

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук ст.н.с. ОГАНЕСЯН Ю.Ц.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор СМИРЕННИН Г.Н.,

кандидат физико-математических наук ст.н.с. ПАШКЕВИЧ В.В.

Ведущая организация:

Радиовый институт им. В.Г.Хлопина, г. Ленинград.

Защита состоится "4" ноября 1980 года в "11" час. на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

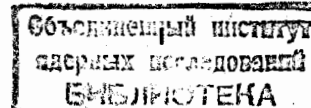
Автореферат разослан "1" октября 1980 года.

Ученый секретарь специализированного совета ТАРАН Ю.В.

Актуальность проблемы. В последние 10 - 15 лет было накоплено большое количество экспериментальных данных о различных характеристиках деления ядер: периодах спонтанного деления, массовых распределениях, числе нейтронов, испускаемых осколками, и т.д. В свете современных теоретических представлений о процессе деления ядер важную роль в описании этих характеристик играют оболочечные эффекты. Рассмотрение влияния оболочечных эффектов на устойчивость атомных ядер по отношению к спонтанному делению привело к предсказанию повышенной стабильности ядер в области $Z = 114$. Столь большая роль эффекта оболочек нуждается в детальном исследовании, в частности в определении его вклада при делении из различных состояний начального ядра, т.е. при различных энергиях возбуждения.

Существенное расширение области исследуемых делящихся ядер стало возможным лишь с развитием ускорителей тяжелых ионов. К настоящему времени получены спонтанно делящиеся изотопы тяжелых элементов вплоть до $Z = 107$, изучен ряд спонтанно делящихся изомеров, открыто запаздывающее деление ядер и т.д. Однако исследование спонтанного деления трансфермиевых элементов связано с большими трудностями из-за малого сечения их образования ($\sim 10^{-32} - 10^{-34} \text{ см}^2$). Наиболее тяжелыми спонтанно делящимися изотопами, для которых измерены (однако с заведомо малой статистической) массовые распределения, являются изотопы $^{252}\text{102}$ и $^{262}\text{105}$. Как правило, до последнего времени в реакциях с тяжелыми ионами изучались массовые распределения осколков деления трансфермиевых элементов при энергиях возбуждения $E^* > 50 \text{ МэВ}$ и показано, что при таких энергиях основные закономерности описываются в рамках жидкокапельной модели деления.

Определенный интерес представляет промежуточная область энергий возбуждения $0 < E^* < 50 \text{ МэВ}$, где проявление оболочечных эффектов меняется от максимального до минимального и где характеристики деления ядер с $Z \geq 100$ мало изучены. Поэтому исследование механизма образования осколков в этом случае представляет значительный интерес для физики деления и приобретает особую актуальность в связи с проблемой синтеза ядер очень тяжелых и



сверхтяжелых элементов на ускорителях. Особую актуальность этот вопрос получает с созданием нового мощного ускорителя У-400, на котором планируется большая программа по синтезу новых элементов.

Исследования, проведенные в данной работе по изучению деления трансфермиевых ядер с $E^* < 50$ МэВ, стимулировали также развитие подобных экспериментов в физических центрах ФРГ (Дармштадт) и США (Беркли).

Целью работы являлось получение экспериментальной информации о характеристиках вынужденного деления ядер с $Z \geq 100$ при различных энергиях возбуждения в реакциях с тяжелыми ионами, и в частности исследование роли оболочечных эффектов в формировании осколков при $E^* < 50$ МэВ, как это имеет место в делении легких актинидных ядер при низких энергиях возбуждения.

Научная новизна и значение работы. Разработаны методики исследований и получена новая экспериментальная информация о массовых и энергетических распределениях продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами /1,2,3,4/.

Проведены измерения массового распределения осколков деления ядра $^{256}\text{I}02$ с энергией возбуждения 25 МэВ, полученного в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ /1/. Впервые в реакции типа (HI, f) в этом случае наблюдается асимметричное деление, что может свидетельствовать о влиянии эффекта оболочек на формировании масс осколков при этой энергии возбуждения.

Для целого ряда ядер с параметром делимости $Z^2/A \approx 40-45$, полученных в реакциях $^{208}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$, $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$, $^{208}\text{Pb} + ^{52}\text{Cr}$, $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$, измерена полная кинетическая энергия (TKE), освобождаемая при делении:

Проведены опыты по измерению массовых, энергетических и угловых распределений фрагментов в реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ в интервале энергий возбуждения от 40 до 116 МэВ /2,5/. Показано, что в области $E^* < 50$ МэВ массовые распределения становятся асимметричными, что может быть следствием оболочечных эффектов в области магических чисел $Z = 82$ и $N = 126$.

Ряд результатов работы представляет интерес с точки зрения механизма взаимодействия сложных ядер в области $Z \geq 100$, а также может быть полезным для проверки существующих или разви-

вающихся в настоящее время теоретических представлений о делении ядер. Результаты работы могут служить также отправной точкой для проведения новых экспериментов по делению ядер трансактинидной области, получаемых с помощью тяжелых ионов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация содержит введение, три главы и выводы.

Введение является аннотацией работы. В нем указано на актуальность проблемы, сформулирована цель работы и приведены основные результаты, полученные автором.

Глава I посвящена рассмотрению некоторых особенностей деления тяжелых ядер. В ней сделан краткий обзор экспериментальных результатов изучения характеристик спонтанного и вынужденного деления ядер, которые связаны с проявлением оболочечных эффектов, в частности, рассмотрены массовые распределения, полная кинетическая энергия, среднее число нейтронов, испускаемых осколками. Особое внимание уделено массовым распределениям. Анализ данных показывает, что массовые распределения осколков деления актинидных ядер (за исключением тяжелых фермиевых изотопов ^{258}Fm и ^{259}Md) с энергией возбуждения $E^* \leq 40$ МэВ имеют асимметричный характер, выражающийся в повышении выхода масс в области $A_f \approx 140$ и их дополняющих. Это явление принято объяснять влиянием оболочек с $Z = 50$ и $N = 82$ на выход осколков. При этом с ростом E^* постепенно увеличивается выход симметричных осколков, и при $E^* \geq 50$ МэВ массовые распределения становятся симметричными. Данные по массовым распределениям осколков деления ядер с $Z > 100$ весьма ограничены, особенно для $E^* < 50$ МэВ. Отмечено, что в реакциях типа (HI, f) изучались массовые распределения лишь при $E^* \geq 50$ МэВ.

В первой главе рассмотрен также вопрос о получении слабо-возбужденных тяжелых ядер в реакциях с тяжелыми ионами. Тяжелые составные ядра, обладающие минимальной энергией возбуждения $E_{\text{min}}^* \sim 20 - 25$ МэВ, можно получить, облучая мишени из Pb или Bi ионами с массой $A_i \sim 50$. Большие перспективы в этом направлении открываются с использованием ускоренных ионов ^{48}Ca . Особый случай представляет реакция $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$, для которой имеет место максимальный выигрыш в Q реакции и значение $E_{\text{min}}^* \approx 18$ МэВ. Составное ядро $^{256}\text{I}02$, получаемое в этой реакции, было выбрано нами в качестве объекта исследований. Выска-

зывается предположение, что реализация столь малых энергий возбуждения в ядрах, получаемых в реакциях с тяжелыми ионами, отразится на характеристиках деления этих ядер, в частности на массовых распределениях осколков деления.

Глава II посвящена постановке экспериментов по исследованию массовых распределений осколков деления изотопов I02-го элемента $^{256}\text{I}02$ и $^{260}\text{I}02$, образующихся в реакциях $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ /I/ и $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$. Для этих целей использовались два метода: метод, основанный на радиохимическом выделении радиоактивных осколков и их идентификации путем измерения γ -спектров, и метод регистрации парных осколков с измерением их энергий и положения в пространстве относительно направления падающего пучка.

Эксперименты с применением радиохимии проводились на внутренних пучках ионов ^{48}Ca и ^{22}Ne , получаемых на циклотроне тяжелых ионов У-300. Энергия ионов ^{48}Ca составляла 220 и 250 МэВ, интенсивность $\sim 1,5 \cdot 10^{12}$ част/сек, а ионов ^{22}Ne - соответственно 112 и 117 МэВ и $3 \cdot 10^{13}$ част/сек. В случае реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ выделялись химические фракции радиоактивных осколков - изотопов I, Te, Ag и Ba и изотопов редкоземельных элементов (РЗЭ), а в случае $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ - изотопов Au, Pb и Bi и РЗЭ. Химический выход составлял в различных опытах от 50 до 80%, а точность его определения была не хуже 5%. По измеренным γ -активностям идентифицированных изотопов определялись сечения их образования, с помощью которых с использованием известных предположений относительно зарядового распределения осколков и числа нейтронов, испаряемых осколками, строились массовые распределения первичных осколков деления. Массовые распределения осколков в реакции $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ были получены и непосредственно из данных по измерению кинетических энергий парных осколков на выведенном пучке ионов ^{22}Ne с энергией 112, 133 и 178 МэВ и интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{10}$ част/сек. В случае энергии ^{22}Ne , равной 112 МэВ, наблюдалось хорошее согласие двух методов измерения массовых распределений.

Результаты измерений показывают, что в обеих реакциях, $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ и $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$, при делении составных ядер $^{256}\text{I}02$ и $^{260}\text{I}02$ с $E^* \geq 50$ МэВ наблюдаются симметричные массовые распределения с максимумами, соответствующими $A_c/2$ (A_c - масса делящегося составного ядра), и дисперсиями, которые находятся в хорошем согласии с ожидаемыми при делении ядер с

$E^* > 50$ МэВ. Данные для реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ при $E^* = 53$ МэВ показаны на рис. I треугольниками.

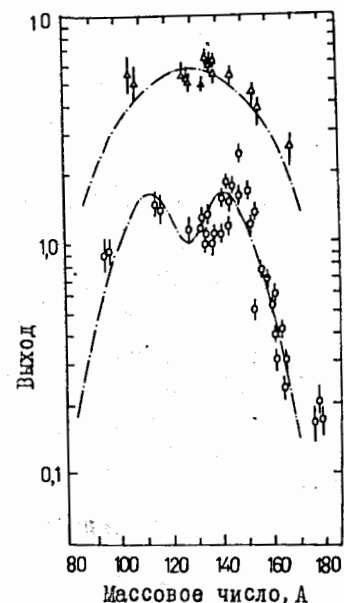


Рис. I. Экспериментально измеренные массовые распределения осколков деления составного ядра $^{256}\text{I}02$, полученного в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$, при двух энергиях возбуждения: 25 МэВ (светлые точки) и 53 МэВ (треугольники). Штрих-пунктирные кривые проведены через экспериментальные точки.

Массовое распределение осколков, измеренное для реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ при энергии ионов ^{48}Ca 220 МэВ (всего на ~ 10 МэВ выше кулоновского барьера), соответствующей энергии возбуждения составного ядра $^{256}\text{I}02$, равной 25 МэВ, имеет асимметричную форму, причем наиболее вероятное значение массы тяжелого осколка соответствует массам $A_H = 140 - 145$ (см. рис. I, светлые точки). Сопоставляя этот результат с данными, полученными для спонтанного деления ядер $^{252}\text{I}02$ и ^{256}Fm , можно полагать, что асимметричное массовое распределение в нашем случае обусловлено влиянием

оболочек с $Z=50$ и $N=82$ при формировании масс осколков подобно тому, что имеет место при делении легких актинидных элементов для $E^* \leq 40$ МэВ.

Определение выхода осколков деления в реакции $^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$ и сопоставление с полным сечением реакции свидетельствует о том, что вблизи кулоновского барьера значительная часть полного сечения реакции приводит к слиянию ядра мишени с ядром частицы и образованию слабозбужденного составного ядра. Полученное значение сечения деления при $E^* = 25$ МэВ хорошо согласуется с измеренным ранее сечением реакции $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{254}\text{102}$, если учесть, что в этой области ядер $\Gamma_n/\Gamma_f \sim 10^{-2}$.

Глава III посвящена измерениям энергетических и массовых характеристик осколков вынужденного деления ядер в области $100 \leq Z \leq 113$, полученных при облучении на выведенных пучках циклотрона У-300 мишеней из ^{208}Pb , ^{238}U и ^{243}Am ионами ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{48}Ti с интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{10}$ част/сек и ^{52}Cr , ^{56}Fe с интенсивностью $\sim 5 \cdot 10^9$ част/сек. Энергия ионов варьировалась с помощью алюминиевых поглотителей и измерялась по упругому рассеянию. Массовые распределения продуктов реакций исследовались в диапазоне $40 \leq E^* \leq 115$ МэВ.

Для выделения канала полной передачи импульса налетающего иона с последующим развалом на два осколка использовался корреляционный метод измерения кинетических энергий с помощью двух $\text{Si}(\text{Au})$ поверхностно-барьерных детекторов, расположенных под определенными углами к направлению падающего пучка [4]. Показано, что во всех случаях можно надежно выделить события двухтельного процесса образования осколков при распаде начального ядра (или системы), принимающего полный импульс бомбардирующего иона.

Калибровка полупроводниковых детекторов производилась с помощью ионов ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{84}Kr , ^{132}Xe и ^{136}Xe , упруго рассеянных под разными углами на тонкой мишени из ^{208}Pb . Связь между энергией частицы (E), ее массой (M) и амплитудой сигнала детектора (K) воспроизводилась хорошо известным выражением $E = (a + a'M)K + b + b'M$. Коэффициенты a , a' , b , b' определялись так, чтобы лучшим образом восстановить энергии упруго рассеянных налетающих ионов и ядер мишени для определенного набора углов рассеяния. Положение детекторов по углу определялось с точностью не хуже $0,5^\circ$. Энергетическое разрешение в области энергий $E = 100$ МэВ и в интервале масс $40 \leq M \leq 208$ было не хуже 5%.

Быстро-медленная схема совпадений и амплитудный анализ позволяли измерять двухмерный спектр энергий продуктов реакции. Полученная информация обрабатывалась на ЭВМ. Массы вычислялись из измеренных кинетических энергий в предположении о двухтелности процесса. Результаты представлялись в виде распределений масс и полной кинетической энергии, $N(M)$ и $N(\text{TKE})$, и в виде контурных диаграмм, связывающих полную кинетическую энергию и массы продуктов, $N(M, \text{TKE})$.

Полученные таким образом средние значения полной кинетической энергии продуктов симметричного деления для целого ряда реакций, указанных на рис.2, свидетельствуют о том, что известная

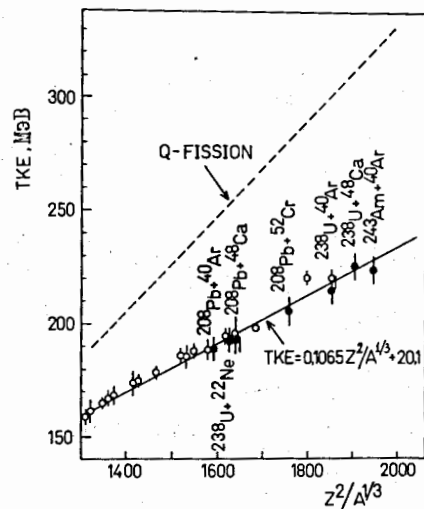


Рис.2. Средние полные кинетические энергии осколков симметричного деления, полученные в настоящей работе (темные точки), как функция параметра кулоновского отталкивания $Z^2/A^{1/3}$. Светлые точки — данные других работ. Сплошная линия — известная зависимость Вайолы-Сиккеланда. Пунктиром обозначено среднее энерговыделение Q_{fission} для симметричных разделений.

закономерность, $TKE = 0,1065 Z^2/A^{1/3} + 20,1$, полученная для ядер с параметром кулоновского отталкивания $Z^2/A^{1/3} \leq 1650$, описывает также TKE осколков деления вплоть до значений $Z^2/A^{1/3} \approx 1950$. Сопоставляя эти результаты с полным энерговыделением $Q_{fission}$ для симметричного разделения, можно полагать, что деление тяжелых и сверхтяжелых ядер должно сопровождаться испусканием большого числа нейтронов (для области $Z \approx 114, \bar{\nu} \sim 8-10$).

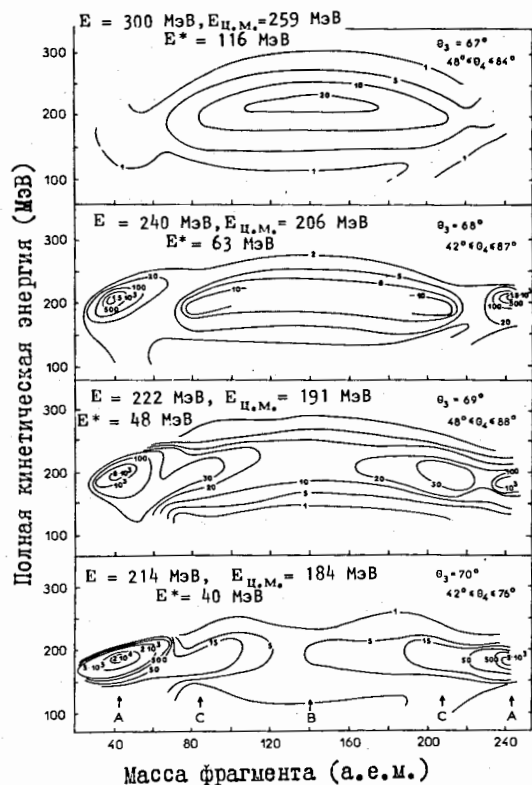


Рис.3. Зависимость полной кинетической энергии продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ от их массы при четырех энергиях бомбардирующих ионов.

С помощью корреляционного метода исследовалась также зависимость формы массового распределения осколков деления ядер ^{248}Fm и $^{260}\text{102}$, образующихся в реакциях $^{208}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$ (222 и 197 МэВ) и $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ (178, 133 и 112 МэВ), от энергии бомбардирующих ионов. Результаты измерений показывают, что во всех этих случаях имеют место симметричные массовые распределения.

Более детально исследовалась реакция $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ /2,5/ при разных энергиях налетающих ионов ^{40}Ar , 300, 240, 222 и 214 МэВ, как это видно из рис.3. При $E^* = 116$ МэВ наблюдается симметричное массовое распределение осколков в области масс $60 \leq M \leq 220$. При уменьшении энергии возбуждения до значений < 50 МэВ это распределение становится асимметричным с наиболее вероятным отно-

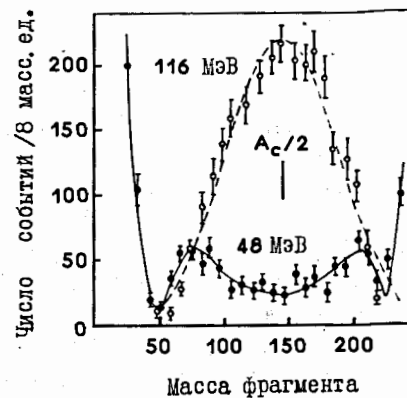


Рис.4. Массовые распределения продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ для двух значений энергии бомбардирующих ионов: 222 МэВ (темные точки) и 300 МэВ (светлые точки). Массовое распределение при $E = 222$ МэВ представлено для углового интервала $52^\circ \leq \theta_4 \leq 88^\circ$, где упругие события частично не регистрировались.

шением масс $M_H/M_L \approx 2,5$, что соответствует массе тяжелого фрагмента $M_H \approx 200 - 210$. Для удобства наблюдения на рис.4 представ-

лены одномерные массовые распределения, полученные при $E^* = 116$ и 48 МэВ.

Измерение выхода осколков при изменении направления оси деления относительно пучка дает в пределах погрешности эксперимен-

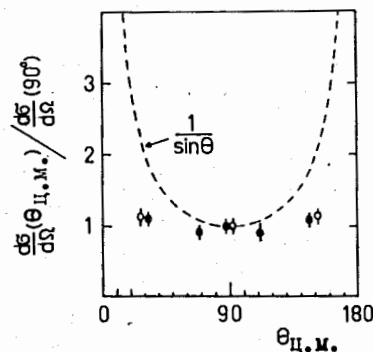


Рис.5. Угловое распределение продуктов с массой 70 - 220, образовавшихся в реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ при энергиях 222 МэВ (темные точки) и 300 МэВ (светлые точки).

та практически изотропное угловое распределение для интервала масс $70 \lesssim M \lesssim 220$ (см.рис.5).

Подобные измерения были впоследствии проведены в Дармштадте (ФРГ) и в Беркли (США) при облучении мишеней из ^{48}Ca и ^{238}U ионами ^{238}U и ^{40}Ar соответственно, и были получены аналогичные результаты.

Нам представляется, что одним из возможных объяснений наблюдаемого явления является проявление оболочечных эффектов в процессе распада начальной системы на два осколка. Если подобный механизм имеет место, то в отличие от случая деления актинидных элементов в реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ мы наблюдаем проявление оболочек в области дважды магического ядра с $Z = 82$ и $N = 126$.

В статическом приближении расчет потенциальной энергии, проведенный Грайнером и др. (1977), свидетельствует в пользу данного предположения. Квазидинамическое рассмотрение эволюции системы в рамках модифицированного варианта диффузионной модели

также дает увеличение выхода фрагментов в области $Z = 82$ и их сопряженных /5/.

Можно полагать также, что изменение структуры массового распределения с ростом энергии ионов связано с исчезновением оболочечных эффектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ можно сформулировать следующим образом:

1. При облучении ^{208}Pb ионами ^{48}Ca исследовано деление составного ядра ^{256}Io с малой энергией возбуждения. Показано, что в реакциях типа (HI, f) , где в качестве налетающего тяжелого иона используется ^{48}Ca , можно проводить исследование деления возбужденного составного ядра до минимальной энергии возбуждения $E^* \sim 20$ МэВ.

2. В реакции с тяжелыми ионами ($^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca}$) наблюдается асимметричное массовое распределение осколков деления составного ядра ^{256}Io с отношением масс $\approx 1,3$. Асимметрия массового распределения интерпретируется как результат влияния оболочечных эффектов, которые проявляются при низкоэнергетичном делении актинидных элементов.

3. Создана методика для измерения кинетических энергий коррелированных продуктов реакции, образующихся при полной передаче импульса налетающего иона двум продуктам реакции.

4. Измерены массовые, энергетические и угловые распределения продуктов реакции $^{243}\text{Am} + ^{40}\text{Ar}$ в диапазоне энергий возбуждения образующейся системы от 40 до 116 МэВ. Показано, что при $E^* > 100$ МэВ массовое распределение имеет симметричный характер, а при $E^* < 50$ МэВ становится асимметричным с наиболее вероятной массой тяжелого продукта 200 - 210 а.е.м. Данный результат может указывать на проявление оболочек с $Z = 82$ и $N = 126$.

5. Для широкой области ядер с параметром делимости $Z^2/A \approx 40-45$ измерены средние значения полной кинетической энергии и показано, что вплоть до значений $Z^2/A^{1/3} \approx 1950$ они описываются известной линейной зависимостью ТКЕ ($Z^2/A^{1/3}$).

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на Международном совещании по поиску и синтезу трансурановых элементов (Дубна, 1976), на Международном совещании по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов

(Дубна, 1977), на Международном симпозиуме по моделям ядерных реакций (Венгрия, 1977)^{/3/}, на Международном симпозиуме по высоко-спиновым состояниям (Дрезден, ГДР, 1977), на Международной школе по ядерной физике (Варна, НРБ, 1977), на XI Международной школе по ядерной физике в Миколайках (Польша, 1978)^{/5/}, на XXVI Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра и опубликованы в следующих работах:

1. R.Kalpakchieva, Yu.Ts.Oganessian, Yu.E.Penionzhkevich, H.Sodan and B.A.Gvozdev. Phys.Lett. 69B, 287 (1977); JINR E7-10587, Dubna, 1977.
2. R.Kalpakchieva, Yu.Ts.Oganessian, Yu.E.Penionzhkevich and H.Sodan. Z.Physik A283, 253 (1977); JINR E7-10632, Dubna, 1977.
3. R.Kalpakchieva. Reaction Models '77: Proc. Int. Symp. on Nuclear Reactions, Balatonfüred (Hungary), 1977, p. 313.
4. Х.Зодан, Р.Калпакчиева, Д.Э.Пенионжкевич, Г.В.Букланов, В.И.Вакатов, В.Б.Злоказов, Т.С.Саламатина, Л.П.Челноков. Сообщение ОИЯИ P7-10671, Дубна, 1977.
5. R.Kalpakchieva, V.G.Kartavenko, Yu.Ts.Oganessian, Yu.E.Penionzhkevich, H.Sodan. Proc. of the Eleventh Masurian School in Nuclear Physics, Mikolajki, Poland, 1978; Nukleonika 24, 417 (1979); JINR E7-11970, Dubna, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1980 года.