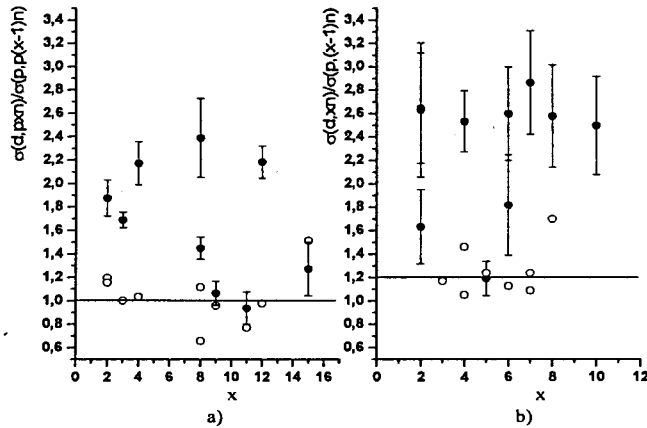


Рис. 2 Зависимость отношения сечений образования остаточных ядер а) дейтрон-ядерных б) протон-ядерных реакций от числа вылетевших нейтронов. ●-Экспериментальные результаты для всех мишеней, ○-теоретические расчеты по каскадно-испарительной модели. Сплошная кривая усреднение по расчетным данным.

Систематизация экспериментальных данных в виде вышеуказанного уравнения соответствует многообразию реакций в широком энергетическом интервале и этот феномен называется изоскейлингом (рис.3). Параметр наклона ( $B$ ) в этой зависимости выражается через различие химических потенциалов двух начальных систем и через

температуру возбужденного ядра одного и того же элемента. На рисунке 4 приведена зависимость параметра  $B$  от разности нейтронного избытка мишени для легких и среднетяжелых остаточных ядер. В таблице 3 приведены значения параметров  $B$  для разных массовых областях фрагментов и для разных пар мишеней. Из таблицы видно, что параметр  $B$  чувствителен к механизму образования продуктов в разных массовых областях. Анализ полученных результатов указывает на то, что легкие продукты образуются в процессе мультифрагментации, которая предполагает фазовый переход жидкость-газ, происходящий в горячем ядре при взаимодействии ядра-мишени с высокоэнергетическими частицами. В массовой области продуктов  $40 \leq A \leq 80$  впервые отмечен вклад механизма мультифрагментации, в то время как ядра продукты, близкие по массам к мишени, образуются в процессе расщепления.

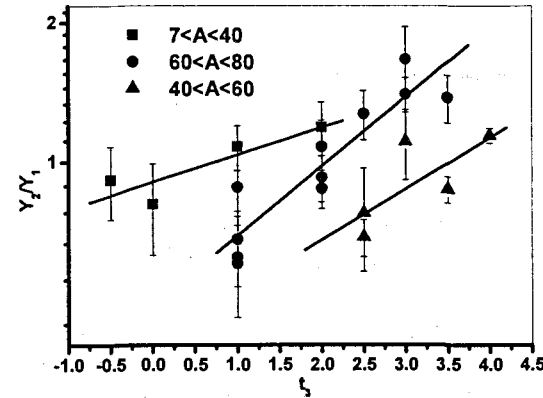


Рис.3 Изоскейлинговая зависимость выходов остаточных ядер.

В работе методом улавливающих фольг в рамках формализма двухступенчатой векторной модели исследованы кинематические характеристики остаточных ядер образованных при взаимодействии протонов и дейтронов с обогащенным изотопом  $^{118}\text{Sn}$  при энергии 3.65 ГэВ/нуклон. Получены кинетические энергии образованных ядер остатков, а также скорости и энергии возбуждения послекаскадного ядра, что дает возможность уточнить механизм образования продуктов реакций. Сделаны сравнение между результатами протон-ядерных и дейтрон-ядерных реакций. Продольный импульс

передаваемый мишени во время взаимодействия протонов и дейтронов указывает на то, что протон является более эффективным агентом передачи импульса, чем дейтрон. Три разные версии Лос-Аламосовской кварк-глюонной струнной модели (LAQGSM03) использованы при обсуждении экспериментальных результатов.

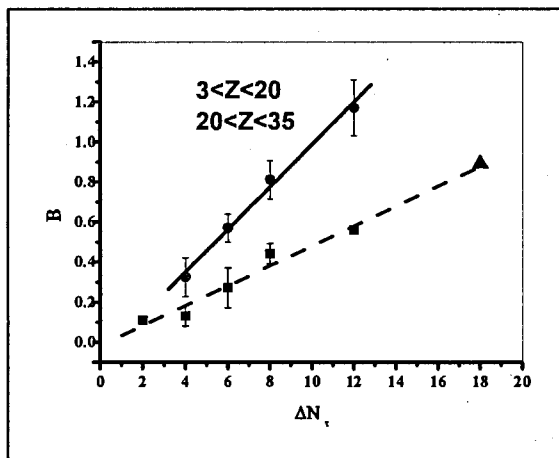


Рис. 4 Зависимость параметра  $B$  от разности нейтронного избытка мишени для разных массовых областей фрагментов. ■-для области фрагментов  $7 \leq A \leq 40$ ; ●-для области продуктов  $40 \leq A \leq 80$ .

На рисунке 5 приведены зависимости продольных передаваемых импульсов от числа вылетевших нуклонов. Изменение наклона в этой зависимости в области  $\Delta A \sim 50$  указывает на изменение механизма образования остаточных ядер. Ядра-остатки в массовой области  $\Delta A \leq 50$  образуются в процессе расщепления, в то время как остаточные ядра в массовой области  $\Delta A > 50$  образуются не только в процессе расщепления, но и по механизму мультифрагментации.

На рисунке 6 приведена зависимость кинетической энергии ядер продуктов от части потерянной массы мишени для протон- и дейтрон-ядерных реакций.

Наблюдается изменение наклона линейной зависимости ( $\Delta A \sim 50$ ) для разных массовых областей продуктов. Это также свидетельствует об изменении механизма образования ядер продуктов в разных массовых областях.



N	E	dE	sig	dsig	sig2	dsig2	id
1	539.509	0.089	8.347E-0027	1.129E-0027	8.348E-0027	1.129E-0027	100Pd(G)
2	539.296	0.153	4.185E-0027	7.297E-0028	4.187E-0027	7.300E-0028	100Pd(G)
3	538.966	0.286	8.014E-0027	2.061E-0027	8.014E-0027	2.061E-0027	100Pd(G)
SS weighted avg=			5.62276E-0027		5.62509E-0027		
SS sigma int =				5.87420E-0028		5.87577E-0028	
1	539.509	0.089	5.724E-0026	7.738E-0027	5.727E-0026	7.742E-0027	100Rh(G)
2	539.296	0.153	6.139E-0024	6.334E-0027	6.141E-0026	6.338E-0027	100Rh(G)
SS weighted avg=			5.86473E-0026		5.86761E-0026		
SS sigma int =				7.73375E-0027		7.73776E-0027	
3	474.410	0.241	1.186E-0026	2.308E-0027	1.186E-0026	2.308E-0027	102Rh(G)
4	475.340	0.232	1.943E-0026	3.059E-0027	1.943E-0026	3.059E-0027	102Rh(G)
5	474.628	0.234	1.200E-0026	1.891E-0027	1.200E-0026	1.891E-0027	102Rh(G)
SS weighted avg=			1.33369E-0026		1.33369E-0026		
SS sigma int =				1.31963E-0027		1.31963E-0027	

Таблица 1 Сечения образования некоторых ядер остатков, полученные пакетом программ.

Остаточное ядро	$R=\sigma_H/\sigma_L$						
	$^{112}\text{Sn}$	$^{118}\text{Sn}$		$^{120}\text{Sn}$		$^{124}\text{Sn}$	
	8.1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ
$^{117}\text{Cd}(11/2^+, 1/2^+)$	-	-	-	1.46±0.41	2.04±0.20	3.15±0.5	3.0±0.45
$^{117}\text{In}(9/2^+, 1/2^-)$	-	2.34±0.5	2.3±0.3	6.00±0.46	2.60±0.47	8.67±2.10	4.05±0.90
$^{116}\text{Sb}(8^-, 3^+)$	-	0.52±0.08	0.56±0.10	1.07±0.19	1.15±0.21	2.17	-
$^{110}\text{In}(7^+, 2^+)$	0.8±0.1	2.30±0.22	3.9±0.4	2.40±0.23	3.1±0.5	2.36±0.25	4.05±0.91
$^{108}\text{In}(6^+, 1^-)$	0.22±0.13	3.1±0.64	2.4±0.35	3.3±0.93	3.7±0.4	2.6±1.39	3.65±0.88
$^{104}\text{Ag}(5^+, 2^+)$	1.26±0.15	2.35±0.35	3.27±0.62	2.75±0.25	2.45±0.32	2.80±0.39	3.66±0.86
$^{102}\text{Rh}(6^+, 2^-)$	2.61±0.3	2.30±0.75	3.00±1.06	2.47±0.33	-	2.72±0.60	-
$^{101}\text{Rh}(9/2^+, 1/2^-)$	2.98±0.44 <sup>a</sup>	1.22±0.24	1.20±0.23	1.93±0.29	1.8±0.3	1.38±0.23	1.38±0.25
$^{99}\text{Rh}(9/2^+, 1/2^-)$	4.97±0.80	4.8±1.1	6.15±1.10	4.23±0.64	3.5±0.5	6.6±0.9	5.44±1.25
$^{95}\text{Tc}(9/2^+, 1/2^-)$	8.34±1.49	8.40±0.96	7.90±0.63	11.19±0.9	8.6±0.9	12.50±1.87	11.37±1.30
$^{95}\text{Nb}(9/2^+, 1/2^-)$	0.65±0.12	1.20±0.25	0.82±0.16	-	-	-	0.96±0.17 <sup>a</sup>

Таблица 2. Изомерные отношения ядер-остатков.

Остаточное ядро	$R=\sigma_H/\sigma_L$						
	$^{112}\text{Sn}$	$^{118}\text{Sn}$		$^{120}\text{Sn}$		$^{124}\text{Sn}$	
	8.1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ	8.1ГэВ	1 ГэВ
$^{94}\text{Tc}(7^+, 2^+)$	4.70±0.73	6.55±0.80	5.1±1.1	7.5±1.3	8.4±1.8	11.4±1.6	12.0±3.4
$^{93}\text{Tc}(9/2^+, 1/2^-)$	-	4.30±1.46	-	-	7.67±1.53	-	-
$^{87}\text{Y}(9/2^+, 1/2^-)$	-	1.7±0.3	1.80±0.27	3.55±0.53	3.40±0.76	2.87±0.52	-
$^{86}\text{Y}(8^+, 4^-)$	3.00±0.43	2.1±0.3	3.1±0.5	2.59±0.30	2.95±0.40	2.7±0.4	2.70±0.82
$^{84}\text{Rb}(6^-, 2^-)$	-	0.83±0.35	-	0.96±0.14	-	1.28±0.13	-
$^{52}\text{Mn}(6^+, 2^+)$	-	4.24±0.71	-	-	-	-	-
$^{44}\text{Sc}(6^+, 2^+)$	1.77±0.45	2.1±0.5	-	2.10±0.41	-	2.0±0.6	-

Продолжение Таблицы 2.

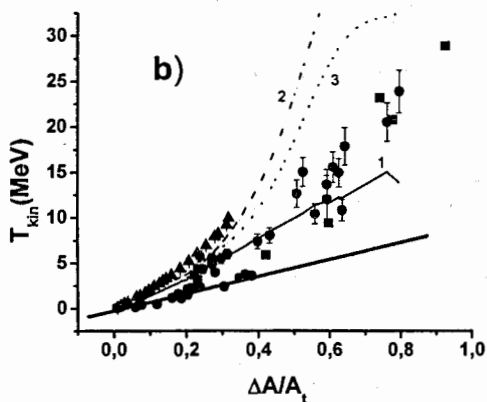
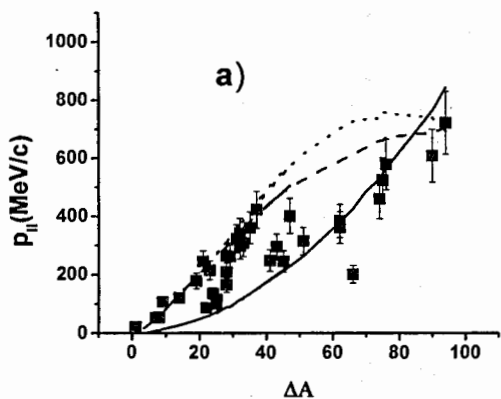


Рис. 5 Зависимость продольного передаваемого импульса от числа вылетевших нуклонов  $\Delta A_i$ : а) для дейтрон-ядерных реакций б) для протон-ядерных реакций ( $\bullet$ ). Сплошная линия есть расчеты по модели LAQGSM03.01, пунктирная линия - расчеты по модели LAQGSM03.S1, и точечная линия - расчеты по модели LAQGSM03.G1.

Параметр  $B$  ( $E_p=3.65$  ГэВ)

Ядра-продукты	$\Delta N=2$	$\Delta N=4$	$\Delta N=6$	$\Delta N=8$	$\Delta N=12$
$7 \leq A \leq 30$	$0.19 \pm 0.03$	$0.27 \pm 0.06$	$0.23 \pm 0.03$	$0.44 \pm 0.10$	$0.51 \pm 0.04$
$40 \leq A \leq 60$	$0.11 \pm 0.03$	$0.34 \pm 0.05$	$0.41 \pm 0.04$	$0.56 \pm 0.04$	$0.85 \pm 0.04$
$60 \leq A \leq 80$	$0.18 \pm 0.05$	$0.25 \pm 0.13$	$0.36 \pm 0.09$	$0.51 \pm 0.10$	$0.78 \pm 0.21$
$^{81-86}\text{Rb}$	$0.25 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.04$	$0.66 \pm 0.02$	$0.62 \pm 0.15$	$0.94 \pm 0.20$
$^{93-96}\text{Tc}$	$0.24 \pm 0.07$	$0.22 \pm 0.08$	$0.46 \pm 0.15$	$0.85 \pm 0.25$	$1.07 \pm 0.32$

Параметр  $B$  ( $E_d=3.65$  ГэВ/нуклон)

Ядра-продукты	$\Delta N=4$	$\Delta N=6$	$\Delta N=8$	$\Delta N=12$
$7 \leq A \leq 30$	$0.27 \pm 0.05$	$0.26 \pm 0.05$	$0.28 \pm 0.12$	$0.55 \pm 0.07$
$40 \leq A \leq 60$	$0.38 \pm 0.10$	$0.41 \pm 0.09$	$0.41 \pm 0.10$	$0.78 \pm 0.14$
$60 \leq A \leq 80$	$0.19 \pm 0.07$	$0.50 \pm 0.10$	$0.57 \pm 0.14$	$0.77 \pm 0.19$
$^{81-86}\text{Rb}$	$0.30 \pm 0.08$	-	$0.87 \pm 0.22$	$1.17 \pm 0.29$

Таблица 3. Значения параметров  $B$  для разных массовых областей продуктов.

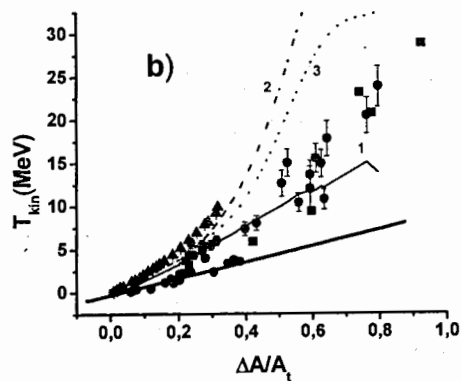
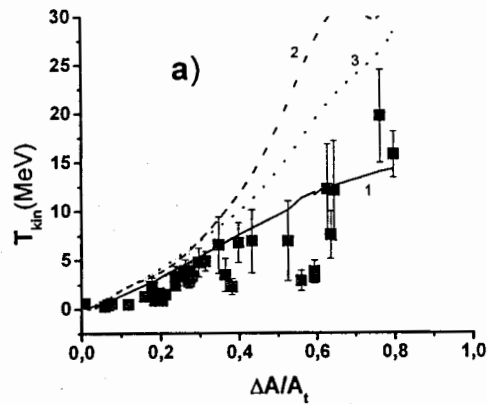


Рис. 6 Зависимость кинетической энергии ядер продуктов от части потери масс  $\Delta A/A_t$ : а) для дейтрон-ядерных реакций б) для протон-ядерных реакций (●). Для сравнения, ! указывают экспериментальные результаты для мишени Ag, а, 7 указывают экспериментальные результаты для мишени Pb приведенных в литературе. Сплошная линия (1) есть расчеты по модели LAQGSM03.01, пунктирная линия (2)- расчеты по модели LAQGSM03.S1, и точечная линия (3) - расчеты по модели LAQGSM03.G1. Толстая сплошная линия есть линейная подгонка экспериментальных данных для ядер остатков в массовой области  $A > 80$ .

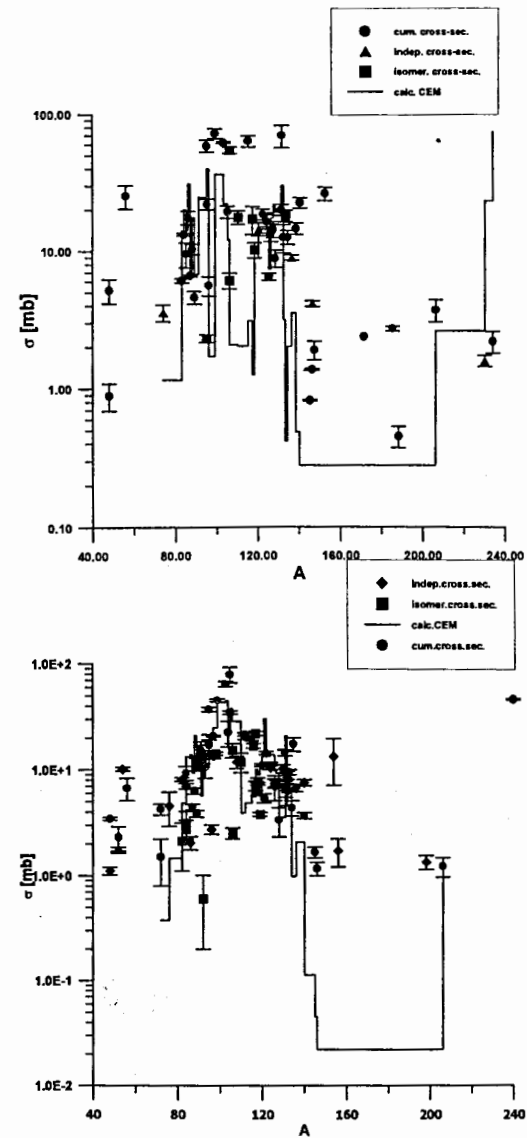


Рис.7 Зависимость сечений образования остаточных ядер от массового числа для мишеней  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

**В основу третьей главы** легли работы посвященные исследованию ядерных реакций под действием протонов с энергией 660 МэВ на радиоактивных ядрах  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . Важность этих исследований заключается в том, что для моделирования процесса трансмутации радиоактивных отходов образованных вследствие работы атомных реакторов, необходимо увеличить имеющуюся базу экспериментальных данных взаимодействий частиц как с трансурановыми элементами, так и с продуктами деления. С другой стороны стоит важный вопрос оценки эффективности сжигания радиоактивных отходов на разных пучках частиц при разных энергиях.

Впервые получены 74, 80 и 53 сечения образования остаточных ядер из  $^{129}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$ , соответственно. На Рис.7 приведены сечения образования остаточных ядер из мишеней  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  в зависимости от массового числа продуктов, и их сравнение с теоретическими расчетами, сделанными по каскадно-испарительной модели. Используя полученные сечения можно оценить эффективность трансмутации  $^{129}\text{I}$  в прямом пучке протонов. Поскольку суммарное сечение всех измеренных в работе ядер-продуктов составляет 470 мб, то учитывая стабильные продукты, также как и продукты, которые по энергиям  $\gamma$ -линий или периодам полураспада находятся вне рабочего диапазона спектрометра, можно предположить, что полное сечение реакции  $^{129}\text{I}(p,xn)$  составляет величину  $\sim 1$  барн. Тогда, при облучении в мишени ускорительно-бланкетной системы в течение месяца при токе протонов 10 мА, что вполне достижимо, произойдет <<выжигание>> 5% (20 мг) этого изотопа. Полученные экспериментальные результаты дают возможность оценить время, после которого трансмутация становится эффективной. Понятно, что образование короткоживущих изотопов приводит к увеличению активности мишени  $^{129}\text{I}$ . Если пересчитать полученные данные на ток протонов 10 мА и длительность облучения один месяц, то активность мишени увеличится от  $0.293 \cdot 10^7$  распад/с до  $9.8 \cdot 10^{12}$  распад/с. Однако, через 10 лет активность мишени уменьшится и составит  $0.466 \cdot 10^7$ , а через 20 лет уменьшится на порядок. Через 50 лет активность мишени составит  $2.5 \cdot 10^2$  распад/с. Таким образом, использование  $^{129}\text{I}$  в качестве компонента мишени подкритической системы может способствовать решению проблемы утилизации этого долгоживущего радиотоксичного осколка деления,

образующегося в больших количествах при работе атомных электростанций.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Развита методика идентификации и определения сечений образования короткоживущих  $\beta$ -нестабильных продуктов ядерных реакций методом наведенной активности. Автоматизирован процесс обработки экспериментальных данных.
- Разработана методика определения оптимальных параметров эксперимента по изучению ядер-продуктов находящихся в сложных цепочках распада.
- Впервые экспериментально исследованы процессы  $(p,xn)$ ,  $(p,pxn)$ ,  $(d,xn)$  и  $(d,pxn)$  на обогащенных изотопах олова  $^{112, 118, 120, 124}\text{Sn}$  при энергиях начального пучка 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ/нуклон. Изучены механизмы этих реакций.
- Впервые исследованы изомерные отношения  $\sim 10$  ядер-остатков ( $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{93,94,95}\text{Tc}$ ) из разделенных изотопов  $^{112,118,120,124}\text{Sn}$  и получена зависимость этих отношений от структуры ядер остатков.
- Исследован характер изменения изомерных отношений сечений от числа испущенных мишенями нейтронов и показано, что результат (выход на плато) обусловлен присутствием нейтронного гало в тяжелых изотопах олова и процессом поглощения отрицательных вторичных пионов поверхностными квазидейтронами ( $\pi^- + d \rightarrow n + n$ ).
- Получены новые экспериментальные данные по сечениям образования ядер продуктов в массовой области  $7 \leq A \leq A_1$  из обогащенных изотопов олова ( $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ) под действием протонов с энергиями 0.6, 1.0, 3.65, 8.1 ГэВ и дейтронов с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.
- Впервые экспериментально исследованы кинематические характеристики ядер-отдачи в реакциях на  $^{118}\text{Sn}$  под действием протонов и дейтронов с энергиями 3.65 ГэВ/нуклон
- Впервые был оценен вклад механизма мультифрагментации в образование продуктов в массовой области  $40 \leq A \leq 80$ .
- Впервые исследовано явление изоскейлинга для разных массовых областях фрагментов ( $7 \leq A \leq 40$ ,  $40 \leq A \leq 80$ ,  $81 \leq A$

$\leq 100$ ) и для разных пар мишеней. Показано, что параметр изоскейлинга (В) чувствителен к механизму образования фрагментов.

- Впервые получены сечения образования  $\approx 70$  остаточных ядер из каждой радиоактивной мишени  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$ , соответственно, при облучении протонов с энергией 660 МэВ. Сделана оценка эффективности трансмутации на прямом пучке протонов.

**Результаты, включенные в диссертацию,  
опубликованы в следующих работах:**

1. В.Э.Александрян, Г.С.Айвазян, А.Р.Балабекян, А.С.Данагулян, В.Г.Калинников, В.И.Стегайлов, Я.Франа *Исследование изомерных отношений сечений протон-ядерных реакций на изотопах олова*. Ядерная Физика **59** 21-25 (1996).
2. А.С.Данагулян, Л.Г.Мартиросян, Н.С.Амелин, А.Р.Балабекян, В.Г.Калинников, В.И.Стегайлов, Я.Франа *Исследование реакций  $(p, xn)$ ;  $(p, pxn)$  и  $(p, 2p)$  на изотопах олова*. Ядерная Физика **60**, 965-969, (1997).
3. А.С.Данагулян, И.Адам, А.Р.Балабекян, В.Г.Калинников, В.К.Родионов, В.И.Стегайлов, В.И.Фоминых, Я.Франа *Образование легких ядер в реакциях протонов с разделенными изотопами олова*. Ядерная Физика **63**, р. 204-208 (2000).
4. V.Aleksandryan, J.Adam, A.Balabekyan, A.S.Danagulyan, V.G.Kalinnikov, G.Musulmanbekov, V.K.Rodionov, V.I.Stegailov, J.Frana *Formation of residual nuclei with medium mass number in the reaction of protons with separated tin isotopes* Nuclear Physics V.**A674/3-4**, P.539-549, 2000.
5. И.Адам, Я.Мразек, Я.Франа, А.Р.Балабекян, В.С.Пронских, В.Г.Калинников, А.Н.Приемышев *Комплекс программ для автоматизированного расчета сечений ядерных реакций*. Измерительная Техника **1**, 57-61 (2001).

6. J.Adam, J.Mrazek, J. Frana, V.S.Pronskikh, A.Balabekyan, V.G.Kalinnikov, A.N.Priemishev, *Software for calculating nuclear reaction cross sections* Measurement Technique **44**(1); 93-100 Jan-Feb 2001.

7. J.Adam, A.Balabekyan R.Brandt, V.P.Dzhelepov, S.A.Gustov, V.G.Kalinnikov, M.I.Krivopustov, I.V.Mirokhin, J.Mrazek, R.Odoj, V.S.Pronskikh, O.V.Savchenko, A.N.Sosnin, A.A.Solnishkin, V.I.Stegailov, V.M.Tsoupko-Sitnikov, *Investigation of the formation of residual nuclei induced by 660 MeV protons interacting with the radioactive  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{129}\text{I}$  targets*. Journal of nuclear science and technology V.1 p.272 (2001) (Proceedings of the international conference on nuclear data for science and technology, October 7-12, 2001, Japan). (Abstr PAP AM ChEM S 221; 126-NUCL Part 2 APR 1 2001).

8. J.Adam, A.Balabekyan, V.S.Pronskikh, V.G.Kalinnikov and J.Mrazek *Determination of the cross section for nuclear reactions in complex nuclear decay chains*. Applied Radiation and Isotopes **56/4**, 607-613 (2002).

9. В.Э.Александрян, И.Адам, А.Р.Балабекян, А.С.Данагулян, В.Г.Калинников, М.И.Кривоустов Ж.Мусульманбеков *Изомерные отношения сечений реакции  $\text{Sn}(p, xpun)X$*  Ядерная Физика **65** N5 p.776-784 (2002).

10. J.Adam, A.Balabekyan R.Brandt V.P.Dzhelepov, S.A.Gustov, V.G.Kalinnikov, M.I.Krivopustov, I.V.Mirokhin, J.Mrazek, R.Odoj, V.S.Pronskikh, O.V.Savchenko, A.N.Sosnin, A.A.Solnishkin, V.I.Stegailov, V.M.Tsoupko-Sitnikov, *Investigation of the formation of residual nuclei from the radioactive  $^{237}\text{Np}$  and  $^{241}\text{Am}$  targets in the reaction with 660 MeV protons* Ядерная Физика **65** N5 p.797-809 (2002).

11. V.S.Pronskikh, J.Adam, A.Balabekyan, R.Brandt V.P.Dzhelepov, S.A.Gustov, V.G.Kalinnikov, M.I.Krivopustov, I.V.Mirokhin, J.Mrazek, R.Odoj, O.V.Savchenko, A.N.Sosnin, A.A.Solnishkin, V.I.Stegailov, V.M.Tsoupko-Sitnikov, *Study of proton-induced reactions in a radioactive  $^{129}\text{I}$  target at  $E_p=660$  MeV*. Workshop on Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste. GSI-Darmstadt, September 1-5, 2003, ISBN 3-00-012276-1, P001.

12. И.Адам, А.Балабекян, В.С.Барашенков, В.П.Джелепов, С.А.Густов, В.П.Филинова, В.Г.Калинников, М.И.Кривоустов, И.В.Мирохин, В.С.Пронских, А.А.Солнышкин, В.И.Стегайлов, В.М.Цупко-Ситников, Я.Мразек, Р.Брандт, В.Вестмайер, Р.Одой, С.Г.Машник, Р.И.Праел, К.К.Гудима, М.И.Базнат *Исследование образования продуктов протон-ядерных реакций в мишени  $^{129}\text{I}$  при энергии протонов 660 МэВ* Письма в ЭЧАЯ V.1, 4(121) p. 53-64 (2004).

13. A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan, J.Drnoyan, N.A.Demekhina, J.Adam, V.G.Kalinnikov, G.Musulmanbekov. *Isotope effect in fragment-yields observed in p+isotopes Sn inclusive reactions.* Nuclear Physics A 735/1-2 p.267-276 (2004).

14. А.Р.Балабекян, А.С.Данагулян, Д.Р.Дрноян, Н.А.Демехина, И.Адам, В.Г.Калинников, М.И.Кривоустов, В.С.Пронских, В.И.Стегайлов, А.А.Солнышкин, П.Чалоун, В.М.Цупко-Ситников, Ж.Мусульманбеков *Исследование реакций расщепления на  $^{120}\text{Sn}$  и реакций ( $d, xn$ ), ( $d, pxn$ ), ( $p, xn$ ), и ( $p, pxn$ ) на обогащенных изотопах олова.* Ядерная Физика 68, 195-200 (2005).

15. И.Адам, А.Балабекян, В.С.Барашенков, В.П.Филинова, В.Г.Калинников, М.И.Кривоустов, В.С.Пронских, А.А.Солнышкин, В.И.Стегайлов, В.М.Цупко-Ситников, Р.Брандт, В.Вестмайер, Р.Одой, С.Г.Машник, Р.И.Праел, К.К.Гудима, М.И.Базнат, J.Adam, *Сравнение сечений образования остаточных ядер в мишенях  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$  при энергии протонов 660 МэВ с модельными расчетами.* Письма в ЭЧАЯ V.2, 6(129) p.25-39 (2005).

16. A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan, J.R.Drnoyan, G.N.Hovhannisyan, J.Adam, V.G.Kalinnikov, M.I.Krivopustov, V.S.Pronskikh, V.I.Stegailov, A.A.Solnishkin, P.Chaloun, V.M.Tsoupko-Sitnikov, S.G.Mashnik, K.K.Gudima. *Formation of Light Isotopes by Protons and Deuterons of 3.65 GeV/nucleon on Separated Tin Isotopes.* Ядерная Физика 69 N9 p.1-11 (2006).

17. А.Р.Балабекян *Систематизация выходов продуктов фотоядерных реакций из разделенных мишеней Ni и Cu* Известия АН РА серия Физика 41 N6, 445-449 (2006).

18. А.Р.Балабекян *Сравнение кинематических характеристик ядер-отдачи образованных из мишени  $^{65}\text{Cu}$  с теоретическими расчетами.* Ученые Записки ЕГУ 3, 36-39 (2006).

19. А.Р.Балабекян *Некоторые поправки на сечения остаточных ядер, образовавшихся при облучении обогащенных мишеней олова пучком ионов  $^{12}\text{C}$  с энергией 2.2 ГэВ/нуклон.* Ученые Записки ЕГУ 2, 70-73 (2006).

20. A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan, J.R.Drnoyan, G. Hovhannisyan, N.A.Demekhina, J.Adam, V.G.Kalinnikov, M.I.Krivopustov, V.S.Pronskikh, V.I.Stegailov, A.A.Solnishkin, P.Chaloun, V.M.Tsoupko-Sitnikov, S.G.Mashnik, K.K.Gudima. *Recoil Products from  $p+^{118}\text{Sn}$  and  $d+^{118}\text{Sn}$  at 3.65 GeV/A.* Ядерная Физика 70 N11 1-9 (2007).

#### Цитированная литература:

1. В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев *Взаимодействие высокоэнергичных частиц и атомных ядер с ядрами.* Атомиздат, Москва, 1972г.
2. Ю.П.Яковлев *Фрагментация ядер под действием частиц и ядер промежуточных и высоких энергий.* ЭЧАЯ, 14(6), 1285 (1983)
3. V.Jacobsson, G.Jönsson, B.Lindkvist and A.Oskarsson *The disintegration of nuclei in violent heavy ion interactions at 55A MeV-110A MeV.* Z.Phys. A (Physics and Astronomy) 307, 293 (1982).
4. J.P. Bondorf, A.S. Botvina, A.S. Iljinov, I.N. Mishustin, K.Sneppen, *Statistical Multifragmentation of Nuclei* Phys. Rep. 257, 133 (1995). A.S.Botvina et.al., *Multifragmentation of spectators in relativistic heavy ion reactions* Nucl.Phys. A584, 737 (1995).
5. V.A.Karnaukhov *Nuclear multifragmentation and phase transitions in hot nuclei* ЭЧАЯ 37, вып.2, 312-363 (2006)
6. Ю.П.Сивинцев *Атомная техника за рубежом* 2,1,11,3 (1992); А.С.Никифоров и др. *Атомная Энергия* 70, 188 (1991).

Получено 21 января 2009 г.