

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.07
539.172.17

7-88-181

ЛУКЬЯНОВ

Сергей Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОВЫХ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
С ПОМОЩЬЮ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО СПЕКТРОМЕТРА
УСТАНОВКИ ДЭМАС

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц .

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ПЕНИОНЖКЕВИЧ Д.Э.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ДЖОЛОС Р.В.

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ИТКИС М.Г.

Ведущее предприятие:

Радионейтральный институт имени В.Г.Хлопина, Ленинград

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1988 года

в " _____ " час на заседании Специализированного совета Д.047.01.05
при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ
(г.Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1988 года.

Ученый секретарь Специализированного совета

ТАРАН Д.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

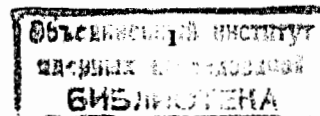
Реакции под действием тяжелых ионов отличаются большим многообразием процессов взаимодействия. Изучение этих процессов является одной из актуальных проблем, входящих в научные программы многих лабораторий мира. Большой прогресс в области ускорительной техники и методики эксперимента позволяет значительно расширить экспериментальную информацию о процессах взаимодействия тяжелых ионов со сложными ядрами, что способствует углублению наших представлений о свойствах ядерной материи ^{1/a/}. С этой точки зрения важны результаты, извлекаемые из экспериментальных данных о характеристиках продуктов ядерных реакций.

При взаимодействии тяжелых ионов с массами $M \geq 40$ со сложными ядрами возрастает вклад процессов, протекающих без стадии образования составного ядра, например, глубоконеупругих передач, быстрого деления. Исследование характеристик этих процессов представляет интерес как с точки зрения получения информации о механизме и динамике происходящего процесса, так и с точки зрения использования возможностей реакций слияния с этими ядрами для синтеза новых элементов.

Важную роль в формировании продуктов реакций с тяжелыми ионами могут играть оболочечные эффекты. Если влияние оболочек на формирование осколков деления составного ядра детально изучено, то практически до настоящего времени не предпринимались исследования влияния оболочечных структур на формирование продуктов в других каналах ядерных реакций.

Цель работы

I. Разработка методики прецизионного измерения характеристик коррелированных продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами.



2. Измерение массовых и энергетических распределений продуктов реакций, вызванных тяжелыми ионами с массами $M \geq 40$, на различных ядрах мишеней с $M > 100$ при энергиях вблизи барьера взаимодействия ($E/V_c < 1.5$).

3. Выявление особенностей, связанных с оболочечными эффектами, в масс-энергетических распределениях продуктов различных каналов ядерных реакций, протекающих без стадии образования компаунд-ядра.

Научная новизна

Создан прецизионный спектрометр для исследований с высокой разрешающей способностью массовых ($\Delta M = \pm 1,5$ а.е.м.), энергетических ($\Delta E \approx 50$ кэВ), угловых ($\pm 0,5^\circ$) распределений продуктов взаимодействия тяжелых ионов со сложными ядрами.

Проведены систематические исследования массовых и энергетических распределений продуктов взаимодействия ядер ускоренных ионов неона, аргона, серы, цинка с различными ядрами-мишенями с Z от 47 до 97 при различных энергиях вблизи барьеров взаимодействия.

Наблюдены асимметричные массовые распределения продуктов реакций, приводящих к образованию составных систем с $Z = 108-110$, при энергиях налетающих ионов с массами $M \sim 40$ вблизи барьера взаимодействия. В реакциях с ионами Zn на мишенях из ядер изотопов олова наблюдается повышенный выход мишенеподобных продуктов со значениями полной кинетической энергии ТКЕ, меньшими входного кулоновского барьера V_c . Впервые наблюдаются структуры в масс-энергетических распределениях продуктов реакций ^{40}Ar (220 МэВ) + ^{nat}Ag , $^{114,124}\text{Sn}$, ^{139}La , ^{197}Au .

Проведен анализ структурных особенностей в массовых и масс-энергетических распределениях продуктов исследуемых реакций с помощью расчетов потенциальной энергии двух взаимодействующих ядер с учетом оболочечных поправок.

Практическая ценность работы

Созданная экспериментальная методика может быть использована для прецизионных измерений массовых, энергетических и угловых распределений продуктов реакций под действием заряженных частиц, нейтронов, гамма-лучей со сложными ядрами с целью исследования механизма и динамики взаимодействия.

Разработанные детекторы для получения временных отметок (лавинные счетчики и стартовые детекторы на основе микроканальных пластин), а также широкоапертурные позиционно-чувствительные ионизационные камеры могут быть использованы при разработке и создании новых экспери-

ментальных установок для исследования реакций под действием заряженных или нейтральных частиц с ядрами. Созданные детекторы нашли свое применение в других научных центрах (Центральный институт ядерных исследований АН ГДР, Россендорф; Национальная лаборатория тяжелых ионов, Франция), а также применяются для диагностики пучков ускоренных заряженных частиц, в частности, для измерения профиля и энергии.

Полученные экспериментальные результаты о структурных особенностях в массовых и масс-энергетических распределениях могут быть использованы и уже используются в теоретических исследованиях механизма ядерных реакций.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Созданный прецизионный двухплечевой времяпролетный спектрометр является эффективным прибором для исследования взаимодействия тяжелых ионов со сложными ядрами.

2. Использование двухплечевого времяпролетного спектрометра позволяет проводить измерения энергий (с разрешением ~ 50 кэВ), скоростей ($\Delta v/v \sim 0,5\%$), масс (с разрешением $\Delta M = \pm 1,5$ а.е.м.) продуктов реакций с тяжелыми ионами.

3. Механизм взаимодействия двух сложных ядер зависит от массовой асимметрии входного канала. Имеется также зависимость массового дрейфа для продуктов глубоконеупругих передач от массовой асимметрии входного канала.

4. Обнаружение асимметричных массовых распределений продуктов реакций, приводящих к образованию составных систем с $Z = 108-110$, при энергиях налетающих ионов с массами $M \sim 40$ вблизи барьера взаимодействия.

5. Наблюдение повышенного выхода продуктов глубоконеупругих передач с магическими и околomagическими значениями масс в реакциях $^{64}\text{Zn} + ^{114,116,124}\text{Sn}$; $^{40}\text{Ar} + ^{nat}\text{Ag}$; $^{114,124}\text{Sn}$; ^{139}La ; ^{197}Au при энергиях налетающих ионов вблизи барьера взаимодействия.

6. Структурные особенности в массовых и масс-энергетических распределениях продуктов исследуемых реакций находятся в соответствии с расчетами потенциальной энергии двух взаимодействующих ядер с учетом оболочечных эффектов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 130 страниц машинописного текста (включая рисунки), 53 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 81 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и важность исследуемых в диссертации проблем. Кратко изложено основное содержание отдельных глав и приведены основные результаты, полученные автором в данной работе.

Первая глава посвящена рассмотрению некоторых особенностей реакций с тяжелыми ионами при энергиях E/M до 10 МэВ/нуклон. Дается классификация механизмов ядерных реакций, основанная на классическом представлении о движении ионов по траекториям, например, /6/. Несмотря на упрощенность этого подхода, он дает относительно правильную классификацию основных неупругих каналов ядерных реакций с тяжелыми ионами: глубоконеупругие передачи (ГНП), быстрое деление, полное слияние.

В процессах ГНП образуется двойная ядерная система, в процессе эволюции которой происходит диссипация вносимой энергии и углового момента, обмен нуклонами между составляющими ее фрагментами. Продукты распада двойной ядерной системы имеют массы вблизи масс взаимодействующих ядер. Такое влияние входного канала на характеристики продуктов реакций полностью отсутствует в процессах, которые могут приводить к слиянию в единую возбужденную систему. Вклад процессов полного слияния, быстрого деления, ГНП в полное сечение реакции зависит от параметров входного канала, таких как массы, заряды, структурные особенности взаимодействующих ядер, энергия налетающих ионов и др. Как следует из представленных в первой главе данных, важную роль в формировании продуктов распада составных систем играют оболочечные эффекты. Так, учет оболочечных поправок при вычислении потенциальной энергии ядерных систем позволяет получить результаты, согласующиеся с экспериментальными данными по массовым, энергетическим распределениям продуктов ГНП, осколков деления. Учет индивидуальной структуры взаимодействующих ядер дает возможность удовлетворительно описать диффузию нуклонов и энергетическую диссипацию в процессах ГНП.

Вместе с тем отмечается неполнота экспериментальной информации о проявлении оболочечных эффектов в каналах без стадии образования составного ядра. Так, например, существует неоднозначная интерпретация асимметричных массовых распределений продуктов реакции $^{40}\text{Ar} + ^{243}\text{Am}$ /В/. Поскольку в ГНП не происходит значительной перестройки по массе и заряду взаимодействующих ядер, то открытым является также вопрос о сохранении индивидуальных свойств (например, оболочечных структур) сталкивающихся ядер в характеристиках продуктов ГНП.

На основании проведенного в первой главе анализа обосновывается выбор исследуемых в работе реакций в различных комбинациях налетающий ион-ядро мишени. Параметры входных каналов исследуемых реакций представлены в таблице.

Таблица

Реакция	Z_{tot}	η	$E_{\text{лаб}}$ (МэВ)	\bar{E}/V_C
$^{64}\text{Zn} + \text{nat Ag}$	77	0.27	302	1.18
			335	1.31
$^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$	80	0.28	314	1.18
			330	1.24
			390	1.46
$^{64}\text{Zn} + ^{122}\text{Sn}$	80	0.31	314	1.22
$^{64}\text{Zn} + ^{139}\text{La}$	87	0.37	345	1.26
			365	1.34
$^{40}\text{Ar} + \text{nat Ag}$	67	0.46	220	1.5
$^{40}\text{Ar} + ^{114}\text{Sn}$	68	0.48	220	1.5
$^{40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$	68	0.51	220	1.5
$^{40}\text{Ar} + ^{139}\text{La}$	75	0.55	220	1.4
$^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$	97	0.66	220	1.18
$^{56}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$	108	0.58	354	1.28
$^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{Th}$	108	0.706	206	1.04
			220	1.1
			306	1.5
$^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$	110	0.71	220	1.09
$^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$	108	0.74	196	1.08
$^{22}\text{Ne} + ^{232}\text{Th}$	100	0.82	180	1.6
$^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$	102	0.83	180	1.6
$^{22}\text{Ne} + ^{249}\text{Cf}$	108	0.84	180	1.5

Z_{tot} - суммарный заряд ядерной системы,
 η - массовая асимметрия входного канала ($\eta = \frac{M_T - M_P}{M_T + M_P} = \frac{M_T - M_P}{M_{tot}}$),
 $E_{\text{лаб}}$ - энергия налетающих ионов в лабораторной системе,
 \bar{E}/V_C - отношение энергии налетающих ионов в с.ц.м. к кулоновскому барьеру.

Специфика исследуемых реакций с тяжелыми ионами повлекла за собой разработку и создание специальной установки.

Во второй главе приводятся анализ современных способов и методов регистрации продуктов реакций. При выборе детекторов и методов регистрации принимались во внимание следующие факторы. Во-первых, высокие удельные тормозные потери тяжелых ионов и продуктов их взаимодействия со сложными ядрами потребовали использования детекторов, вносящих минимальные искажения в энергию и угловые распределения регистрируемых фрагментов. Во-вторых, учитывалось требование определять значения масс и энергий регистрируемых фрагментов с высокой разрешающей способностью и без предположения о механизме протекания реакции. В-третьих, исследование реакций вблизи барьера взаимодействия делает необходимым создание установки с большой светосилой. На основе проведенного выбора современных методов регистрации с учетом вышеизложенных требований был разработан и создан двухплечевой времяпролетный спектрометр (ДВПС).

Во второй главе дается описание ДВПС, схематическое изображение которого представлено на рис. 1. Основу спектрометра составляют два позиционно-чувствительных времяпролетных "плеча", которые могут перемещаться для регистрации продуктов в диапазоне углов $20^\circ + 160^\circ$. Для получения временных отметок "старт" и "стоп", необходимых для определения скоростей регистрируемых продуктов, использовались детекторы вторичной эмиссии электронов на базе микроканальных пластин и плоскопараллельные лавинные счетчики. Для измерения энергий использовались ионизационные камеры, которые позволяют получить также значения углов вылета продуктов в выделенной плоскости (в пределах 20°) и вне ее (в пределах 5°).

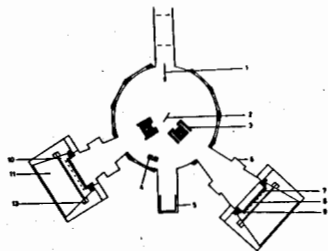


Рис. 1. Схема двухплечевого времяпролетного спектрометра установки "ДЭМАС": 1 - пучок ионов; 2 - мишень; 3 - временные отметчики на основе МКЦ; 4 - монитор; 5 - цилиндр Фарадея; 6 - времяпролетная база; 7 - входное окно ионизационной камеры; 8 и 9 - элементы плоскопараллельного лавинного счетчика; 10 и 11 - сегменты анода; 12 - детектор горизонтальной координаты.

Далее во второй главе приводятся результаты калибровочных измерений и испытаний ДВПС. Созданный спектрометр позволяет проводить измерения энергий (с разрешением ~ 50 кэВ), скоростей ($dv/v \sim 0,5\%$), масс (с разрешением $\pm 1,5$ а.е.м.) продуктов реакций. На рис. 2 приведен массовый спектр упругорассеянных продуктов реакции ^{40}Ar (220 МэВ) + ^{232}Th . График иллюстрирует высокую разрешающую способность спектрометра и независимость массового разрешения от массы регистрируемого продукта.

Измерение угловых корреляций бинарных продуктов дает возможность отделить двухтельные каналы реакций от каналов с испусканием трех и более тел, а также определить вклад различных механизмов в полное сечение реакции. На рис. 3 представлена функция угловых корреляций в системе центра масс для реакции ^{22}Ne (180 МэВ) + ^{238}U . Из рисунка видно, что использование настоящего спектрометра позволяет выделять события, соответствующие различным каналам и измерять массовые, энергетические распределения продуктов.

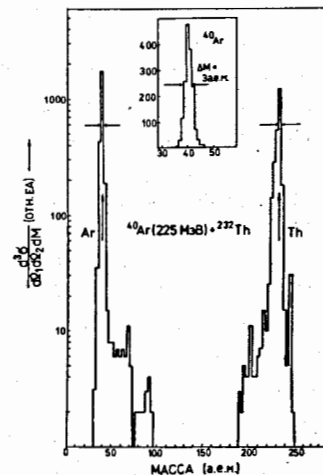


Рис. 2. Массовый спектр упругорассеянных продуктов реакции $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$.

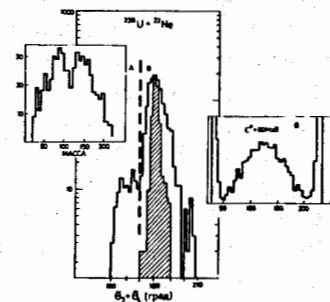


Рис. 3. Выход продуктов реакции ^{22}Ne (180 МэВ) + ^{238}U в зависимости от суммы их углов разлета в системе центра масс $\theta_3 + \theta_4$. На вставках показаны массовые распределения: в - для двухтельных событий, а - для событий с неполной передачей импульса.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию массовых, энергетических и угловых распределений продуктов реакций с ионами $M \geq 40$ и энергиями $E/M < 10$ МэВ/нуклон. Использование различных комбинаций налетающий ион - ядро мишени (см. таблицу) позволило изучить реакции, приводящие к образованию составных систем с Z_{tot} от 68 до 110 в широкой области значений массовой асимметрии входного канала $(0,27 + 0,84)$ и энергий над кулоновским барьером $1,06 + 1,5$.

В реакциях, приводящих к образованию составных систем с $Z > 100$, обнаружено влияние массовой асимметрии входного канала η на механизм протекания реакции. Так, при взаимодействии тяжелых ионов со сложными ядрами (торий-калifornий) при $\eta \geq 0,8$ основным каналом является процесс образования составного ядра. С уменьшением η ($\sim 0,7$) возрастает вклад глубокоэластичных передач и быстрого деления. В реакциях $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$, ^{238}U ; $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ при энергиях налетающих ионов вблизи барьера взаимодействия обнаружены асимметричные массовые распределения с максимумами выхода продуктов в области ~ 210 а.е.м. и сопряженных по массе продуктов. На рис. 4 представлены массовые распределения продуктов реакций $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ при различных энергиях налетающих ионов. С уменьшением энергии пучка массовое распределение меняет свою форму: выход симметричных продуктов (с массой $M_{tot}/2$), представленный пунктирной кривой, уменьшается и увеличивается относительный выход асимметричной фрагментации, т.е. продуктов с массами ~ 210 и 60 а.е.м. Аналогичные распределения по массам наблюдались в реакциях $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$, $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ при энергиях налетающих ионов вблизи барьера.

С целью интерпретации полученных массовых распределений были проведены расчеты потенциальной энергии (driving - potential) для исследуемых систем с $Z > 100$ как функции массовой асимметрии. Показано, что учет оболочечных поправок приводит к локальным минимумам в потенциальной энергии при значениях масс ~ 208 и $(M_{tot} - 208)$. На основании экспериментальных результатов и расчетов потенциала был сделан вывод о том, что наблюдаемые структуры в массовых распределениях могут свидетельствовать о проявлении оболочечных эффектов ($Z=82$ и $N=126$) в процессе эволюции составной системы к симметричной фрагментации без стадии образования составного ядра. Таким процессом может быть быстрое деление.

Для исследуемых реакций получены зависимости средней полной кинетической энергии \overline{TKE} от массы продуктов. Показано, что с увеличением массовой асимметрии входного канала наблюдается монотонное увеличение разницы между экспериментальными значениями \overline{TKE} и зависи-

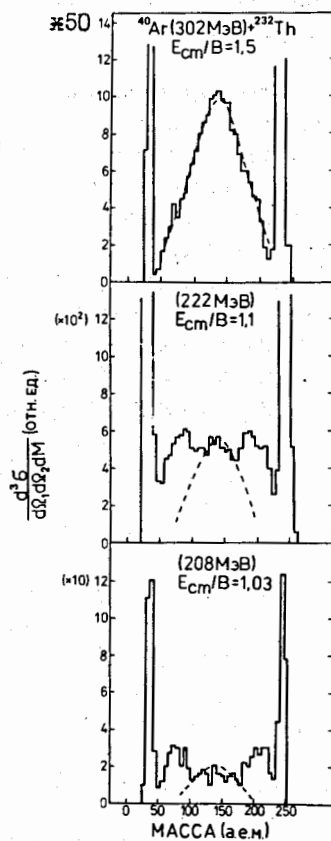


Рис. 4. Массовые распределения продуктов реакции $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ при различных энергиях налетающих ионов. Параметр гауссианов, представляющих выход продуктов "симметричной" фрагментации, получены с учетом температурной зависимости ширины массового распределения ($\Delta M \sim \sqrt{T}$), нормированной на ширину распределения при максимальной энергии налетающих ионов Ar.

$\overline{TKE}(M) = 4M_3M_4 \overline{TKE}(M_{tot}/2) / M_{tot}^2 \Gamma$, где $\overline{TKE}(M_{tot}/2)$ - значение полной кинетической энергии для продуктов симметричных масс и M_3, M_4 - массы фрагментов. Отмеченные особенности в спектрах $\overline{TKE}(M)$ ранее наблюдались в работе /Д/ при делении ядер w - в1 ионами ^3He .

Далее приводится анализ измененных зависимостей $\overline{TKE}(M)$. Делается вывод о различных конфигурациях в момент разрыва для симметричной ($M_{tot}/2$) и асимметричной ($M \sim 200$) фрагментаций. Показано, что продукты с массами ~ 200 имеют меньшую деформацию в отличие от продуктов симметричной фрагментации.

Наблюдаемые для продуктов с $M \sim 200$ высокие значения $\overline{TKE}(M)$ приводят к тому, что энергия возбуждения асимметричных по массе продуктов оказывается ниже, чем ожидается согласно оценкам, полученным на основе систематики полной кинетической энергии для осколков деления с учетом массовой асимметрии выходного канала.

При взаимодействиях тяжелых ионов с $M \geq 40$ со сложными ядрами, приводящих к образованию составных систем с $Z < 100$, возрастает вклад ГНП. Для исследования влияния структуры взаимодействующих ядер на характеристики продуктов ГНП были проведены исследования характеристик продуктов реакций, соответствующих значениям $\eta < 0,7$ и приводящих

к образованию составных систем с $Z < 100$. Были измерены массовые и энергетические распределения продуктов в реакциях с ионами ^{64}Zn и ^{40}Ar на мишенях из олова, лантана, серебра.

Для реакций $^{64}\text{Zn} + ^{114,116,124}\text{Sn}$ в масс-энергетических распределениях продуктов обнаружены максимумы выхода для мишене- и снарядо-подобных продуктов со значениями ТКЕ, меньшими входного кулоновского барьера (рис. 5). Структура в масс-энергетических распределениях в реакциях с оловянными мишенями наблюдается при энергиях налетающих ионов вблизи барьера взаимодействия и исчезает с увеличением энергии ионов. Кроме того, в масс-энергетических распределениях продуктов реакций с немагическими по Z мишенями (реакции $\text{Zn} + \text{Ag}, \text{La}$) подобные структуры вообще не наблюдаются (см. рис. 6).

Для исследуемых реакций с ионами ^{64}Zn были проведены расчеты потенциальной энергии в зависимости от соотношения нейтронов и прото-

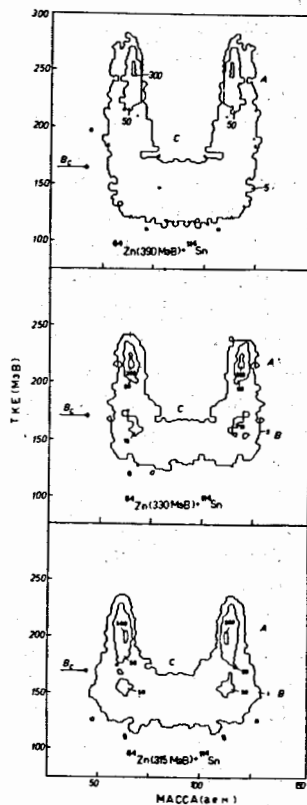


Рис. 5. Зависимость выхода продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + ^{114}\text{Sn}$ от массы и полной кинетической энергии ТКЕ при различных энергиях налетающих ионов. Стрелками указано значение входного кулоновского барьера V_C .

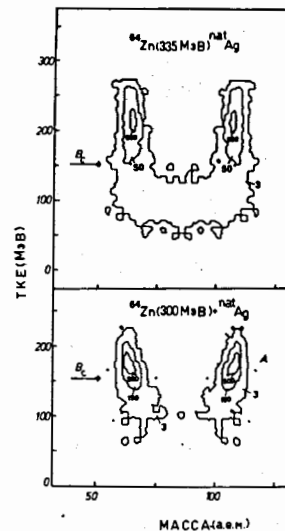


Рис. 6. Зависимость выхода продуктов реакции $^{64}\text{Zn} + ^{nat}\text{Ag}$ от массы и ТКЕ при различных энергиях налетающих ионов.

нов во взаимодействующих ядрах. Результаты этих расчетов представлены на рис. 7, из которого видно, что для реакций с ионами цинка на оловянных мишенях потенциальная энергия имеет два минимума, отделенных некоторым барьером. Первый минимум находится в области $Z \approx 50$, а второй соответствует образованию в выходном канале симметричных продуктов. В случае $\text{Zn} + \text{Ag}$ поверхность потенциальной энергии не имеет максимумов, отделяющих область с $Z \sim 50$ от области, соответствующей симметричной фрагментации. На основании этого можно объяснить то, что для этой реакции экспериментально не наблюдалось структуры в масс-энергетических распределениях.

Были исследованы реакции $^{40}\text{Ar} (220 \text{ MeV}) + ^{nat}\text{Ag}, ^{114,124}\text{Sn}, ^{139}\text{La}, ^{197}\text{Au}$, характеризующиеся значениями $0.4 < \eta < 0.7$. Зависимости выхода продуктов от массы и ТКЕ для этих реакций представлены на рис. 8. Из сравнения спектров, представленных на рис. 5 и рис. 8, можно заключить, что продукты ГНП в реакциях с $\eta < 0.4$ образуются с массами, приблизительно равными массам взаимодействующих ядер, при значениях полной кинетической энергии больших V_C . А для продуктов ГНП в реакциях со значениями $0.4 \leq \eta < 0.7$ наблюдается сдвиг массы с увеличением потерь ТКЕ.

Кроме того, как видно из рис. 8, наблюдаемый массовый дрейф приводит к повышенному выходу продуктов с массами $M \approx 50$. Из условия N/Z равновесия можно показать, что повышенный выход продуктов с этими значениями масс соответствует образованию фрагментов с $Z = 20$.

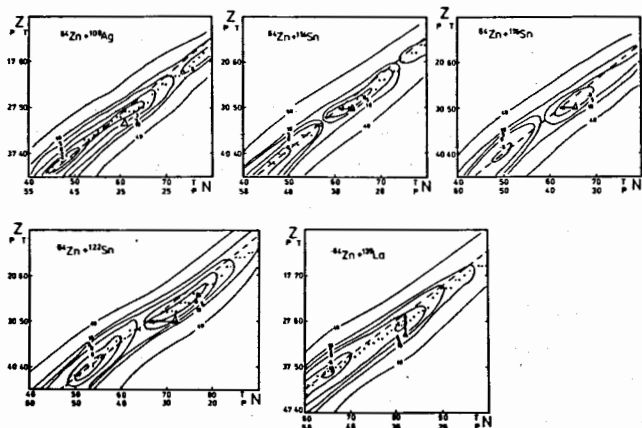


Рис. 7. Карты поверхности потенциальной энергии, рассчитанные для составных систем, образующихся в реакциях с ионами цинка. Треугольником обозначены значения энергии, соответствующие входному каналу реакции.

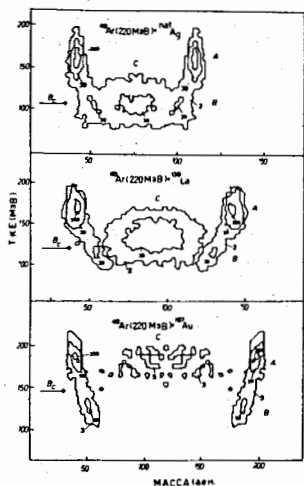


Рис. 8. Выходы продуктов реакции ^{40}Ar (220 МэВ) + natAg, ^{139}La , ^{197}Au в зависимости от массы и ТКЕ.

Четвертая глава посвящена анализу полученных экспериментальных результатов. Отмечается корреляция между значениями входной массовой асимметрии и зависимостью массового дрейфа от потерь кинетической энергии. Показано, что для реакций со значениями $\eta < 0,4$ характерно отсутствие массового дрейфа для продуктов ГНП при потерях кинетической энергии вплоть до кулоновского барьера. С повышением асимметрии входного канала ($0,4 < \eta < 0,7$) наблюдается массовый дрейф для продуктов ГНП. Для реакций с еще большими значениями η ($\geq 0,7$) возрастает вклад процессов быстрого деления и образования составного ядра.

Для исследуемых реакций в характеристиках продуктов ГНП и быстрого деления обнаружены повышенные выходы продуктов с околomagическими значениями масс. Эти структуры могут быть объяснены влиянием оболочечных эффектов, которые по-разному проявляются в каналах ядерных реакций под действием тяжелых ионов. Для реакций с $\eta < 0,4$ при энергиях налетающих ионов вблизи барьера основную долю событий составляют процессы глубоконеупругих передач. Массовые распределения продуктов в этих реакциях имеют максимумы выхода при массах, равных массам взаимодействующих ядер. Образующаяся двойная ядерная система сохраняет в себе свойства входного канала и продукты ГНП имеют оболочечную структуру, если она "заложена" во входном канале. Это наблюдается в виде дополнительных максимумов в распределениях по ТКЕ для мишене- и снарядо-подобных продуктов в реакциях с ионами цинка на магических ядрах олова. Этот результат подкрепляется расчетами потенциальной энергии для двух взаимодействующих ядер с учетом оболочечных поправок.

Для глубоконеупругих столкновений, происходящих в реакциях с большей асимметрией входного канала ($0,4 < \eta < 0,7$), наблюдается увеличение массового дрейфа с уменьшением ТКЕ. Наблюдаемый дрейф влечет за собой перестройку взаимодействующих ядер и, очевидно, завершается при некоторых других равновесных для данной ядерной системы N/Z значениях. Этим объясняется экспериментально обнаруженное в этих реакциях предпочтительное образование продуктов с околomagическими значениями масс ($M \approx 50$).

Продукты быстрого деления, которое является наиболее вероятным процессом при $\eta \geq 0,7$, уже не несут в себе информацию об индивидуальных свойствах ядер мишени и снаряда, поскольку время протекания процесса в этом случае больше, чем для ГНП. За большее время взаимодействия осуществляется эквilibрация вдоль масса-асимметричной коллективной переменной. Наблюдение повышенного выхода продуктов с магическими значениями масс ($M = 208$) в реакциях с $\eta \geq 0,7$ интерпретирует-

ся как следствие установления статистического равновесия вдоль масс-асимметричной коллективной переменной.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертационной работе.

1. Создан прецизионный времяпролетный спектрометр для корреляционных измерений массовых, энергетических и угловых распределений продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами.

2. На основе разработанной методики определялись массы коррелированных продуктов ядерных реакций с разрешением по массе ± 1.5 а.е.м. Измерены массовые и энергетические распределения продуктов реакций, вызванных тяжелыми ионами (^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{32}S , ^{56}Fe , ^{64}Zn) на различных ядрах-мишенях с Z от 47 до 97, в широком диапазоне энергий налетающих ионов.

3. Исследовано влияние массовой асимметрии входного канала на механизм протекания реакции. В реакциях с тяжелыми мишенями (торий-калифорний) при $\eta > 0,8$ основным каналом является процесс образования компаунд-ядра, с уменьшением значения η ($\leq 0,7$) доминирующими процессами являются глубоконеупругие передачи и быстрое деление.

4. Наблюдены асимметричные массовые распределения продуктов реакций, приводящих к образованию составных систем с $Z = 108-110$. Структура в массовых распределениях объясняется влиянием оболочечных эффектов на процесс эволюции составных систем и симметричной фрагментации без стадии образования компаунд-ядра.

5. В реакциях с ионами Zn при энергиях вблизи барьера взаимодействия на мишенях из ядер изотопов олова обнаружен повышенный выход мишенеподобных продуктов со значениями TKE , меньшими входного кулоновского барьера V_C . Этот факт интерпретируется как сохранение оболочки $Z = 50$ ядер мишени в характеристиках продуктов глубоконеупругих передач.

6. Показано, что для симметричных комбинаций налетающий ион - ядро мишени ($\eta < 0,5$) величина массового дрейфа не зависит от потерь кинетической энергии для событий при неполной диссипации вносимой кинетической энергии. Для более асимметричных комбинаций эта зависимость наблюдается.

7. Обнаружены повышенные выходы продуктов реакций ^{40}Ar (220 МэВ) + nat $_{Ag}$, $^{114,124}\text{Sn}$, ^{139}La , ^{197}Au с околomagическими значениями N и Z ($Z = 20, N = 28$). Этот результат интерпретируется как проявление

оболочечных эффектов в процессе глубоконеупругих передач с дрейфом масс.

8. Проведен анализ полученных данных с использованием расчета потенциальной энергии двух взаимодействующих ядер, который объясняет наблюдаемые особенности в масс-энергетических распределениях продуктов реакций с точки зрения влияния оболочечных эффектов на формирование продуктов реакций полного слияния, быстрого деления и глубоконеупругих передач.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Дмитриев В.Д., Журавлева Н.В., Зодан Х., Калинин А.М., Конаева Г.Я., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К., Шиллинг К.Д. Стартовый детектор на основе микроканальных пластин. - Дубна, 1979. - II с. (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 7-12290).
2. Дмитриев В.Д., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К. Применение микроканальных пластин в экспериментальной физике. - ПТЭ, 1982, № 2, с. 7-18.
3. Зайдель В., Зодан Х., Лукьянов С.М., Манфрасс П., Пенионжкевич Ю.Э. Стари Ф., Шиллинг К.Д. Позиционно-чувствительная ионизационная камера для времяпролетного спектрометра. - ПТЭ, 1983, № 4, с. 50-58.
4. Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Чубарян Г.Г. Современные методы регистрации тяжелых ионов. - Дубна, 1986 - с.205-214 (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: Д9-84-817).
5. Gippner P., Schilling K.D., Stary F., Will E., Sodan H., Lukyanov S.M., Salamatin V.S., Penionzhkevich Yu.E., Chubarian G.G. Schmidt R., Shell Effects in Evolution of Mass Asymmetry in Heavy Ion Collisions Leading to Composite System with $Z = 108$. - Z.Phys., 1986, A325, p.335-346.
6. Зодан Х., Вилл Э., Лукьянов С.М., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э. Чубарян Г.Г., Гиппнер П., Зайдель В., Шиллинг К.Д. Изучение массовых распределений продуктов реакций, приводящих к образованию составной системы с $Z=108$. - В сб.: Краткие сообщения Объед. ин-та ядерн. исслед., Дубна, 1984, № 4, с. 15-21.
7. Зодан Х., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Хайдель К., Саламатин В.С., Чубарян Г.Г., Гиппнер П., Вилл Э., Шиллинг К.Д., Поп А. Изучение характеристик распада составных систем с $Z > 100$. - В сб.: Физика тяжелых ионов: Докл. Межд. школы-семинара, Дубна: ОИЯИ, 1986, с. 479-488.

8. Зодан Х., Лукьянов С.М., Пенюонжкевич Ю.Э., Саламатин В.С., Чубарян Г.Г., Хайдель К., Поп А., Шиллинг К.Д., Вилл Э., Гиппнер П., Борча К. Проявление оболочечной структуры в характеристиках продуктов реакции $Zn + Sn$. - Дубна, 1987. - 10 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн. исслед.: P7-87-621).
9. Schilling K.D., Gippner P., Seidel W., Stary F., Will E., Heidel K., Lukyanov S.M., Penionzhkevich Yu.E., Salamatin V.S., Sodan H., Chubarian G.G. The Double Time-of-Flight Spectrometer for Heavy Ion Reaction Products. - Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1987, A257, N 2, p.197-210.

Цитируемая литература:

- а/ Оганесян Ю.Ц. Перспективы исследований с помощью тяжелых ионов и развитие ускорительных установок ЛЯР ОИЯИ. - Дубна, 1979. - с.38 (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: P9-12843).
- б/ Джолос Р.В., Шмидт Р. Взаимодействие тяжелых ионов при энергиях 10 МэВ/нуклон. - ЭЧАЯ, 1981, том 12, вып. 2, с.324-356.
- в/ Kalpakchieva R.G., Kartavenko V.S., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Sodan H. Manifestation of Shell Effects in the Interaction of Heavy Nuclei with Ions of $A \geq 40$. - Nukleonika, 1979, v.24, N 4, p.417-424.
- г/ Wilcke W.W., Birkelund I.R., Wollersheim H.J. et al. Reaction Parameters for Heavy-Ion Collisions. - Atomic Data and Nucl. Data Tabl., 1980, v.25, p.389-619.
- д/ Грузинцев Е.Н., Иткис М.Г., Околович В.Н., Смиренкин Г.Н. Свойства симметричного деления ядер W-VI ионами ${}^3\text{He}$. - ЯФ, 1984, том 39, вып. 6, с.1336-1348.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 марта 1988 года.