

A-424

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На правах рукописи

4-91-350

**АНТОНЕНКО**

Николай Викторович

УДК 539 } 17

**ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ  
ЗАРЯДОВЫХ И МАССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
В РЕАКЦИЯХ МНОГОНУКЛОННЫХ ПЕРЕДАЧ**

Специальность: 01.04.16 - физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1991

**Актуальность проблемы:** Растущий интерес к ядерным реакциям с тяжелыми ионами обусловлен тем, что они открывают богатые возможности для изучения как статистических свойств ядер, так и неравновесных процессов, протекающих в них. Устойчивый интерес и теоретиков, и экспериментаторов на протяжении долгого времени сохраняется к области энергий до 10 МэВ/нуклон. Несмотря на накопленный богатый экспериментальный материал и целый ряд теоретических работ, в настоящее время мы еще далеки от построения единой картины реакций с тяжелыми ионами при низких энергиях.

В глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов физики столкнулись с принципиально новым явлением - существованием специфического ядерного комплекса, двойной ядерной системы (ДЯС). На начальной стадии столкновения ядер происходит быстрая диссипация кинетической энергии относительного движения, и образуется ДЯС. Вторая стадия характеризуется интенсивным обменом нуклонами, угловым моментом между частями ДЯС, и на третьей стадии система, не достигая состояния статистического равновесия, распадается.

Передача большого числа нуклонов от одного ядра к другому в глубоконеупругих столкновениях приводит к реализации реакций многонуклонных передач. Эволюционируя, ДЯС, в принципе, с определенной вероятностью может пройти через любую макроскопическую конфигурацию, разрешенную законами сохранения числа частиц, заряда и полной энергии. Большое количество данных указывает, что в динамике ДЯС фундаментальную роль играет оболочечная структура взаимодействующих ядер, т.е. ядра ДЯС сохраняют свою индивидуальность. Поэтому для корректного описания реакций многонуклонных передач необходимо применять микроскопические подходы. В первых формулировках транспортных теорий влияние структуры взаимодействующих ядер учитывалось через зависимости транспортных коэффициентов от плотности состояний. Однако в этих моделях используются усредненные вероятности переходов между макросостояниями и оболочечные эффекты не рассматриваются явно, не учитываются особенности

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук Р. В. Джолос  
доктор физико-математических наук П. А. Черданцев

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук А. С. Ильинов  
доктор физико-математических наук В. В. Волков

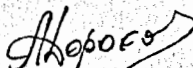
Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт ядерных исследований АН УССР, Киев

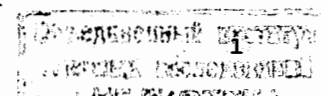
Защита диссертации состоится "02" октября 1991 г. в \_\_\_\_\_ час. на заседании специализированного Совета К.047.01.01 при Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан "02" сентября 1991 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

ученый секретарь специализированного Совета  
кандидат физико-математических наук

  
А. Е. Дорохов



одночастичных спектров партнеров реакции.

Движение нуклонов от одного фрагмента к другому будет определять изменение зарядовой (массовой) асимметрии системы. Поэтому чрезвычайно интересно в рамках микроскопического подхода рассмотреть динамику зарядовых (массовых) распределений в широком диапазоне  $Z(A)$ . Выяснение динамических причин распада ДЯС необходимо для объяснения усиления выхода легких частиц в некоторых реакциях по сравнению с предсказаниями испарительной модели.

#### Основные цели работы:

Изучение в рамках предложенного микроскопического подхода влияния оболочечной структуры взаимодействующих ядер на процесс формирования зарядовых и массовых распределений в реакциях многонуклонных передач. Объяснение на его основе ряда экспериментальных данных. Исследование динамических причин распада ДЯС.

**Научная новизна и практическая ценность:** В диссертации сформулирована микроскопическая модель, позволяющая учитывать влияние оболочечной структуры ядер на процесс передачи нуклонов.

Исследовано влияние перенормировки одночастичных энергий, вызванной кулоновским взаимодействием, на зарядовые распределения продуктов реакций многонуклонных передач. Получены уравнения для расчета и исследован процесс одновременной передачи протонов и нейтронов в глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов в рамках предложенной модели. Рассмотрен процесс установления  $N/Z$  равновесия в ДЯС. Получено достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными.

Исследована динамическая связь мод радиального и масс-асимметричного движений, как одна из причин увеличения вероятности распада сильно асимметричных ДЯС, дано объяснение различия выходов легких частиц для различных входных каналов реакции. Проанализировано влияние квантовых и температурных флуктуаций на динамическую устойчивость ДЯС в рамках диффузионной модели с использованием уравнения Фоккера-Планка (УФП)

Проведенное теоретическое изучение динамики ДЯС

позволяет говорить о возможности описания в рамках единого подхода реакций глубоконеупругих передач, квазиделения и слияния. Развита в работе модель может быть использована для расчетов выходов изотопов, удаленных от линии  $\beta$ -стабильности, сечений слияния и вылета легких частиц при столкновении ядер.

**Апробация работы:** Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ. Результаты диссертации были представлены и докладывались на 39-ом (Ташкент, 1989), 40-ом (Ленинград, 1990) и 41-ом (Минск, 1991) Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 6-ом Нордическом совещании по ядерной физике (Копервик, Норвегия, 1989), международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, 1989), научной сессии ОЯФ АН СССР (Москва, 1990), 2-ой Международной школе по ядерной физике (Киев, 1991).

**Публикации:** По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

**Объем работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 127 страниц машинописного текста, включая 32 рисунка, 3 таблицы и библиографический список из 144 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит краткое изложение постановки физической задачи и дает обоснование актуальности и важности исследуемых проблем. Излагается следующая идея микроскопического описания реакций многонуклонных передач. В отличие от микроскопического подхода, где эволюция ДЯС определяется изменением полной энергии системы, в нашем подходе передача нуклонов происходит под действием среднего поля всей системы. Одночастичный потенциал определяется вариацией полной энергии системы по функционалу плотности. Вместо жидкокапельных полных энергий в рассмотрение входят одночастичные схемы уровней с соответствующими энергиями отделения нуклонов. Кулоновское взаимодействие ядер можно учесть с помощью кулоновского сдвига протонных одночастичных уровней. Вращение ДЯС в

микроскопическом подходе проявляется в кориолисовом расщеплении, энергия симметрии — в изоспиновой зависимости одночастичного потенциала.

Первая глава посвящена разработке микроскопического метода для описания зарядовых (массовых) распределений реакций многонуклонных передач.

В § 1 приведены основные экспериментальные данные, подтверждающие важную роль оболочечных эффектов в эволюции ДЯС.

В § 2 сформулирована модель микроскопического описания реакций многонуклонных передач. Использовался простой вид гамильтониана ДЯС

$$H = \sum_p E_p a_p^+ a_p + \sum_T E_T a_T^+ a_T + \sum_{p,T} (g_{pT} a_p^+ a_T + \text{h.c.}),$$

где  $E_p$ ,  $E_T$  — одночастичные энергии в налетающем ядре и ядре-мишени, соответственно. Было показано, что, не прибегая к усреднению матричных элементов перехода по многим оболочечным конфигурациям, можно получить выражения для вероятностей переходов, содержащие явно эффекты оболочечной структуры ядер. Изменение во времени вероятности нахождения системы в состоянии, когда заряд легкого фрагмента  $Z$ , определяется мастер-уравнением

$$\dot{P}_z = \Delta_{z+1}^{(-)} P_{z+1} + \Delta_{z-1}^{(+)} P_{z-1} - (\Delta_z^{(-)} + \Delta_z^{(+)}) P_z \quad (1)$$

с транспортными коэффициентами

$$\Delta_z^{(-)} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{p,T} |g_{pT}|^2 n_T^z(\tau) (1 - n_p^z(\tau)) \frac{\sin^2 \left( \frac{\Delta t}{2\hbar} (E_p^z - E_T^z) \right)}{(E_p^z - E_T^z)^2 / 4} \quad (2)$$

выражение для  $\Delta_z^{(+)}$  получается из (2) заменой  $n_p$  на  $n_T$  и наоборот. Здесь  $g_{pT}$  характеризует интенсивность перехода нуклонов из состояния  $p$  налетающего иона в состояние  $T$  ядра-мишени,  $n_{p,T}^z$  — температурные числа заполнения. Особенности одночастичного спектра непосредственно учитываются в расчетах вероятностей перехода  $\Delta_z^{(\pm)}$ .

В § 3 проведен анализ роли оболочечных эффектов в эволюции ДЯС в рамках модели с вырожденными оболочками. В

такой модели оболочечные эффекты должны проявляться наиболее отчетливо. Особое внимание было уделено вычислению вероятности образования конфигураций ДЯС с большими значениями зарядовой асимметрии. Выполненные расчеты хорошо воспроизводят экспериментальные тенденции.

Во второй главе исследовано влияние перенормировки одночастичных энергий протонов, обусловленной кулоновским взаимодействием, на зарядовые распределения продуктов реакций многонуклонных передач.

В § 1 показано, что учет взаимного влияния средних полей ядер приводит к изменению разности одночастичных энергий протонов в (2)

$$E_p^z - E_T^z \rightarrow \tilde{E}_p^z - \tilde{E}_T^z = E_p^z - E_T^z + \frac{(z_T - z_p) e^2}{2R} \quad (3)$$

Вследствие дальнедействующего характера кулоновское взаимодействие дает основной вклад в сдвиг уровней. В (3)  $Z_p$ ,  $Z_T$  — заряды фрагментов,  $R$  — расстояние между ними. В сильно асимметричных конфигурациях из-за кулоновского взаимодействия поверхность Ферми протонов легкого фрагмента оказывается выше, чем в тяжелом. Это приводит к увеличению вероятности образования асимметричных конфигураций ДЯС по сравнению с рассмотрением без учета кулоновского взаимодействия.

В § 2 приведены результаты расчета зарядовых распределений продуктов реакций  $^{52}\text{Cr}$  (378 МэВ) +  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{51}\text{V}$  (447 МэВ) +  $^{197}\text{Au}$  и  $^{20}\text{Ne}$  (175 МэВ) +  $^{197}\text{Au}$ . Для вычисления  $\Delta_z^{(\pm)}$  с учетом (3) были использованы реалистические одночастичные схемы уровней. Было показано, что влияние оболочечных эффектов на процесс передачи нуклонов наиболее существенно для асимметричных конфигураций ДЯС, когда расстояние между одночастичными уровнями легкого фрагмента больше рассматриваемых значений термодинамической температуры ( $\tau$ ). Результаты расчета оказались чувствительны к предположению об установлении  $N/Z$  равновесия в системе и зависящими от величины времени взаимодействия ( $t_{\text{int}}$ ). Получено достаточно хорошее согласие расчетных и экспериментальных зарядовых распределений. В качестве примера на рис. 1 показано зарядовое распределение

продуктов глубоконеупругих передач реакции  $^{20}\text{Ne}$  (175 МэВ) +  $^{197}\text{Au}$ . Хорошо описывается выход лёгких ядер. При больших  $Z$  становится заметным вклад делительной компоненты.

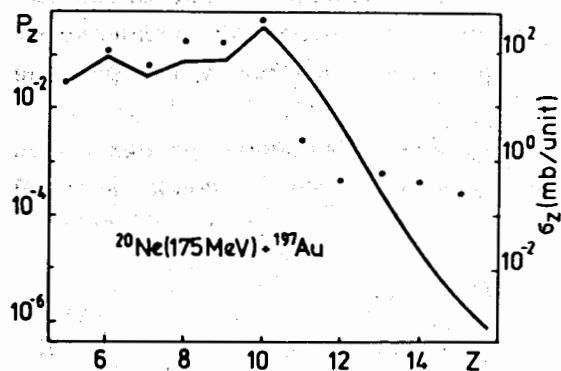


Рис. 1. Зарядовое распределение продуктов глубоконеупругих передач для реакции  $^{20}\text{Ne}$  (175 МэВ) +  $^{197}\text{Au}$ . Сплошная линия - расчет  $P_z$  при  $t_{\text{int}} = 10^{-21}$  с,  $\tau = 1,0$  МэВ. Точками показаны экспериментальные значения сечений  $\sigma_z$ .

В третьей главе исследована одновременная передача протонов и нейтронов в глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов в рамках микроскопической модели. Эта задача становится особенно актуальной в связи с появлением пучков радиоактивных ядер и планируемые эксперименты на них, поскольку расчеты помогут в выборе начальной комбинации сталкивающихся ядер, необходимой для получения максимального выхода интересующих изотопов.

В § 1 сформулирована микроскопическая модель передачи протонов и нейтронов. По сравнению с главой 1, в гамильтониан системы добавлены слагаемые, описывающие нейтронную подсистему. При этом усложняются уравнения (1), а соответствующие транспортные коэффициенты имеют вид, подобный (2). Процесс установления  $N/Z$  равновесия регулируется как изоспиновой зависимостью  $\sigma_{\text{PT}}$ , так и изменением в ходе реакции соотношения между энергиями отделения протонов и нейтронов во фрагментах. Силы симметрии вместе с кулоновским взаимодействием ответственны за относительное различие характерных времен передачи протонов и нейтронов. Зависящая от изоспина часть одночастичного потенциала может быть взята в феноменологическом виде

или получена при варьировании потенциальной части энергии симметрии по функционалу плотности.

В § 2 выбираются параметры расчета. Приводится параметризация матричных элементов  $\sigma_{\text{PT}}$ . Значение  $\Delta t$  фиксировалось равным  $2 \times 10^{-22}$  с. Мы не вычисляли сечения для каждой парциальной волны, а рассматривали некоторую среднюю траекторию, наиболее вероятную для данного столкновения. Из-за малости испарения протонов из продуктов реакции время взаимодействия оценивалось по экспериментальным значениям зарядовых дисперсий.

В § 3 приведены результаты расчетов характеристик реакции  $^{238}\text{U} + ^{40,48}\text{Ca}$ ,  $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ar}$  и  $^{100}\text{Mo} + ^{40}\text{Ar}$ . Получено достаточно хорошее описание экспериментальных данных.

Показано, что процесс установления  $N/Z$  равновесия является монотонным. Рассчитанные сечения образования изотопов легких элементов находятся в согласии с  $Q_{\text{gg}}$ -систематикой. Большой по сравнению с расчетным выход легких частиц может быть объяснен вкладом столкновений с  $l < l_{\text{crit}}$  и увеличением вероятности распада сильно асимметричных конфигураций ДЯС.

Отмечается, что транспортные расчеты, использующие лишь поверхность потенциальной энергии, не могут объяснить больших дисперсий массового распределения при малом изменении  $\langle A \rangle$  для реакции  $^{100}\text{Mo} + ^{40}\text{Ar}$  (270 МэВ). В рамках нашей модели, учитывающей явно оболочечную структуру взаимодействующих ядер, этот экспериментальный результат удается описать (рис. 2).

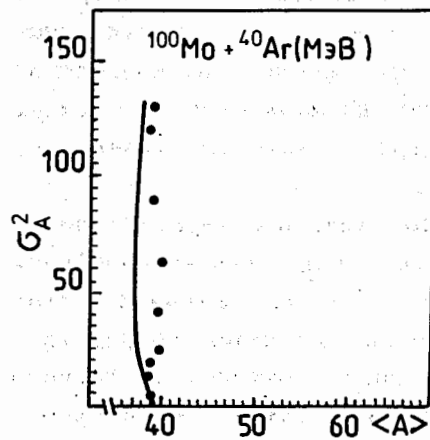


Рис. 2. Зависимость массовой дисперсии  $\sigma_A^2$  от среднего значения массового числа легкого фрагмента  $\langle A \rangle$  для реакции  $^{100}\text{Mo} + ^{40}\text{Ar}$  (270 МэВ). Точками изображены экспериментальные данные; линия показывает результаты расчета.

В четвертой главе анализируется динамическая связь движений по радиальной и массасимметричной модам. Благодаря ей наблюдается большой выход легких частиц по сравнению с предсказаниями испарительной модели.

В § 1 получены инерционные параметры ДЯС. Форма ДЯС выбиралась в виде двух слабо перекрывающихся шаров. При решении уравнения Лапласа было определено поле скоростей. Это дало возможность получить выражение для кинетической энергии

$$T = \frac{\mu}{2} (\dot{R} - \xi \dot{\eta})^2 + \frac{1}{2} \bar{B}_{\eta} \dot{\eta}^2,$$

где  $\mu$  — приведенная масса,  $\eta$  — массовая асимметрия ДЯС. Полный массовый коэффициент для  $\eta$ -движения имеет вид

$$B_{\eta\eta} = \mu \xi^2 + \bar{B}_{\eta}$$

а недиагональная часть массового тензора определяется выражением

$$B_{R\eta} = \mu \xi$$

Для  $\eta \rightarrow 0$  как и при рассмотрении деления  $B_{R\eta} \ll \sqrt{\mu B_{\eta\eta}}$ . Однако для больших  $\eta$  это соотношение не выполняется, и кинематическая связь  $R$ - и  $\eta$ -движений становится существенной. Благодаря ей часть кинетической энергии  $\eta$ -моды переходит в кинетическую энергию  $R$ -моды, и система смещается из положения текущего минимума потенциального кармана ( $R_m$ ) к барьеру ( $R_b$ ).

В § 2 получены классические уравнения движения, с помощью которых можно описывать динамику ДЯС в плоскости  $(R, \eta)$ .

В § 3 рассмотрена радиальная зависимость ядро-ядерного потенциала, который определялся сверткой нуклон-нуклонных взаимодействий с известными функциями распределения пространственной нуклонной плотности взаимодействующих ядер. Получено простое выражение для ядерной части взаимодействия тяжелого ядра с  $\alpha$ -частицей.

В § 4 приведены результаты классического расчета. Показано, что такой квантовый эффект, как нулевые колебания очень важен и должен учитываться при рассмотрении. Этот эффект может быть включен в уравнения движения посредством перенормировки радиального ядро-ядерного потенциала. Расчеты показали, что благодаря динамической связи  $R$ - и  $\eta$ -мод

движения система приближается к потенциальному барьеру. Стабильность системы уменьшается при увеличении углового момента. Включение слабого качения в выходной канал и уменьшение радиуса окна между ядрами в процессе эволюции также ведут к росту вероятности распада ДЯС. Малое отклонение  $R$  от  $R_m$  для реакций с ионами  $^{12}\text{C}$  указывает на то, что в этом случае вылет легких частиц может быть объяснен испарением. Противоположная картина наблюдается для реакций с ионами  $\text{Ar}$  и  $\text{Cr}$ . Распад ДЯС, эволюционирующей к составному ядру, будет вносить дополнительный вклад в вылет легких частиц.

В § 5 в рамках диффузионной модели с использованием УФП исследовано влияние квантовых и тепловых флуктуаций на эволюцию ДЯС. УФП решалось методом глобального моментного приближения. В этом подходе последовательно учтены все эффекты, связанные с энергией нулевых колебаний (§ 4), диффузией через потенциальный барьер.

В § 6 обсуждаются результаты диффузионных расчетов. Мы интересуемся относительным выходом легких частиц. Поскольку наш метод решения УФП для области, близкой к входному каналу, переоценивает вероятность распада из-за малой глубины потенциала в реакции  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ , расчет начинался с конфигурации  $^{22}\text{Ne} + ^{215}\text{Fr}$ , которая характеризуется более глубоким радиальным потенциалом. На рис. 3, 4 приведены результаты расчета  $(\bar{R} - R_m)(A_2)$  и дисперсии  $\chi_{RR}(A_2)$  ( $A_2$  — масса легкого фрагмента) для реакций  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  и  $^{12}\text{C} + ^{232}\text{Th}$  при полном моменте системы  $J = 70\hbar$  и различных начальных температурах ( $\tau_0$ ). Хорошо видно, что в случае с  $^{40}\text{Ar}$  относительный выход легких частиц больше. Это подтверждает экспериментальные результаты.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

1. Разработана модель, позволяющая учитывать влияние оболочечной структуры взаимодействующих ядер на процесс формирования зарядовых и массовых распределений в реакциях многонуклонных передач.

2. Показано, что в микроскопическом подходе учет

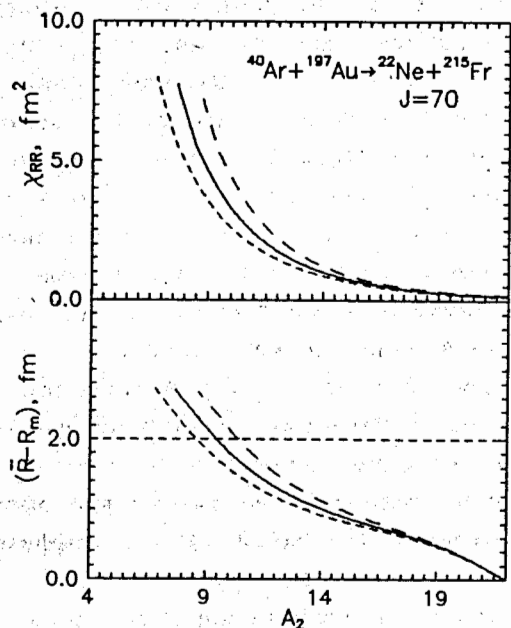


Рис. 3. Зависимости  $\chi_{RR}$  (верхняя часть) и  $(\bar{R}-R_m)$  (нижняя часть) от  $A_2$  для системы, имеющей конфигурацию  $^{22}\text{Ne} + ^{215}\text{Fr}$  во входном канале. Результаты расчета при  $\tau_0 = 1,5, 1,0, 2,0$  МэВ показаны сплошной линией, коротким штрихом и длинным штрихом, соответственно. Горизонтальная штриховая линия в нижней части показывает величину  $(R_b - R_m)$  для  $\alpha$ -частичной конфигурации.

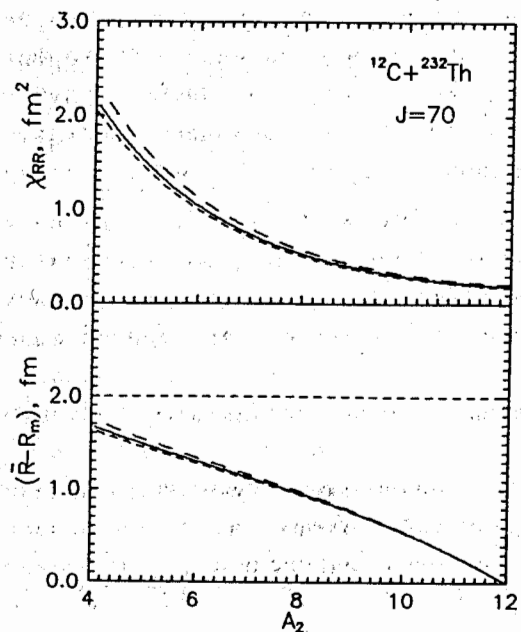


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для системы  $^{12}\text{C} + ^{232}\text{Th}$ .

кулоновского взаимодействия частей ДЯС сводится к перенормировке протонных одночастичных энергий. Этот эффект ведет к значительному возрастанию вероятности образования сильно асимметричных конфигураций.

3. Получено хорошее описание зарядовых распределений продуктов реакций многонуклонных передач. Предложенная микроскопическая модель позволяет исследовать эволюцию ДЯС в широкой области изменения массовой асимметрии. Установлено, что оболочечные эффекты наиболее ярко проявляются в сильно асимметричных конфигурациях ДЯС и оказывают большое влияние на образование легких ядер.

4. В рамках микроскопического подхода получены уравнения для расчета и на их основе исследован процесс одновременной передачи протонов и нейтронов в глубоконеупругих столкновениях тяжелых ионов. Показано, что учет изоспиновой зависимости одночастичного потенциала необходим при описании экспериментальных данных. Расчетные сечения образования легких элементов находятся в согласии с  $Q_{gg}$ -систематикой. Анализ результатов расчета позволил сделать вывод о существовании наряду с однонуклонными кластерных передач в ДЯС. Подтверждены выводы экспериментальных работ о том, что процесс установления  $N/Z$ -равновесия в тяжелых системах является монотонно непрерывным.

5. Предложено объяснение усиления выхода легких частиц в ряде реакций с тяжелыми ионами. Для этого проанализирована связь радиальной и массасимметричной мод движения ДЯС. Она мала в симметричных конфигурациях и сильно возрастает с увеличением массовой асимметрии. За счет этой динамической связи кинетическая энергия массасимметричной моды переходит в энергию радиального движения и система приближается к потенциальному барьеру. В рамках диффузионной модели на основе уравнения Фоккера-Планка рассмотрено влияние квантовых и тепловых флуктуаций на эволюцию ДЯС. Показано, что квантовые флуктуации приводят к перенормировке ядро-ядерного потенциала и играют большую роль в описании распада системы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Антоненко Н.В., Джолос Р.В. Влияние оболочечных эффектов на образование легких ядер в столкновениях тяжелых ионов. - ЯФ, 1989, т.50, с.98-105.
2. Антоненко Н.В., Джолос Р.В. Кулоновские эффекты в микроскопической теории реакций многонуклонных передач. - ЯФ, 1990, т.51, с.690-696.
3. Antonenko N.V., Jolos R.V. Influence of the shell effects on the charge distributions of the heavy-ion reaction products. - Physica Scripta, 1990, v.T32, p.27-30.
4. Antonenko N.V., Jolos R.V. The microscopic treatment of proton and neutron multiple transfere in DIC. - Z.Phys.A.-Hadrons and Nuclei, 1991, v.A338, p.423-430.
5. Антоненко Н.В., Джолос Р.В. Механизм усиленного выхода легких частиц в реакциях многонуклонных передач. - Тезисы докл. 41-го Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. - Л.: Наука, 1991, с.358. Принята для публикации в Z.Phys.A.-Hadrons and Nuclei.
6. Antonenko N.V., Jolos R.V. Mechanism of enhanced yield of light particles in compound nucleus formation: Diffusion description. - Preprint JINR, E4-91-213, Dubna: JINR, 1991, 12 p. Принята для публикации в Z.Phys.A.-Hadrons and Nuclei.

Рукопись поступила в издательский отдел

25 июля 1991 года.