

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

7-2002-259

На правах рукописи

ДЕНИКИН
Андрей Сергеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУКЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
К АНАЛИЗУ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С УЧАСТИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2002

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

доктор физико-математических наук,
профессор

Валерий Иванович Загребаяев

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,
профессор

Вадим Евгеньевич Бунаков

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Сергей Николаевич Фадеев

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Российский научный центр «Курчатовский институт»

Защита состоится 26 декабря 2002 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.16 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
физико-математических наук



О.В. Чубинский-Надеждин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. На протяжении своей истории физика тяжелых ионов остается динамично развивающейся наукой, решающей как фундаментальные, так и прикладные задачи. За эти годы был накоплен богатый и интересный экспериментальный материал. Однако полновесный анализ этих данных и извлечение из них максимального количества полезной информации о структуре ядер и динамике ядерных реакций весьма затруднительны. Причины этого заключаются, с одной стороны, в характере этих данных (зачастую инклюзивных и неполных), а, с другой, в отсутствии адекватных теоретических моделей, способных в деталях описать все наблюдаемые закономерности.

Столкновение тяжелых ионов – чрезвычайно сложный процесс. При больших энергиях количество открытых каналов реакции становится очень велико. Положение усугубляется их сильной связью. На данный момент наиболее хорошо разработаны теоретические подходы к описанию прямых одноступенчатых процессов и статистические модели. Применимость этих подходов ограничена, в силу уменьшения роли прямых процессов при низких энергиях и доли процессов образования составного ядра при увеличении энергии столкновения. Кроме того, применение подходов, основанных на статистических моделях ядра (более простых и наиболее развитых на данный момент), позволяет вычислить лишь усредненные величины (например, массовые или энергетические распределения). При этом исключаются когерентные формы движения нуклонов, и любые интерференционные явления, поскольку теория оперирует напрямую с вероятностями, а не с волновыми функциями и амплитудами переходов. С немалыми трудностями приходится сталкиваться при решении точной многоканальной задачи столкновений тяжелых ионов. Большое число каналов, трудность выбора параметров связи каналов, громоздкость и длительность расчетов приводит зачастую к невозможности использования таких схем.

С другой стороны, малость де-Бройлевской длины волны сталкивающихся частиц λ и высокая плотность возбуждаемых уровней делает возможным использование приближенных методов расчета, по крайней мере, для оценки величины сечений и качественного понимания механизма исследуемого процесса. К таким методам можно отнести классический подход к описанию динамики столкновения тяжелых ионов. Возможность использования классических уравнений движения требует своего обоснования. Критерий применимости классического подхода

$$\left| \frac{d\lambda}{dr} \right| \ll 1 \quad (1)$$

хорошо выполняется для тяжелых ионов большой массы и лишь в ограниченном числе слу-

чаев для легких систем (большие энергии и/или периферические процессы). Тем не менее, даже когда условие (1) не выполнено строго, результаты классических расчетов «схватывают» основные особенности процесса, проявляющиеся в эксперименте. Безусловно, в рамках классического подхода мы теряем возможность описания квантовых эффектов, например, интерференционных явлений. С другой стороны, точно решаемая классическая задача оперирует такими понятиями как траектория, прицельный параметр, угол рассеяния и может дать более наглядное понимание исследуемых явлений. В рамках классической динамики несравнимо легче решать многочастичные задачи, задачи с большим числом степеней свободы (вращательных, колебательных, нуклонных) и, следовательно, задачи с учетом большего числа выходных каналов реакции. Выбрав степени свободы, оказывающие наибольшее влияние на изучаемые процессы, мы можем получить не только качественное, но и вполне удовлетворительное количественное описание изучаемого явления. Поэтому применение этих методов не только оправдано, но и весьма продуктивно при описании столкновений тяжелых ионов.

Целью работы является:

(1) Развитие и использование полуклассических методов анализа столкновений тяжелых ионов, основанных на решении системы классических уравнений движения ядер с эффективным учетом внутриядерных (коллективных и одночастичных) степеней свободы и принципа Паули для нуклонов. Применение этих методов для анализа упругого и неупругого рассеяния и полного слияния деформированных ядер при околобарьерных энергиях столкновения. Изучение процессов образования и распада квазимолекулярных состояний двойной ядерной системы, проявления хаотического и регулярного режима рассеяния деформированных ядер, нелинейного характера динамики столкновения.

(2) Проведение сравнительного анализа механизмов образования быстрых легких частиц (главным образом нуклонов), образующихся в ядро-ядерных столкновениях при низких и промежуточных энергиях ($E \leq 100$ МэВ/нуклон) в рамках четырехтельной классической модели. Выяснение роли диссипативных ядерных сил, средних полей и нуклон-нуклонных столкновений в процессе образования быстрых легких частиц.

(3) Изучение возможности использования полуклассической модели для анализа связанных состояний малонуклонных систем, изучения структуры легких экзотических ядер, процессов кластеризации и самоорганизации в ядерной материи.

Научная новизна и практическая ценность.

Детально изучена динамика рассеяния тяжелых ионов с энергиями вблизи кулоновского барьера в рамках классической модели с учетом дополнительной степени свободы – вращение деформированного ядра мишени. Сформулирована и обоснована теорема о «размытии» параметра орбитирования на «интервал прицельных параметров орбитирования» при рассеянии ядер на деформированной вращающейся мишени. Следствием данной теоремы является увеличение парциального вклада траекторий с прицельными параметрами из «интервала орбитирования» в сечение упругого и неупругого рассеяния, что приводит к присутствию в угловых распределениях изотропной компоненты, характерной для глубоко-неупругих процессов. Также показано, что связь относительного движения ядер всего с одной дополнительной степенью свободы (вращение ядра мишени) приводит к тому, что дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния демонстрируют свойства, присущие обычно сечениям статистических процессов или глубоко-неупругих реакций: изотропная в системе центра масс угловая компонента и максимум в энергетическом распределении, прижатый к кулоновскому барьеру.

Исследованы механизмы образования предравновесных нуклонов в столкновениях тяжелых ионов при низких и промежуточных энергиях. Предложен новый механизм образования сверхбыстрых легких частиц, вылетающих из ядра мишени и ускоряемых средним полем налетающего ядра снаряда. Показано, что в столкновениях тяжелых ионов с энергиями на нуклон до 50 А МэВ высокоэнергетическая часть спектров нуклонов формируется в основном за счет испускания быстрых частиц из мишени. Рассчитаны дифференциальные сечения и множественности легких частиц для различных реакций, сделано сравнение с экспериментальными данными и проведен их анализ.

В рамках классической модели проведено исследование связанных состояний малонуклонных систем, таких как $\alpha + N + N$. Для количественного анализа структуры этих ядер вводятся функция плотности начальных состояний и функция среднего времени жизни долгоживущих событий, которые сопоставляются с рассчитанной в квантовом подходе пространственной корреляционной плотностью нуклонов в ядре. Показано, что как в квантовом, так и классическом случае, внутренняя структура ядер с $A = 6$ (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^6\text{Be}$) имеет две компоненты: «динейтрон» и «сигара». Продемонстрировано качественное сходство результатов квантового и классического подхода.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на 46, 47,

49 и 50 международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1996, 1997, 1999 и 2000 гг.), на международном симпозиуме «Large-scale collective motion of atomic nuclei» (Messina, Italy, 1996), на 6-ой и 7-ой международных школах-семинарах по физике тяжелых ионов («Heavy Ion Physics», Дубна, 1997 и 2002 гг.), на международном семинаре «Joint Study Weekend – Halo 2000» (Brussels, 2000). Результаты работы обсуждались на семинарах кафедры теоретической физики Чувашского госуниверситета, Лаборатории Ядерных Реакций ОИЯИ и опубликованы в работах [1 – 7].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 138 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 175 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и значимость исследуемых проблем. Сформулированы цели работы и кратко изложены структура и материал диссертации.

В первой главе дается краткий обзор теоретических моделей и методов анализа ядерных реакций с участием тяжелых ионов, основанных на решении классических уравнений движения, учитывающих реалистические формы ядро-ядерного потенциала взаимодействия, действие диссипативных и стохастических сил и применяемые в широком диапазоне масс и энергий сталкивающихся ядер. Обсуждаются границы применимости этих подходов, некоторые результаты и выводы, вытекающие из этих моделей. Сделан краткий обзор методов анализа нелинейных динамических систем и их применения к анализу ядерной динамики.

В первом разделе формулируются основные принципы построения двухтельной классической модели столкновения тяжелых ионов. Показано, что применение такого упрощенного подхода к анализу реакций рассеяния тяжелых ионов уже позволяет воспроизвести и наглядно объяснить целый ряд экспериментально наблюдаемых явлений, таких как кулоновское и ядерное радужное рассеяние, орбитирование и глюория. В разделе приведены основные формулы расчета дифференциальных сечений упругого рассеяния на основе поля классических траекторий и функции угла отклонения.

Во втором разделе дается обзор методов классической молекулярной динамики и моделей, учитывающих явно коллективные степени свободы ядер – вращение и колебание ядерных поверхностей. В рамках классической молекулярной динамики сталкивающиеся яд-

ра трактуются как системы, состоящие из нескольких фрагментов (например, из A нуклонов), взаимодействующих друг с другом и с фрагментами другого ядра. При этом основное состояние ядер приготавливается с учетом экспериментальных значений энергии связи и полного углового момента ядра. В рамках данного подхода может быть рассмотрено большое число выходных каналов – упругое рассеяние, реакции передач, развала, полного и неполного слияния.

При столкновении тяжелых ионов низких энергий (< 10 МэВ/нуклон) важную роль играют коллективные моды ядерного движения, такие как вращение ядер и колебание ядерных поверхностей, а также процессы нуклонных передач. Разложение радиуса ядра в ряд по степеням параметров деформации позволяет явно учесть изменение потенциальной энергии взаимодействия при вращении и динамической деформации ядер. С помощью таких подходов довольно успешно описываются процессы слияния и глубоко-неупругого рассеяния тяжелых ионов.

Возбуждение большого числа внутренних степеней свободы можно эффективно описать введением в классические уравнения дополнительных диссипативных членов. В третьем разделе обсуждаются два модельных подхода к этой проблеме: модель поверхностного трения и модель «однотельной» диссипации. Учет диссипативных процессов, вращения ядер и колебания ядерных поверхностей позволяет значительно расширить область применимости классического подхода к анализу реакций тяжелых ионов. В четвертом разделе обсуждается влияние, оказываемое на медленные коллективные моды движения со стороны быстрых нуклонных степеней свободы, возбужденных в ходе столкновения. Такое влияние учитывается введением дополнительных флуктуаций (случайной силы) и переходом от ньютоновских уравнений к уравнениям Ланжевена, что в частности, позволяет более детально описывать процессы глубоко-неупругого рассеяния, слияния и деления атомных ядер.

В пятом разделе приводятся наиболее часто используемые феноменологические ядро-ядерные потенциалы взаимодействия.

Атомное ядро является ярким примером нелинейной динамической системы, характеризующейся неустойчивостью фазовых траекторий и проявлением хаотического режима движения. В шестом разделе описаны основные методы анализа нелинейных динамических систем и современное состояние дел в изучении хаотических классических и квантовых систем в приложении к ядерно-физическим задачам.

При столкновениях сравнительно легких ядер ($A \leq 30$) с энергией вблизи кулоновско-

го барьера в различных каналах реакции экспериментально обнаружено существование большого числа сравнительно узких резонансов нестатистического характера. Для объяснения такого поведения уже давно была выдвинута гипотеза об образовании промежуточного квазимолекулярного ядерного состояния. Во второй главе в рамках классической модели исследуется влияние дополнительной степени свободы – вращения деформированного ядра мишени – на динамику ядро-ядерных столкновений при околорезонансных энергиях. Эффективная потенциальная энергия такой системы становится сложной функцией деформации и взаимной ориентации ядер с набором локальных минимумов, в которых могут реализоваться квазимолекулярные состояния. Сильная связь степеней свободы приводит к локальной неустойчивости фазовых траекторий и хаотическому характеру рассеяния, когда угол отклонения и переданный угловой момент (как функции прицельного параметра соударения и угла начальной ориентации мишени) содержат области хаотического и регулярного характера (случай мягкого хаоса). Стохастический характер рассеяния ядер в данном случае обусловлен образованием и распадом именно квазимолекулярных ядерных состояний. При ненулевой деформации мишени ядра захватываются в потенциальном кармане и проводят в области взаимодействия значительное время, в десятки и в сотни раз превышающее характерное время ядерного взаимодействия, «забывая» о входном канале и начальных условиях.

Локальная неустойчивость траекторий проявляется в виде флуктуаций угла отклонения $\Theta(\varphi_0)$ как функции начальной ориентации мишени φ_0 при фиксированном прицельном параметре b . Функция $\Theta(\varphi_0)$ становится фракталом, т.е. объектом, топологическая размерность которого является дробной величиной. Так называемая размерность Хаусдорфа D для $\Theta(\varphi_0)$ может быть определена численно методом «подсчета клеток». Показано, что для случая регулярного рассеяния величина $D = 1$, а для случая жесткого хаоса в системе $D = 0$. Исследована зависимость D от прицельного параметра и сформулирована следующая теорема. (1) При малых статических деформациях ядра для любого b из некоторого интервала прицельных параметров Δb_{orb} можно найти начальный угол ориентации мишени $\tilde{\varphi}_0$, такой что угол рассеяния $\Theta(b, \tilde{\varphi}_0) \rightarrow -\infty$, при этом размерность $D(b \in \Delta b_{orb}) < 1$. (2) При больших деформациях ядра угол $\tilde{\varphi}_0$ существует для любого $b \in [0, b_{gr}]$ (где b_{gr} – параметр касательного столкновения), а функция $D(b)$ при $b \in \Delta b_{orb}$ имеет минимум. Другими словами, при ненулевой деформации мишени происходит размытие параметра орбитирования b_{orb} на некоторый «интервал орбитирования» Δb_{orb} , смещенный в область несколько больших b , где эффективное поглощение во упругом канале становится меньше, что приводит к большему

вкладу траекторий с такими прицельными параметрами в сечение упругого и неупругого рассеяния.

Проведены расчеты основных характеристик рассеяния и выполнено сравнение с имеющимися экспериментальными данными для случая взаимодействия ядер ^{12}C и ^{28}Si с деформированным ядром мишени ^{24}Mg . Рассчитанные численно дифференциальные сечения неупругого рассеяния позволяют сделать следующий важный вывод. Учет всего лишь одной дополнительной нелинейной степени свободы (помимо относительного движения) приводит к тому, что система начинает демонстрировать стохастические свойства, приписываемые обычно статистическим процессам (образование и распад составного ядра) или глубоко-неупругим реакциям, протекающим с участием большого числа степеней свободы, а именно: (а) наличие в системе центра масс изотропной компоненты в угловых распределениях, (б) наличие неупругой компоненты в энергетических спектрах продуктов реакции, «прижатой» к кулоновскому барьеру выходного канала.

Дополнительно был проведен анализ процессов слияния ядер в рамках классической модели, учитывающей явно связь относительного движения с внутренними степенями свободы (вращение и динамическая деформация ядра мишени) и диссипативные ядерные силы. Продемонстрировано качественное описание явления и удовлетворительное количественное согласие с экспериментальными данными. И хотя в рамках классического подхода невозможно полностью описать экспериментальные данные по слиянию ядер в области подбарьерных энергий в силу квантовой природы этого процесса, классическая модель имеет определенную предсказательную силу, что, вместе с простотой, выгодно отличает ее от более сложных квантовых подходов (в частности, от метода связанных каналов).

В третьей главе в рамках четырехчастичной классической модели ядро-ядерных столкновений (близкой по духу моделям малочастичной молекулярной динамики) исследована роль средних ядерных полей и нуклон-нуклонных столкновений в процессе формирования предравновесных легких частиц при столкновении тяжелых ионов средних и промежуточных энергий.

В данной модели ядра снаряда (P) и мишени (T) представляются в виде двухчастичных подсистем: $P = A + a$ и $T = B + b$, где символами A и B обозначены тяжелые коры, а символами a и b – легкие фрагменты (например, n, p, d, t, α). Взаимодействие фрагментов описывают шесть парных потенциалов с параметрами, выбранными на основе соответствующих экспериментальных данных. В уравнения движения введены также феноменологи-

ческие диссипативные ядерные силы, действующие между тяжелыми ядрами A и B . Для более корректной оценки абсолютных величин канальных сечений при описании относительного движения частиц $a+B$ и $b+A$ учитывается вероятность поглощения легкого фрагмента тяжелым (уход из упругого канала). Вероятность поглощения определяется в квазиклассическом подходе с использованием средней длины свободного пробега, которая известным образом связана с мнимой частью оптического потенциала. В предложенной модели рассматриваются восемь возможных каналов реакции, дающих вклад в полное сечение выхода предравновесных легких частиц: каналы развала, передач и неполного слияния.

Сравнительный анализ вкладов различных механизмов в энергетический спектр предравновесных легких частиц, образованных в ядро-ядерных столкновениях при промежуточных энергиях ~ 50 МэВ/нуклон, показал, что наиболее быстрые легкие частицы вылетают из ядра мишени, а не из ядра снаряда, как это предполагалось до сих пор. Можно выделить три основных механизма вылета быстрой легкой частицы нейтрона. Для простоты будем говорить здесь об испускании нейтрона, пренебрежем искажением траекторий тяжелых фрагментов и будем считать, что их массы много больше масс испускаемых легких частиц. (1) Вылет нейтрона через открывающееся потенциальное окно из ядра снаряда при его столкновении с мишенью (механизм «выплескивания»). В этом случае скорость фермиевского движения нейтрона внутри снаряда v_F складывается со скоростью движения центра масс снаряда v_0 . При этом, если пренебречь энергией связи нейтрона $E_0 \gg E_{sep}^n$ и считать, что $v_0 \approx v_F$, тогда максимальная энергия, которую может приобрести нейтрон, равна

$$E_{\max} \approx \frac{m}{2} (v_0^2 + 2v_0v_F) = 3 \frac{mv_0^2}{2} = 3E_0,$$

где E_0 – энергия пучка, рассчитанная на один нуклон. (2) Вылет нейтрона в результате нуклон-нуклонного столкновения. В этом случае нейтрон (как снаряда, так и мишени) приобретает максимальную скорость, если в результате упругого столкновения нуклон отдачи будет иметь нулевую скорость. Энергия вылетевшего нейтрона (при $E_0 \gg E_{sep}^n$ и $v_0 \approx v_F$) в этом случае равна

$$E_{\max} \approx \frac{m}{2} (v_0 + v_F)^2 = 4 \frac{mv_0^2}{2} = 4E_0.$$

При энергиях столкновения на нуклон меньших энергии Ферми ϵ_F , на вероятность нуклон-нуклонного столкновения внутри ядер большое влияние оказывает принцип запрета Паули и данный механизм вылета быстрых легких частиц практически не дает вклада в их полное се-

чение выхода. (3) Механизм вылета быстрых легких частиц из мишени основан на их уско- рении средним полем налетающего ядра снаряда. Для иллюстрации этого эффекта рассмот- рим случай упругого столкновения нейтрона с бесконечно тяжелой двигающейся стенкой. Пусть нейтрон движется со скоростью v_n навстречу отталкивающей стенке, которая в свою очередь имеет противоположно направленную скорость v_0 . В системе центра масс скорость нейтрона равна $v_{цм} = -(v_0 + v_n)$, а после упругого столкновения $v'_{цм} = -v_{цм} = (v_0 + v_n)$, что в лабораторной системе координат дает $v'_n = v'_{цм} + v_0 = (2v_0 + v_n)$. Если теперь $E_0 \gg E_{sep}^n$, $v_0 \approx v_n$ и $v_n \approx v_F$, тогда максимальная энергия вылетающего нейтрона может достигать

$$E_{\max} \approx \frac{m}{2} (4v_0^2 + 4v_0v_F) = 8 \frac{mv_0^2}{2} = 8E_0,$$

что более чем в два раза превышает соответствующий предел для нейтронов снаряда. Упру- гое столкновение с отталкивательной стенкой кинематически эквивалентно рассеянию ней- трона на $\theta_{цм} = -180^\circ$ (т.е. орбитированию) в притягивающем среднем поле. При больших относительных скоростях нейтрона и снаряда возможно отклонение нейтрона лишь на неко- торый предельный отрицательный угол $\theta_R > -180^\circ$, называемый углом радужного рассеяния. Поэтому максимальная энергия нейтронов, вылетающих из мишени, сильно зависит от энер- гии столкновения, потенциала взаимодействия нуклона мишени и ядра снаряда, энергии свя- зи нуклона в мишени и диссипативных ядерных сил, влияющих на скорость налетающего ядра-снаряда в момент его перекрытия с ядром мишени.

Показано, что механизм образования быстрых нуклонов из мишени доминирует при столкновении тяжелых ионов с энергиями $E_0/A \leq \varepsilon_F$, и полностью формирует жесткую часть спектра легких частиц. При больших энергиях основной вклад в жесткую часть спек- тра легких частиц начинают давать нуклон-нуклонные столкновения. В рамках предложен- ной модели рассчитаны дифференциальные сечения и множественности выхода протонов и нейтронов для нескольких реакций. Сделано сравнение с экспериментальными сечениями и проведен их анализ. Показано, что спектры легких частиц чувствительны к величине фено- менологических диссипативных сил. Таким образом, систематическое исследование таких спектров может позволить более точно определить значения параметров этих сил.

В четвертой главе в рамках классической молекулярной динамики проведен анализ связанных состояний малонуклонных систем на примере трехкластерных ядерных систем с $A=6$ (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$). Теоретические и экспериментальные исследования структуры этих

легких ядер показали, что их основное и низколежащие возбужденные состояния имеют ярко выраженную трехчастичную природу и поэтому могут быть представлены в виде трехкластерной системы $\alpha + N + N$, где символ N соответствует протону или нейтрону. Численное решение трехчастичного уравнения Шредингера показывает, что волновая функция такой системы имеет две ярко выраженные компоненты: «динуклонную», когда два валентных нуклона двигаются коррелированно по одну сторону от α -частицы, и «сигарообразную», когда движение нуклонов по разные стороны от α -кора почти независимо.

Изучение связанных состояний системы нескольких тел в рамках классической механики сопряжено с некоторыми трудностями. В частности, классическая система трех и более сильно взаимодействующих тел даже при отрицательной полной энергии нестабильна относительно испускания частиц за счет образования «пересвязанных» состояний отдельных фрагментов, несуществующих в реальном квантовом случае. Такое поведение классической системы, казалось бы, полностью исключает возможность изучения динамики связанных состояний атомных ядер в рамках классической механики. Однако среди всего набора различных начальных конфигураций подобных систем существуют состояния, время жизни которых значительно превышает характерное время одного обращения ее фрагментов вокруг общего центра масс. Можно предположить, что именно эти наиболее долгоживущие конфигурации должны реализоваться с наибольшей вероятностью и соответствовать реалистическим связанным состояниям исследуемой системы. Приготавливая случайным образом начальную конфигурацию системы (случайный выбор координат и скоростей частиц при фиксированных значениях полной энергии и углового момента, соответствующих основному состоянию данного ядра), мы можем исследовать структуру и динамику наиболее долгоживущих состояний, предполагая, что именно они являются наиболее вероятными и реализующимися в действительности.

Вычисленная для системы $\alpha + n + n$ эффективная потенциальная энергия $V_{эфф}(r, R)$ как функция координат $r \equiv r_{nn}$ (расстояние между валентными нуклонами) и $R \equiv R_{\alpha(nn)}$ (расстояние между α -кором и ц.м. двух нуклонов) обладает следующими свойствами. При нулевом орбитальном моменте валентных нуклонов $l_{1,2} = 0$ функция $V_{эфф}(r, R)$ имеет один минимум при $r = R = 0$. При $l_{1,2} = 1$ функция $V_{эфф}(r, R)$ разделена эффективным барьером вдоль линии $r = \frac{4}{3}R$ и имеет два минимума, локализованные вдоль при малом r и большом R («динейтрон») и при большом значении r и малом R («сигара»).

В работе введены функции плотности начальных состояний $\rho(r, R)$ и среднего вре-

мени жизни $\tau(r, R)$, которые сравниваются с квантовой пространственной корреляционной плотностью распределения валентных нуклонов $P(r, R)$, рассчитанной в квантовом подходе. Показано, что при наличии у валентных нуклонов ненулевого орбитального момента, как в квантовом, так и в классическом случае в структуре исследуемых систем появляется две ярко выраженные конфигурации: «динуклонная» и «сигарообразная». Относительные веса и положение этих компонент определяются потенциалами парных взаимодействия кластеров.

Близость классической и квантовой корреляционных плотностей трехтелных ядерных систем позволяет использовать построенную модель также для анализа столкновений таких ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ с различными мишенями, используя в качестве начальных конфигурации приготовленные заранее долгоживущие состояния этих ядер. Другим направлением развития данной модели является переход к изучению мультикластерных систем с $N > 3$, анализ которых в рамках точных квантовых подходов затруднителен.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Детальное исследование процесса околобарьерных ядро-ядерных столкновений в рамках классической модели с учетом дополнительной степени свободы – вращения деформированного ядра мишени. Выводы о динамике этого столкновения, возможности образования и распада квазимолекулярного состояния, хаотическом характере движения ядер, флуктуаций наблюдаемых величин в зависимости от начальных условий и параметров системы.

2. Сформулирована и обоснована теорема о том, что при малых статических деформациях мишени происходит «размытие» прицельного параметра орбитирования b_{orb} на некоторый «интервал орбитирования» Δb_{orb} такой, что для любого $b \in \Delta b_{orb}$ существует угол начальной ориентации мишени $\tilde{\varphi}_0$, для которого $\Theta(b, \tilde{\varphi}_0) \rightarrow -\infty$; При больших деформациях угол $\tilde{\varphi}_0$ существует для любого b , меньшего параметра касательного столкновения.

3. В рамках классической модели столкновения деформированных вращающихся ядер рассчитаны дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния для реакций ${}^{12}\text{C}(E_{цм} = 25\text{МэВ}) + {}^{24}\text{Mg}$ и ${}^{28}\text{Si}(E_{цм} = 30\text{МэВ}) + {}^{24}\text{Mg}$. Показано, что в системе с тремя степенями свободы (две для относительного движения + плоское вращение деформированного ядра) наблюдаются явления, которые обычно приписываются глубоко-неупругим процессам и/или процессам образования и распада составного ядра, а именно, (а) наличие изотропной (в системе центра масс) компоненты в угловых распределениях и (б) наличие неупругой компоненты, «прижатой» к кулоновскому барьеру выходного канала, в энергетических

спектрах продуктов реакции. Такое поведение сечений обусловлено распадом долгоживущих ядерных квазимолекулярных состояний, образующихся в столкновениях с $b \in \Delta b_{orb}$.

4. В рамках точно решаемой четырехчастичной полуклассической модели столкновения тяжелых ионов исследованы механизмы образования предравновесных легких частиц в тяжело-ионных столкновениях при низких и промежуточных энергиях: срыв со снаряда, вылет из мишени и вылет в результате нуклон-нуклонного столкновения. Показано, что при энергиях пучка меньших $A \cdot \varepsilon_F$ наиболее быстрые легкие частицы вылетают из ядра мишени, а не из ядра снаряда как это предполагалось ранее. Найдено косвенное экспериментальное подтверждение этому выводу. При энергиях больших $A \cdot \varepsilon_F$ основную роль в процессе образования быстрых легких частиц играют нуклон-нуклонные столкновения. В рамках модели рассчитаны дифференциальные сечения выхода легких частиц и проведено их сравнение с экспериментальными данными. Исследована роль ядро-ядерного взаимодействия и ядерных сил трения в динамике образования быстрых легких частиц.

5. Трехчастичная классическая модель использована для анализа структуры и динамики внутриядерного движения малонуклонных систем $\alpha + N + N$ на примере триплета ядер с $A = 6$: ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^6\text{Be}$. Показано, что долгоживущие состояния классической трехчастичной системы соответствуют реалистическим связанным состояниям исследуемых ядер. Дано наглядное классическое объяснение появлению у классической трехчастичной системы двухкомпонентной структуры («динейтрон» и «сигара»). На основе качественного сходства результатов классического и квантового расчетов сделан вывод о возможности в дальнейшем использования развитой модели для анализа процессов столкновения легких ядер и для изучения мультикластерных систем с $N > 3$.

Представленные в диссертации результаты опубликованы в работах:

- [1]. Деникин А.С., Загребаев В.И. Околобарьерное рассеяние и слияние деформированных ядер: хаос, флуктуации и ядерные квазимолекулы// Изв. РАН. Сер. Физ. 1997. Т.61. С. 819 – 827.
- [2]. Denikin A., Zagrebaev V. Fluctuation and chaotic motion in collision of light heavy ions// Proc. Intern. Symp. “Large scale collective motion of atomic nuclei”. Italy, 15-19 October 1996. – Singapore: World Scientific. 1996. – P. 723 – 725.
- [3]. Denikin A., Zagrebaev V. Fluctuation and chaotic motion in collision of light heavy ions: quasimolecular states// Proc. VI Intern. School-Seminar “Heavy Ion Physics”. Dubna, 22-27 September 1997. - Singapore: World Scientific. 1998. – P. 354 – 356.

- [4]. Denikin A. Semiclassical analysis of few-body weakly bound state// Abstract of "HALO - 2000". Brussels, April 28-30, 2000. P.8.
- [5]. Деникин А.С., Загребаев В.И. Квазиклассический анализ связанных состояний малонуклонных систем// Изв. РАН. Сер. Физ. 1999. Т.63. С. 122 – 131.
- [6]. Деникин А.С., Загребаев В.И. Механизмы образования легких частиц при ядроядерных столкновениях// Изв. РАН. Сер. Физ. 2000. Т.64. С. 2253 – 2262.
- [7]. Деникин А.С., Загребаев В.И. Сравнительный анализ механизмов образования быстрых легких частиц в ядроядерных столкновениях при низких и промежуточных энергиях// Ядерная Физика. 2002. Т.65. № 8. С.1459 – 1473.

Получено 13 ноября 2002 г.

Макет Н. А. Киселевой

Подписано в печать 14.11.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 100 экз. Заказ № 53614.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/