Введение

Физика тяжелых ионов на протяжении всей своей истории остается динамично развивающейся наукой [1-11,12,13]. Накопленный обширный экспериментальный материал, развитие теоретических моделей и подходов, совершенствование методики эксперимента позволяют использовать пучки тяжелых ионов в широком диапазоне их масс и энергий для решения фундаментальных и прикладных задач, что, в частности, дало начало целому ряду новых дисциплин, возникших на стыке с другими науками, такими как биология, химия, медицина, физика твердого тела.

С точки зрения решения фундаментальных проблем исследование столкновений тяжелых ионов с атомами и атомными ядрами позволяет напрямую изучать свойства этих объектов, в том числе, путем получения и исследования экзотических состояний ядерных систем. Так в лабораторных условиях научились получать долгоживущие быстро вращающиеся ядра, изотопы элементов с аномальным отношением числа протонов к числу нейтронов (например, ^{5}H, ^{10}He, ^{26}O и др.), изучать процессы, протекающие в сильно нагретых и сверхплотных состояниях, исследовать нелинейные процессы квантовых систем. Целенаправленный поиск и изучение свойств сверхтяжелых ядер привел в последние годы к возможности синтезирования новых химических элементов вблизи предсказанного теоретически «острова ядерной стабильности» в области $Z = 108 \div 120$ [14]. Использование высокоэнергетических встречных пучков ионов золота позволило получить дополнительные доказательства в пользу существования кварк-глюонной плазмы – нового состояния ядерной материи [15].

Несмотря на столь широкие перспективы и тридцатилетнюю историю, физика тяжелых ионов находится лишь в начале своего развития. За эти годы был накоплен необычайно богатый и интересный экспериментальный материал (см., например, [3,4,7-12]). Однако, полновесный анализ этих данных и извлечение из них максимального количества полезной информации довольно затруднительны. Причины этого заключаются, с одной стороны, в характере этих данных (зачастую инклюзивных и неполных), а с другой, в отсутствии адекватных теоретических моделей, спо-

собных в деталях описать все наблюдаемые свойства. До сих пор не удалось установить, например, явный вид межъядерных потенциальных сил. В столкновениях атомных ядер экспериментально наблюдаются диссипативные явления, приводящие к переходу кинетической энергии относительного движения в энергию возбуждения ядер, однако до сих пор до конца не ясен механизм ядерного трения, характер и величина диссипативных ядерных сил.

Большое количество теоретических подходов и экспериментальных исследований посвящено изучению кластерных свойств сложных ядерных систем [12,13]. Получены экспериментальные данные о существовании тяжело-ионной радиоактивности – спонтанное испускание фрагментов типа ^{14}C, ^{24}Ne из тяжелых ядер [12]. Уже в самом начале исследования столкновений тяжелых ионов были обнаружены реакции с образованием ядерных квазимолекулярных состояний [16], до сих пор не нашедшие своего полного объяснения. Все это говорит о том, что внутренние свойства и структура ядер до конца нам не ясны.

Источником информации о динамике тяжело-ионных столкновений (следовательно, о фундаментальных свойствах ядерной материи) могут стать легкие частицы, испускаемые на разных этапах взаимодействия. При столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергиях (~ 10 - 100 МэВ/нуклон) в спектрах испущенных легких частиц наблюдается присутствие частиц со скоростями более чем в два раза превышающими скорость ионов пучка (см. обзор [17]). Косвенные данные свидетельствуют о предравновесном механизме их образования, и, значит, изучение свойств таких частиц позволило бы получать прямую информацию о начальном этапе взаимодействия тяжелых ионов. Существующая на данный момент экспериментальная техника не в состоянии обеспечить непосредственное изучение процессов, протекающих в интервалах времени порядка $10^{-18} - 10^{-21}$ с и, следовательно, не удается экспериментально разделить испарительные и предравновесные легкие частицы. Моделирование же ядерных столкновений в рамках того или иного теоретического подхода не дают исчерпывающего ответа на вопрос о механизме образования быстрых легких частиц.

Столкновение тяжелых ионов – чрезвычайно сложный процесс. При больших энергиях количество открытых каналов реакции становится очень велико. Положение усугубляется их сильной связью. На данный момент хорошо разработаны теоретические подходы к описанию прямых одноступенчатых процессов и статистические модели, в которых исследуются реакции, идущие через образование составного ядра и его последующий равновесный распад. Применимость этих подходов ограниченна, в силу уменьшения роли прямых процессов при низких энергиях и роли составного ядра при увеличении энергии столкновения. Ключевой проблемой теории реакций с участием тяжелых ионов является проблема описания глубоконеупругих процессов (ГНП). Именно ГНП вносят основной вклад в полное сечение реакции. Яркой чертой ГНП является диссипация кинетической энергии относительного движения двух ядер во внутренние степени свободы, вплоть до полной ее релаксации. Этим реакциям присущи как коррелированные, так и стохастичные формы движения нуклонов, что свидетельствует о возможности описания ГНП с позиций как прямых процессов (постепенно переходя к многоступенчатым процессам), так и используя статистические модели ядра. К сожалению, применение последнего подхода (более простого и наиболее развитого на данный момент) позволяет вычислить лишь усредненные величины (например, массовые или энергетические распределения). При этом из рассмотрения исключаются когерентные формы движения нуклонов, и любые интерференционные явления, поскольку теория оперирует напрямую с вероятностями, а не с волновыми функциями и амплитудами переходов. Значительные трудности встречаются на пути решения 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 ядер 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 мож-

но отнести классический подход к описанию динамики столкновения тяжелых ионов. Возможность использования классических уравнений движения требует своего обоснования. Критерий применимости классического подхода [18]

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

хорошо выполняется для тяжелых ионов, обладающих большой массы и лишь в ограниченном числе случаев 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 реальном эксперименте. Безусловно, в рамках классического подхода мы теряем возможность описания таких эффектов как, например интерференционные явления. 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, играющие основную роль в изучаемом процессе, мы можем получить не только качественное, но и вполне удовлетворительное количественное описание изучаемого явления. Поэтому применение этих методов вполне оправдано и весьма продуктивно при описании столкновений тяжелых ионов (см. главу 1).

Данная работа была направлена на достижение следующих целей:

1. Развитие методов анализа столкновений тяжелых ионов, основанных на решении системы классических уравнений движения ядер с эффективным учетом внутриядерных (коллективных и одночастичных) степеней свободы. Применение этих методов для анализа упругого и неупругого рассеяния, 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 (глава 2).

2. Проведение всестороннего анализа возможных механизмов образования быстрых легких частиц, 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 (глава 3).

3. Изучение возможности использования классической модели для анализа связанных состояний малонуклонных систем, изучения структуры легких экзотических ядер, процессов кластеризации и самоорганизации в ядерной материи (глава 4).

Настоящая диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Нумерация рисунков и формул ведется отдельно для каждой главы.

Основные результаты диссертации были опубликованы в работах [19-26] и доложены на 46, 47, 49 и 50 международном совещании 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.