

У-335

343a2



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-98-117

На правах рукописи
УДК 539.171.016; 539.171.017;
539.172.1; 539.172.17

УЖИНСКИЙ
Владимир Витальевич

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЯДЕР
С ЯДРАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1998

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований, в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	АЖГИРЕЙ Леонид Степанович
доктор физико-математических наук, профессор	ДРЕМИН Игорь Михайлович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник	ЕЛИСЕЕВ Сергей Максимович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета

Защита диссертации состоится "____" _____ 1998 года в "____" часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "____" _____ 1998 года

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук,

профессор

М.Ф.Лихачев

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Как известно, при высоких энергиях для анализа упругого адрон-ядерного рассеяния успешно используется теория многократного рассеяния Глаубера - Ситенко. Ее прямое обобщение на случай ядро-ядерного рассеяния было предложено в 1968 г. В.Франко. В последующие два года были найдены амплитуды рассеяний легчайших ядер и предложено выражение для оценки амплитуды рассеяния тяжелых ядер - "оптическое" приближение Чижа - Максимова, недостатки которого, особенно в применении к неупругим процессам множественного рождения частиц, послужили стимулом для развития других подходов. Наиболее примечателен результат, полученный И.В.Андреевым (1976 г.) - в пределе больших массовых чисел сталкивающихся ядер фаза упругого ядро-ядерного рассеяния дается двойным знакопеременным рядом сверток различных степеней функций толщин ядер с коэффициентами типа $m^{n-1}n^{m-1}$, где m - и n - степени функций толщин. Указанный ряд в приближении малости радиуса NN-взаимодействия по сравнению с ядерными размерами допускает суммирование, что создает основу для решения крайне актуальной проблемы - разработки расчетного аппарата глауберовской теории ядро-ядерного рассеяния.

В последние годы глауберовский подход широко используется в физике промежуточных энергий для описания упругого и неупругого рассеяния ядер. В частности, он применяется для анализа структуры экзотических ядер, обладающих ярко выраженным нейтронным гало, таких как ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$. В ближайшие годы ожидается получение пучков новых более тяжелых экзотических ядер. Поэтому остро стоит вопрос о расчете различных характеристик взаимодействий.

В области сверхвысоких энергий не менее актуальна проблема оценки общих характеристик ядро-ядерных взаимодействий. Для решения этих задач глауберовский подход необходимо дополнить учетом эффектов неупругого экранирования, что можно сделать в рамках квазиэikonального приближения реджеонной теории. Это позволяет значительно расширить поле исследований разнообразных процессов во взаимодействиях ядер с ядрами. Во-первых, применяя к амплитуде упругого рассеяния правила разрезания Абрамовского - Грибова - Канчели, можно получать сечения неупругих реакций. Во-вторых, учитывая так называемые усиленные диаграммы, можно рассматривать "каскадирова-

ние частиц в ядрах” и анализировать процессы разрушения ядер. В третьих, используя подход модели кварк-глюонных струн, можно рассчитывать характеристики процессов множественного рождения частиц и т.д.

Особенно актуальной представляется задача расчета характеристик остаточных ядер, имеющая большое значение для проектирования радиационной защиты создаваемых ускорителей ядер сверхвысоких энергий, вопросов космического материаловедения, трансмутации радиоактивных отходов и т.д. В последнее время повышенный интерес к этой проблеме обусловлен также экспериментальными результатами, полученными на установке ALADIN – указаниями на возможность реализации фазового перехода типа жидкость-газ при фрагментации высоко возбужденных остаточных ядер золота.

К сожалению, за последние 20 лет в теории разрушений ядер практически не было продвижений. На практике использовались представление каскадно-испарительной модели, дополненные учетом времени формирования вторичных частиц, да феноменологическая модель Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда для адрон-ядерных взаимодействий. Поэтому перспектива использования реджеонной теории представляется весьма заманчивой.

Очевидно, что любой новый подход, претендующий на количественные предсказания, прежде всего должен хорошо описывать существующие экспериментальные данные. Наиболее полное представление об общих характеристиках ядро-ядерных взаимодействий дают данные фотоэмульсионных экспериментов, опубликованные в многочисленных работах. Поэтому возникает задача систематизации указанных данных и их комплексного анализа. Данные фотоэмульсионных экспериментов дают также уникальную возможность исследовать процессы мультифрагментации ядер при высоких энергиях и сравнить их характеристики с характеристиками аналогичных процессов при промежуточных энергиях.

Надо отметить, что большинство планируемых экспериментальных установок нацелено на исследование ограниченных областей фазового пространства, поэтому выявление общих закономерностей процессов и их проявлений в ограниченных областях фазового пространства представляется крайне необходимым.

Цели и задачи исследования

- Развитие методов расчета амплитуд и сечений ядро-ядерных взаимодействий.
- Развитие методов оценки разрушений ядер на быстрой стадии взаимодействия.
- Систематический анализ экспериментальных данных о процессах множественного рождения частиц и разрушениях ядер в ядро-ядерных соударениях.
- Анализ мультифрагментации ядер при высоких энергиях.

Научная новизна работы

Впервые предложено использовать понятия и методы теории графов при решении комбинаторных проблем, возникающих в теории взаимодействий ядер с ядрами. Просуммирован вклад диаграмм, представляемых графами деревьев, в фазовую функцию упругого ядро-ядерного рассеяния в оптическом пределе. Предложен эффективный метод расчета амплитуд и сечений взаимодействий ядер с ядрами – так называемое древесное приближение.

Впервые стохастический метод усреднения применен для расчета амплитуд и сечений ядро-ядерных взаимодействий. С его помощью обнаружено, что в многократных столкновениях ядер с ядрами доминируют специфические процессы, описывающие взаимодействия каскадных частиц между собой (в терминологии каскадно-испарительной модели) и не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях.

Рассмотрена проблема учета вкладов усиленных диаграмм в реджеонной теории взаимодействий ядер с ядрами при высоких энергиях и предложена новая модель процесса разрушения ядер на быстрой стадии взаимодействий – так называемая реджеонная модель разрушения ядер.

Улучшена известная модель FRITIOF – учтены процессы разрушения ядер на быстрой стадии взаимодействий и процессы релаксации возбужденных ядер-остатков.

Впервые выполнен систематический анализ экспериментальных данных о взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии при энергиях от 3 до 200 ГэВ/нуклон в рамках каскадно-испарительной модели (до энергий 15 ГэВ/нуклон) и усовершенствованной модели FRITIOF. С по-

мощью усовершенствованной модели FRITIOF достигнуто удовлетворительное описание характеристик процессов множественного рождения частиц во всем диапазоне энергий.

Впервые статистическая модель мультифрагментации ядер применена в области высоких энергий и проведен анализ процессов мультифрагментации остаточных ядер золота, образующихся во взаимодействиях ядер золота с энергией 10,7 ГэВ/нуклон с ядрами фотоземлюсии. Получено указание на существование нового, неизвестного ранее физического явления – радиального потока в системе спектаторных фрагментов.

Научная и практическая ценность

Научное значение полученных результатов определяется тем, что показана возможность рассмотрения на единой основе различных процессов во взаимодействиях ядер с ядрами при промежуточных и высоких энергиях, что важно для понимания механизмов реакций и построения теории сильных взаимодействий. Результаты исследования создают базу для развития новых подходов к проблеме изучения процессов, протекающих в ядрах. На основе предложенных подходов можно интерпретировать экспериментальных данных и извлекать сведения о механизме реакций.

Методы и подходы, разработанные при анализе разрушений ядер и мультифрагментации остаточных ядер, могут быть использованы при анализе данных других экспериментов, для оценки радиационных повреждений электроники космических аппаратов, расчета радиационной защиты действующих и планируемых ускорителей ядер, при создании электроядерных установок и решении задач трансмутации радиоактивных отходов.

Ряд выявленных особенностей мультифрагментации ядер при высоких энергиях позволяет наметить пути дальнейших исследований этой проблемы, занимающей важное место в физике атомного ядра.

Вся совокупность полученных результатов и методов может использоваться при планировании новых исследований взаимодействий ядер с ядрами.

Результаты, полученные в диссертации, используются в работах других авторов и цитируются как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследования, изложенного в диссертации, опубликованы в журналах "Письма в ЖЭТФ", "Ядерная физика", "Zeitschrift für Physik", "Nuovo Cimento", в препринтах и сообщениях ОИЯИ, в материалах международных конференций и совещаний. Работы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лабораториях ОИЯИ — в Лаборатории высоких энергий, в Лаборатории теоретической физики, в Лаборатории ядерных проблем, в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации, в Институтах АН России – ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯИ, С-П ИЯФ, в зарубежных организациях.

По материалам диссертации опубликовано 47 работ, список которых приводится в конце автореферата.

По теме работы защищена кандидатская диссертация под научным руководством соискателя (Kh.El-Waged, 1996, Egypt).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений, содержит 297 страниц машинописного текста, включая 91 рисунок, 6 таблиц и библиографию из 226 наименований на 16 страницах.

2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан краткий обзор современного состояния физики высоких энергий, выделены актуальные направления исследований, выбраны цели и задачи диссертационной работы, представлены общий план рассмотрения и основные результаты.

В первой главе диссертации рассматриваются вопросы глауберовской теории взаимодействий ядер с ядрами. В §1.1 обсуждается ключевая проблема теории – вычисление амплитуды упругого рассеяния, которая дается выражением

$$F_{AB}(\vec{q}) = \frac{iP_B}{2\pi} \int d^2b e^{i\vec{q}\vec{b}} [1 - \prod_{i=1}^A \prod_{j=1}^B [1 - \gamma(\vec{b} - \vec{s}_i + \vec{r}_j)]] * \quad (1)$$

$$* |\Psi_A(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 \left(\prod_{j=1}^A d^3r_j \right) |\Psi_B(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_B)| \left(\prod_{j=1}^B d^3t_j \right) =$$

$$= \frac{iP_B}{2\pi} \int d^2 b e^{i\vec{q}\vec{b}} \left[\sum_{j=1}^A \sum_{k=1}^B \gamma_{jk} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^A \sum_{k,l=1, k \neq l}^B \gamma_{jk} \gamma_{jl} - \frac{1}{2} \sum_{j,k=1, j \neq k}^A \sum_{l=1}^B \gamma_{jl} \gamma_{kl} - \frac{1}{2} \sum_{j,k=1, j \neq k}^A \sum_{l,m=1, l \neq m}^B \gamma_{jl} \gamma_{km} + \dots \right]$$

$$|\Psi_A(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_A)|^2 \left(\prod_{j=1}^A d^3 r_j \right) |\Psi_B(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_B)| \left(\prod_{j=1}^B d^3 r_j \right)$$

$$\gamma_{ij} = \gamma(\vec{b} - \vec{s}_i + \vec{r}_j).$$

В §1.1 предложено каждому члену ряда (1) сопоставлять двудольный или дуокрашенный граф и, соответственно, каждый член ряда рассматривать как вклад, функцию графа.

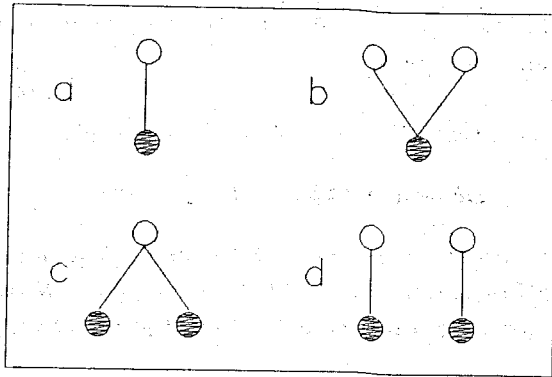


Рис. 1

Первые члены ряда (1) представляются графами рис. 1, на котором светлыми (темными) точками представлены нуклоны ядра А (В), а линиями - взаимодействия нуклонов (амплитуды NN-взаимодействий в представлении прицельного параметра $-\gamma(\vec{b} - \vec{s}_i + \vec{r}_j)$). В приближении некоррелированного распределения нуклонов в ядрах и в пренебрежении зависимостью γ от спиновых и изоспиновых переменных вклад несвязного графа равен произведению функций его связанных компонент. Это позволяет при $A, B \rightarrow \infty$ аппроксимировать ряд (1) выражением

$$F_{AB}(\vec{q}) = \frac{iP_B}{2\pi} \int d^2 b e^{i\vec{q}\vec{b}} [1 - \exp(-\chi_{AB}(\vec{b}))], \quad (2)$$

$$\chi_{AB}(\vec{b}) = \sum_{\alpha} g(G_{\alpha}), \quad (3)$$

в котором χ_{AB} - фазовая функция, а $g(G_{\alpha})$ - функция графа G_{α} . В (3) суммирование ведется по всем связным графам. Ограничиваясь

в ряде (3) учетом вкладов деревьев, в приближении малости радиуса NN-взаимодействия по сравнению с размерами ядер, имеем

$$\chi_{AB}(\vec{b}) = \frac{2}{\sigma} \int d^2 s [x + y + \sum_{l=1}^3 (u_l + z_l + u_l z_l) (-1)^l], \quad (4)$$

где u_l и z_l - решения системы уравнений

$$u = \frac{\sigma}{2} B \rho_B (\vec{b} - \vec{s}) e^{-z},$$

$$z = \frac{\sigma}{2} A \rho_A (\vec{s}) e^{-u},$$

пронумерованные в порядке возрастания корней z_l ; σ - полное сечение NN-взаимодействий, ρ_A и ρ_B - одночастичные плотности ядер А и В, проинтегрированные по продольным координатам.

В заключительной части §1.1 детально анализируется точность древесного приближения. Показано, что поправки к фазовой функции упругого рассеяния, обусловленные ненулевым радиусом NN-взаимодействий, составляют величину порядка 2 - 5 % в существенной области изменения прицельного параметра. Учет вклада петлевых диаграмм (графов с циклами) требует задания конкретной параметризации амплитуды NN-рассеяния. В рамках гауссовой параметризации показано, что вклад диаграмм с петлями содержит малый параметр $\epsilon \simeq \sigma_{NN}^{el} / \sigma_{NN}^{tot} \simeq 0,25$. Вычислен суммарный вклад однопетлевых диаграмм в фазовую функцию, который составляет величину порядка 1,5 %. Предложен метод учета корреляций ядерных нуклонов, который также приводит к малым поправкам. Наиболее существенные поправки (до 35 % при $A = 4$ и $B = 40$) связаны с конечностью массовых чисел взаимодействующих ядер. Эти поправки рассчитаны с точностью $1/A, 1/A^2, 1/B, 1/B^2$, где А и В - массовые числа сталкивающихся ядер. С учетом указанных поправок достигнуто удовлетворительное описание упругого рассеяния α -частиц ядрами ^{12}C и ^{40}Ca при $T_{\alpha} = 1,37$ ГэВ (см. рис. 2, 3).

Знание амплитуды упругого рассеяния позволяет находить амплитуды и сечения других процессов (§1.2). Так, амплитуда возбуждения однонуклонного уровня ядра А дается сверткой переходной плотности ядра и функциональной производной от амплитуды упругого рассеяния по плотности ρ_A . Сечение квазиупругого рассеяния ядра В имеет вид

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{q,el} = \frac{P_B^2}{(2\pi)^2} \int d^2 b d^2 b' e^{i\vec{q}(\vec{b}-\vec{b}')} \{ \exp[-\chi(\sigma/2, \rho_A(\vec{s}), \rho_B(\vec{b}-\vec{s})) + \dots] \} \quad (5)$$

$$+ \rho_B(\vec{b}' - \vec{s})) - \exp[-\chi(\sigma/2, \rho_A(\vec{s}), \rho_B(\vec{b}' - \vec{s})) - \chi(\sigma^*/2, T_A(\vec{s}), T_B(\vec{b}' - \vec{s}))]]$$

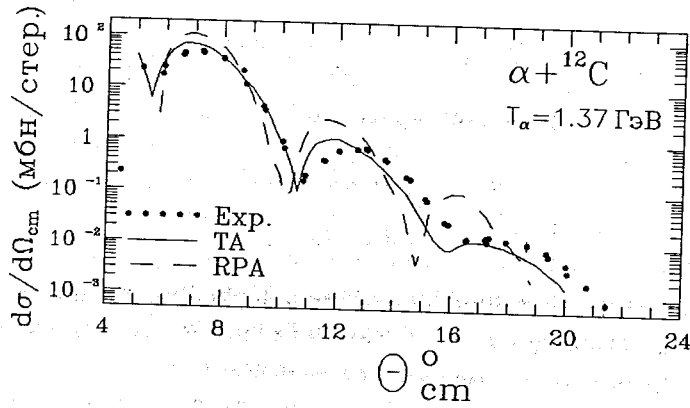


Рис. 2: Дифференциальное сечение упругого ${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C}$ - рассеяния при $T_\alpha = 1.37$ ГэВ. Точки - экспериментальные данные [1]. Сплошная кривая - расчет в древесно приближении. Штриховая кривая - расчет в приближении "жесткого" налетающей ядра [1].

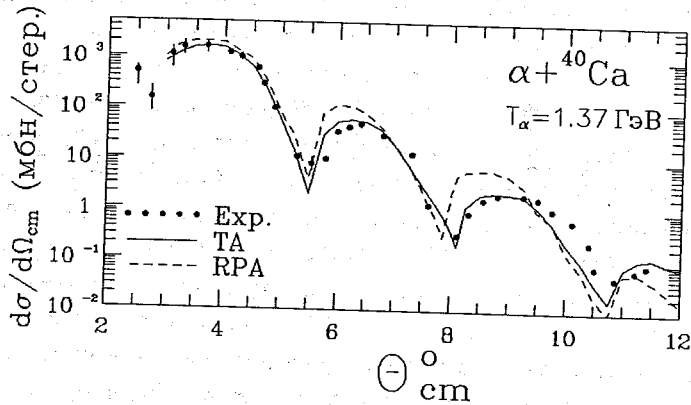


Рис. 3: Дифференциальное сечение упругого ${}^4\text{He} + {}^{40}\text{Ca}$ - рассеяния при $T_\alpha = 1.37$ ГэВ. Точки - экспериментальные данные [2]. Сплошная кривая - расчет в древесном приближении, штриховая - расчет в приближении "жесткого" налетающего ядра [1].

Сложнее обстоит дело с сечениями процессов множественного рождения частиц. Применяя к амплитуде (1) правила разрезания Абрамовского - Грибова - Канчели, можно убедиться, что неупругие процессы не менее разнообразны, чем процессы упругого перерассеяния. Для их

представления также можно использовать графы, однако функции графов в данном случае гораздо сложнее. В §1.3 вычислены вклады всех 316 диаграмм в неупругое сечение ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ - взаимодействий. Обнаружено, что вклады диаграммы с независимыми, "параллельными" нуклон-нуклонными взаимодействиями (см. рис. 1d) не доминируют во взаимодействиях высших кратностей (приближение Чижа - Максимова в применении к неупругим реакциям неоправдано). Более того, вклады диаграмм многократных соударений, имеющих аналоги в адрон-ядерном рассеянии (см. рис. 1b, 1c), не являются ведущими - предположение о независимых "каскадах" нуклонов в ядрах не подтверждается расчетами. Доминируют вклады специфических процессов, представляемых графами типа приведенных на рис. 4.

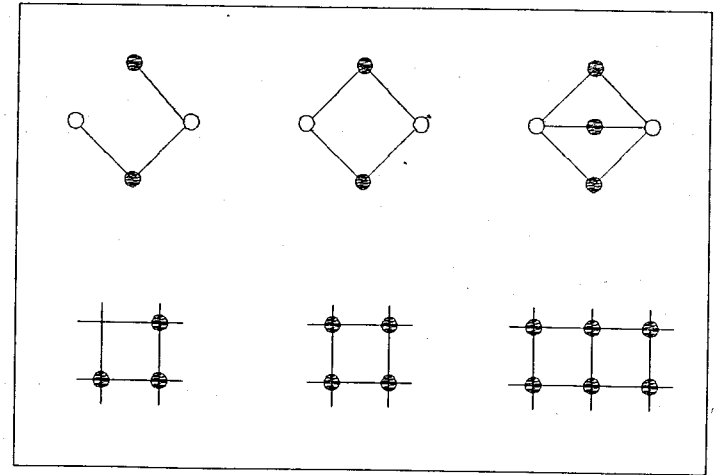


Рис. 4

Многообразие неупругих процессов наводит на мысль использовать для их перечисления в конкретных расчетах монтекарловский, стохастический подход, которая развивается в §1.4, где предложено рассматривать квадраты модулей волновых функций ядер, входящие в глауберовские выражения, в качестве вероятностной меры, а амплитуды и сечения - как средние по этой мере. На основе вероятностной интерпретации глауберовского приближения предложен реализованный в программе DIAGEN алгоритм генерации диаграмм неупругого ядро-ядерного рассеяния, который нашел исключительно широкое применение в практических расчетах. Некоторые из них рассмотрены в прило-

жениях. Использование метода Монте-Карло позволяет избежать различных приближений, характерных для аналитического подхода, таких, как переход к оптическому пределу, пренебрежение радиусом NN-взаимодействий и т.д. С его помощью выполнен анализ амплитуд и сечений упругого рассеяния экзотических ядер, квазиупругого рассеяния ядер ${}^4\text{He}$ ядрами ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{64}\text{Cu}$ и т.д. В частности, в §1.4 рассмотрена роль специфических процессов типа рис. 4 во взаимодействиях ядер углерода.

В целом, в первой главе диссертации развиты методы расчета характеристик ядро-ядерных взаимодействий в рамках глауберовской теории.

Во второй главе диссертации рассматриваются проблемы реджеонной теории взаимодействий ядер с ядрами.

В §2.1 обсуждается вопрос об учете неупругих экранировок, обусловленных переходами нуклонов в процессе рассеяния в дифракционные пучки частиц малой массы и обратно. В теории адрон-ядерных взаимодействий для решения задачи было предложено несколько подходов. В §2.1 на основе метода собственных состояний оператора рассеяния дано их обобщение на случай ядро-ядерного рассеяния. Проведены численные расчеты, которые показали, что учет неупругих экранировок в среднем дает 5 %-ую поправку к полным сечениям. В дифференциальных сечениях упругого рассеяния величина эффекта растет с увеличением передаваемого импульса.

Метод собственных состояний используется и при обобщении квазиэikonальной теории на случай ядро-ядерных взаимодействий (§2.2). При этом учитываются не только померонные обмены, но и обмены невакуумными реджеонами, что позволяет применять подход при всех достигнутых энергиях. В рамках подхода проведены оценки эффектов неупругих экранировок в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях.

В §2.3 рассматривается проблема учета усиленных диаграмм, описывающих взаимодействия реджеонов между собой в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных соударениях. Метод учета вкладов усиленных диаграмм в теории адрон-адронных взаимодействий был предложен в [3]. В диссертации дано его обобщение на случай адрон-ядерного рассеяния в пренебрежении продольными передачами импульса. Показано, что уже в первом порядке теории возмущения возникает трудная задача учета экранирующих факторов. По-видимому, она может быть решена при использовании стохастического метода усредне-

ния.

В применении к неупругим процессам учет усиленных диаграмм эквивалентен рассмотрению каскадирования частиц в ядрах. При этом обычные представления о каскаде как о совокупности причинно-связанных элементарных событий соответствуют предположению о планарной структуре вершины взаимодействия реджеонов [4]. С ростом энергии вклад диаграмм с планарной вершиной "вымирает", а вклад диаграмм с непланарной вершиной становится доминирующим. Предположение о непланарной структуре вершины приводит к представлению об одновременном выбивании нуклонов из ядер. Такие взаимодействия можно рассматривать как ветвящийся процесс, развивающийся только в пространстве прицельных параметров. В диссертации предложен эффективный метод расчета характеристик этих процессов – реджеонная модель разрушения ядер, согласно которой в случае адрон-ядерных взаимодействий налетающий адрон инициирует в ядре "каскад" реджеонных обменов. Мощность "каскада" определяется как положениями нуклонов в плоскости прицельного параметра, так и вершинными константами. Поскольку учет всевозможных вершин исключительно сложная задача, в модели вводятся эффективные свободные параметры. Область допустимых значений параметров определена в процессе анализа экспериментальных данных. "Работоспособность" модели продемонстрирована в четвертой и пятой главах диссертации.

В третьей главе диссертации рассматриваются каскадно-испарительная модель и модель FRITIOF [5], используемые при анализе процессов множественного рождения частиц в ядро-ядерных взаимодействиях.

Основные положения каскадно-испарительной модели (КИМ), изложенные в §3.1, хорошо известны. В диссертации обращается внимание на процедуру расчета энергии возбуждения ядер-остатков. В КИМ предполагается, что элементарные взаимодействия происходят в потенциальной яме. Ядро представляется как вырожденный ферми-газ. При выбивании нуклона налетающей частицей образуется "дырка". Медленные нуклоны и мезоны поглощаются ядром. Энергия возбуждения ядра-остатка дается суммой энергий "дырок" и поглощенных частиц. В предельном случае выбивания всех нуклонов из ядра можно получить "ядро", не содержащее ни одного нуклона, но с определенной энергией возбуждения. Это рассуждение показывает, что при сильном разрушении ядер процедура расчета энергии возбуждения должна быть изме-

нена.

В §3.2 представлены основные положения модели FRITIOF. Там же предложено дополнить модель FRITIOF реджеонной моделью разрушения ядер, что не представляет принципиальных трудностей, поскольку модель FRITIOF использует глауберовскую теорию. Сложнее определить импульсный спектр выбиваемых нуклонов. Здесь используется новый оригинальный подход, который наиболее нагляден в случае распада двухчастичной системы (1,2) под действием налетающего адрона h . В конечном состоянии реакции $h + (1,2)$ закон сохранения энергии-импульса в пренебрежении поперечными компонентами импульсов записывается в виде

$$E'_h + E_1 + E_2 = E_h + M_{(1,2)} \quad (6)$$

$$P'_h + P_1 + P_2 = P_h. \quad (7)$$

Следовательно, эксклюзивное состояние реакции полностью характеризуется значением одной независимой переменной. В качестве переменной предложено взять $x_1^- = (E_1 - P_1)/(E_1 + E_2 - P_1 - P_2)$. Для описания реакции необходимо только задать распределение по x_1^- . В §3.2 алгоритм обобщается для описания распадов многочастичных систем. Распределение по x_1^-, \dots, x_n^- выбирается в простейшем, гауссовом виде. Параметры распределений определяются на основе анализа экспериментальных данных.

В §3.2 также предложена новая процедура расчета энергии возбуждения ядер-остатков. Считается, что нуклоны, расположенные на расстоянии меньше чем 2 фм от "раненого" нуклона, получают энергию, распределенную по закону $dW \sim \exp(-\epsilon/\langle \epsilon \rangle) d\epsilon$. Сумма полученных энергий равна энергии возбуждения ядра-остатка.

Все эти усовершенствования позволяют включить в рассмотрение продукты фрагментации ядер.

В четвертой главе диссертации представлен систематический анализ экспериментальных данных о взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии при высоких энергиях в рамках КИМ и улучшенной модели FRITIOF.

В §3.1 исследуются взаимодействия при энергиях 3,2 – 3,6 ГэВ/нуклон. Здесь использован богатый экспериментальный материал о соударениях ядер 1H , 4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne и ^{28}Si с ядрами фотоэмульсии, включающий характеристики рожденных частиц (s -частиц), продуктов фрагментации ядер (b -частиц) и нуклонов-участников быстрой стадии

взаимодействий (g -частиц).

Обнаружено, что КИМ удовлетворительно воспроизводит распределения по множественности s -частиц во всех рассматриваемых взаимодействиях. Несколько хуже КИМ описывает распределения по множественности g -частиц и b -частиц. Улучшенная модель FRITIOF качественно описывает эти распределения. Наиболее сильные расхождения между результатами расчетов и экспериментальными данными наблюдаются для $p + Em$ взаимодействий.

В области $n_s < 20 - 25$ КИМ удовлетворительно воспроизводит зависимости средних множественностей g - и b -частиц от множественности s -частиц. При $n_s > 20 - 25$ модель предсказывает рост множественности g -частиц и уменьшение множественности b -частиц, в то время как экспериментальные данные указывают на постоянство $\langle n_g \rangle$ и $\langle n_b \rangle$ в этой области.

Сложнее ситуация с моделью FRITIOF. Исходный вариант модели не описывал корреляции $n_g(n_s)$ и $n_b(n_s)$ из-за отсутствия трактовки механизма разрушения ядер и релаксации ядер-остатков. Улучшенная модель качественно, а в некоторых случаях и количественно воспроизводит экспериментальные закономерности. Наиболее критическая ситуация для КИМ складывается с описанием корреляций g - и b -частиц (см. рис. 5) для взаимодействий ядер тяжелее кислорода. При $10 < n_g < 20$ наблюдается значительное расхождение расчетных и экспериментальных значений средней множественности b -частиц (см. рис. 5а). Поскольку при $n_g > 10$ наиболее тяжелые ядра фотоэмульсии разрушаются более чем на 20 %, можно заключить, что КИМ не воспроизводит корреляций между сильноионизирующими частицами, если разрушение ядер на быстрой стадии взаимодействий превышает 20%.

Улучшенная модель FRITIOF, в отличие от исходного варианта (см. светлые точки на рис. 5) и от КИМ, хорошо описывает экспериментальные закономерности.

Таким образом, детальное изучение существующих экспериментальных данных выявило новую проблему – необходимость описания состава и множественности медленных частиц, образующихся при фрагментации ядер. Один из возможных путей ее решения даст улучшенная модель FRITIOF.

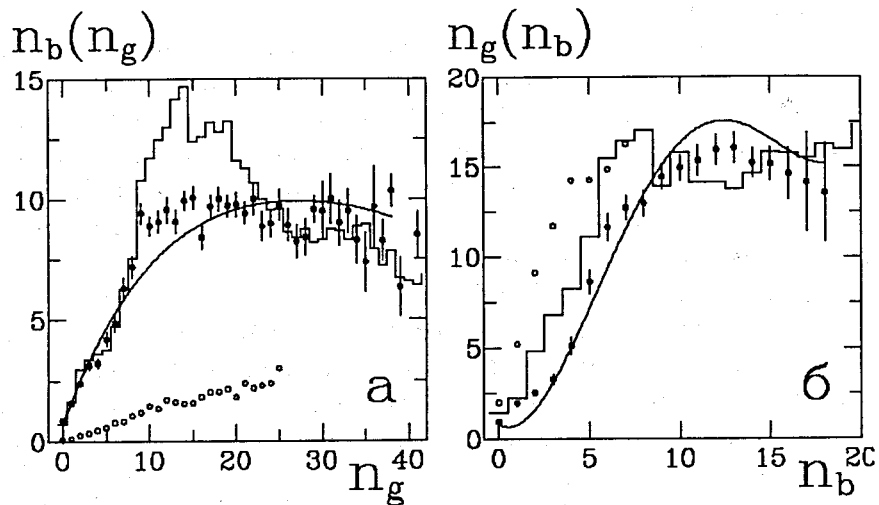


Рис. 5: Корреляции $n_b(n_g)$ и $n_g(n_b)$ (рис. а и б, соответственно) во взаимодействиях ядер ^{22}Ne с ядрами фотоэмульсии при энергии 3,2 ГэВ/нуклон. Темные точки – экспериментальные данные, гистограммы – расчеты по КИМ, сплошные кривые – расчеты по усовершенствованной модели FRITIOF, светлые точки – расчеты по исходному варианту модели FRITIOF.

В §3.2 анализируются аналогичные данные сотрудничества EMU-01 о взаимодействиях ядер ^{16}O (14.6, 60, 200 ГэВ/нуклон), ^{28}Si (14.6 ГэВ/нуклон) и ^{32}S (200 ГэВ/нуклон) с ядрами фотоэмульсии. Установлено, что недостатки КИМ, отмеченные выше, наблюдаются и в области энергий до 14,6 ГэВ/нуклон. Усовершенствованная модель FRITIOF удовлетворительно воспроизводит экспериментальные закономерности во всем диапазоне энергий для всех налетающих ядер.

В §3.3 рассматриваются последние данные сотрудничества EMU-01 о взаимодействиях ядер золота с ядрами фотоэмульсии при энергии 10,7 ГэВ/нуклон, представляющие наибольший интерес. Как и раньше, модели хорошо воспроизводит распределения по множественности рожденных s-частиц. В то же время КИМ плохо описывает распределения по множественности g-частиц – модель предполагает значительное разрушение ядер на быстрой стадии взаимодействий. Модель FRITIOF, улучшенная автором, дает удовлетворительные результаты. Анализ других экспериментальных характеристик подтверждает ранее сделанные выводы.

Наиболее драматическое расхождение между экспериментальными данными и расчетами по КИМ, неизвестное ранее, обнаружено в угло-

вых распределениях s-частиц (см. рис. 6).

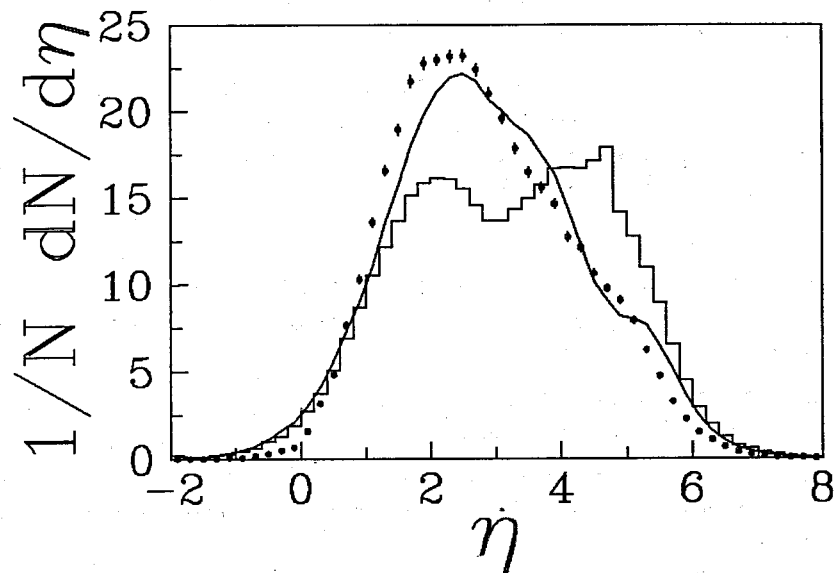


Рис. 6: Распределение s-частиц по псевдобыстротам. Точки – экспериментальные данные, гистограмма – расчет по КИМ, сплошная кривая – расчет по усовершенствованной модели FRITIOF.

В целом можно сказать, что КИМ не описывает процессов множественного рождения частиц на быстрой стадии взаимодействий в соударениях тяжелых ядер. Модель FRITIOF при всей ее простоте дает довольно хорошее описание. Трудности КИМ в описании характеристик медленных частиц объясняются недостатками моделирования процессов релаксации ядер-остатков, неучетом мультифрагментации ядер, и неправильным расчетом энергии возбуждения ядер-остатков при больших разрушениях ядер. Изменение метода расчета энергий возбуждений ядер и использование реджевского подхода при рассмотрении разрушений ядер (усовершенствованная модель FRITIOF) приводят к удовлетворительным результатам. Усовершенствованную модель FRITIOF можно использовать в качестве основы при разработке более детальных теоретических подходов.

На основе проведенного анализа делаются заключения:

- предположение о быстром распаде резонансов в ядрах и реализации полного каскада (каскадно-испарительная модель) не позволяет объяснить наблюдаемые данные в полном объеме;

- предположение о доминирующей роли нуклонных резонансов (модель FRITIOF) представляется более реалистичным и плодотворным, нежели представления КИМ;
- согласно усовершенствованной модели FRITIOF механизм рождения частиц, разрушения ядер и релаксации ядер-остатков в ядро-ядерных взаимодействиях не меняется существенно в интервале энергий от 4 до 200 ГэВ/нуклон;
- для дальнейшего изучения процессов множественного рождения частиц в ядро-ядерных взаимодействиях представляет интерес экспериментальное исследование энергетического спектра медленных мезонов и протонов.

На протяжении всей четвертой главы предполагалось, что процесс релаксации возбужденных ядер-остатков может быть описан в рамках испарительной модели. При этом отмечалось, что учет мультифрагментации ядер может улучшить согласие расчетов с экспериментальными данными.

Под мультифрагментацией ядер понимается процесс образования нескольких ядерных фрагментов промежуточных масс (IMF) с зарядами $3 \leq Z_F \leq 30$ при распаде сильно возбужденных ядер достаточно тяжелых элементов. Поскольку трудно предположить, что такие фрагменты являются продуктами серии последовательных асимметричных делений, возникло представление о взрывном, одновременном распаде ядер на несколько фрагментов и вопрос о механизме этого процесса, который не потерял своей актуальности и в настоящее время.

В пятой главе диссертации представлен анализ процессов мультифрагментации остаточных ядер золота, образующихся во взаимодействиях ядер золота с ядрами фотоэмульсии при энергии 10,7 ГэВ/нуклон. Здесь используются экспериментальные данные международного сотрудничества EMU-01/16, полученные при участии автора диссертации. Наиболее существенные детали эксперимента приведены в §5.1.

В §5.2 рассматриваются основные положения популярной статистической модели мультифрагментации ядер [6]. В модели первая, быстрая стадия реакций не рассматривается. Считается, что ее описание может быть достигнуто в рамках транспортных моделей. Как было показано в четвертой главе, КИМ значительно переоценивает разрушение ядер при энергии 10,7 ГэВ/нуклон. Поэтому в диссертации предложено использовать для этой цели реджеонную модель разрушения ядер.

Динамика расширения ядер-остатков и процесс их термализации также не рассматривается в статистической модели. Считается, что в момент завершения этого этапа набор конечных состояний подчиняется общим статистическим закономерностям. В частности, вероятность состояния с N фрагментами пропорциональна $\int \exp(S) d^{3N} p d^{3N} r$, где S - энтропия системы фрагментов, а интегрирование проводится по доступному фазовому объему N частиц. S определяется как энтропия системы "горячих", возбужденных ядер с учетом только кулоновского взаимодействия. Доступный фазовый объем определяется энергией системы и ее объемом. Обычно полагают [6], что объем, занимаемый фрагментами, в момент "замерзания" системы фрагментов в 3 раза превышает объем ядер в основном состоянии. Для энергии системы в диссертации предложено использовать следующее выражение

$$\epsilon^* = 10.5A \left(\frac{A_0 - A}{A_0} \right)^{0.75} \quad (\text{МэВ}), \quad A_0 = 197, \quad (8)$$

где A_0 - масса исходного ядра, A - масса ядра-остатка, вычисляемая в реджеонной модели.

Как показано в диссертации, реджеонная модель разрушения ядер, дополненная статистической моделью мультифрагментации ядер - комбинированная модель, приводит к удовлетворительному воспроизведению основных характеристик процесса мультифрагментации ядер золота при энергии 600 МэВ/нуклон. При более высоких энергиях предсказания модели существенно расходятся с экспериментальными данными. Анализ причин расхождения представлен в основной части главы.

В §5.3 рассматриваются частотные характеристики процесса мультифрагментации остаточных ядер золота во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии при энергии 10,7 ГэВ/нуклон. Показано, что комбинированная модель удовлетворительно описывает распределения по суммарным зарядам Z_{bound} и Z_{b3} , где $Z_{bound} = \sum_F Z_F$, $Z_F \geq 2$, а $Z_{b3} = \sum_F Z_F$, $Z_F \geq 3$. Также хорошо воспроизводятся распределения по множественностям однозарядных, многозарядных фрагментов и фрагментов промежуточных масс.

Наиболее интересны зависимости множественности фрагментов промежуточных масс (M_{IMF}) от суммарных зарядов Z_{bound} и Z_{b3} . В диссертации показано, что зависимость M_{IMF} от Z_{bound} при высоких энергиях существенно отличается от аналогичной зависимости при промежуточных энергиях (см. рис. 7а).

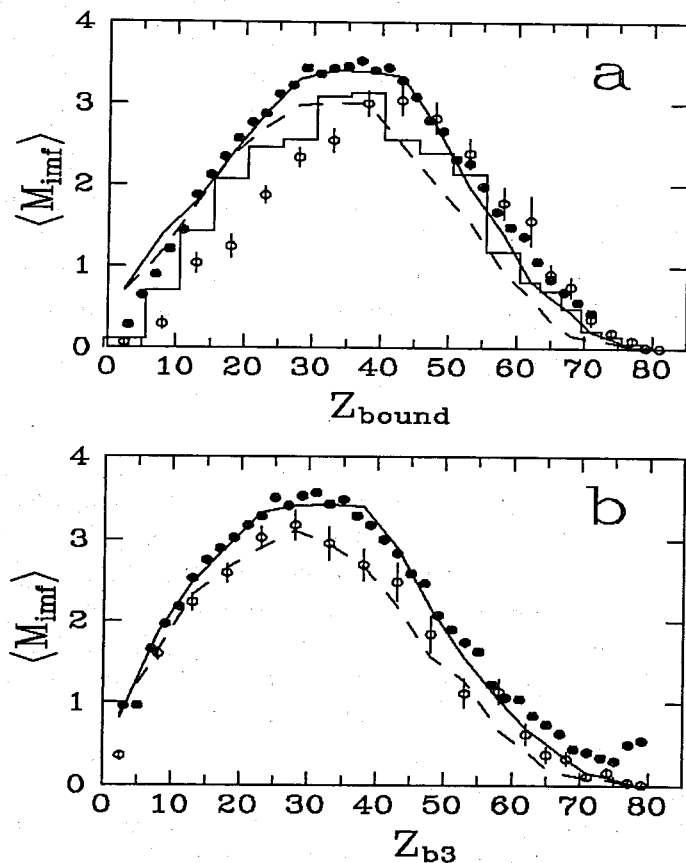


Рис. 7: Зависимость средней множественности IMF от Z_{bound} (a) и Z_{b3} (b). Темные точки - данные [7] о $Au + Cu$ взаимодействиях при 600 А МэВ. Светлые точки - данные о $Au + Et$ -взаимодействиях при 10,7 ГэВ/нуклон. На рис. а гистограммой представлены фотоэмульсионные данные, полученные с учетом 50% эффективности регистрации двухзарядных фрагментов на установке ALADIN. Сплошные кривые на рисунках - расчет в рамках комбинированной модели для $Au + Et$ взаимодействий. Штриховые кривые - аналогичные расчеты с уменьшенной на 10% энергией возбуждения ядер.

Во многом это объясняется разными условиями регистрации двухзарядных фрагментов при высоких и промежуточных энергиях. С учетом этого обстоятельства, обнаружено, что при высоких энергиях имеет место подавление выхода фрагментов промежуточных масс. Наиболее четко это видно в зависимости $\langle M_{IMF} \rangle$ от Z_{b3} (см. рис. 7b). В рамках комбинированной модели такое подавление воспроизводится при уменьшении энергии, даваемой соотношением (8), на 10 %, что, казалось бы, говорит об изменении механизма передачи энергии возбуждения ядрам-остаткам при переходе от промежуточных к высоким энергиям. Гипотезе не противоречат результаты анализа зарядов наиболее тяжелых фрагментов, а также асимметрий в системе фрагментов. Однако эффект может быть обусловлен и коллективными потоками в системе фрагментов.

Поиск возможных динамических эффектов, проведенный в §5.4 с использованием азимутальных корреляций и анализа сферичности событий, показал, что в системе покоя фрагментирующего ядра фрагменты разлетаются практически изотропно. Это не противоречит предсказаниям статистической модели, однако экспериментальные оценки кинетических энергий фрагментов значительно превышают расчетные значения (см. табл. 1), что интерпретируется как наличие радиального, сферически-симметричного потока фрагментов в системе покоя фрагментирующего ядра. Возможно, радиальным потоком и обусловлена пониженная множественность фрагментов промежуточных масс, а не меньшей энергией возбуждения ядер-остатков.

Таблица 1: Оценки средних кинетических энергий фрагментов в "системе покоя" фрагментирующего ядра

Z	Эксп. (МэВ)	Модель (МэВ)
2	67.3 ± 3.0	16.7
3, 4	47.5 ± 2.0	17.4
5, 6	54.2 ± 3.1	19.2
7, 8	52.5 ± 3.2	20.8

Указание на радиальный поток фрагментов при высоких энергиях является наиболее интересным результатом исследования мультифрагментации ядер золота при энергии 10,7 ГэВ/нуклон.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в дис-

сертации, и дано их краткое обсуждение вместе с перечнем нерешенных проблем.

В приложении А рассмотрены вопросы суммирования рядов глауберовской теории ядро-ядерного рассеяния, в частности, суммирование вкладов древесных диаграмм в фазовую функцию упругого рассеяния. Здесь также приводятся выражения, удобные для численных расчетов.

В приложении В представлен метод корневых диаграмм, используемый для нахождения амплитуд и сечений некоторых процессов ядро-ядерных взаимодействий, рассмотренных в основной части диссертации.

В приложении С анализируется упругое рассеяние экзотических ядер, обладающих ярко выраженным нейтронным гало, таких, как ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$. При рассмотрении рассеяния этих ядер нуклонами и ядрами было предложено использовать глауберовское приближение, что и осуществлено в данном разделе. Показано, что метод стохастического усреднения позволяет успешно анализировать указанные реакции.

В приложениях D, E и F рассматриваются обобщения существующих моделей процессов множественного рождения частиц в адрон-ядерных взаимодействиях в применении к ядро-ядерным соударениям. В частности, в приложении D дано обобщение модели "раненых" нуклонов, позволяющее оценить множественность рожденных частиц при умеренных энергиях. Модель "раненых" нуклонов является преобразованием модели FRITIOF. В приложении E представлено обобщение модели каскада лидирующего бариона, которое использовано для анализа взаимодействий ядер ${}^4\text{He}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 31.5$ ГэВ. В приложении F дано обобщение модели процесса образования сильно ионизирующих частиц Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда. Все эти модели позволяют достаточно просто оценить основные характеристики рожденных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях.

Результаты, представляемые к защите.

1. Методы расчета амплитуд и сечений ядро-ядерных взаимодействий (древесное приближение, метод корневых диаграмм, метод статистического усреднения).
2. Анализ дифференциальных сечений упругого рассеяния ${}^6\text{Li} + p$ (360 МэВ), ${}^{11}\text{Li} + p$ (660 МэВ), ${}^{11}\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ (660 МэВ), ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ (360, 1016, 1449 МэВ), ${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C}$, ${}^{40}\text{Ca}$ (1368 МэВ); дифференциальных сечений квазиупругого рассеяния ядер ${}^4\text{He}$ ядрами ${}^{12}\text{C}$,

${}^{27}\text{Al}$, ${}^{64}\text{Cu}$ при $P_\alpha = 17,9$ ГэВ/с; сечений неупругих процессов во взаимодействиях ${}^4\text{He} + {}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$.

3. Вывод о том, что в многократных неупругих соударениях ядер с ядрами доминируют специфические процессы, не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях.
4. Обобщения различных моделей процессов множественного рождения частиц в применении к ядро-ядерным взаимодействиям — модели "раненых" нуклонов, модели каскада лидирующего бариона, модели Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда. С помощью этих моделей выполнен анализ разнообразных экспериментальных данных.
5. Метод оценки разрушений ядер на быстрой стадии взаимодействий — реджеонная модель разрушения ядер.
6. Усовершенствование модели FRITIOF — учет разрушений ядер на быстрой стадии взаимодействий и учет процессов релаксации возбужденных ядер-остатков.
7. Анализ взаимодействий ядер с ядрами фотоэмульсии при энергиях от 3 до 200 ГэВ на нуклон в рамках каскадно-испарительной модели (до энергий 15 ГэВ/нуклон) и усовершенствованной модели FRITIOF. Заключение о том, что каскадно-испарительная модель позволяет удовлетворительно описывать ядро-ядерные взаимодействия, если разрушение ядер на быстрой стадии реакций не превышает 20 – 40 %. Согласно выполненным расчетам по улучшенной модели FRITIOF механизм взаимодействий ядер с ядрами не меняется существенно в диапазоне энергий от 3 до 200 ГэВ/нуклон.
8. Анализ процессов мультифрагментации ядер золота во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии при энергии 10.7 ГэВ/нуклон в рамках усовершенствованной модели FRITIOF, дополненной статистической моделью мультифрагментации ядер. Показано, что такая комбинированная модель удовлетворительно воспроизводит частотные характеристики процесса мультифрагментации остаточных ядер золота. Расхождение между экспериментальными и расчетными энергиями фрагментов рассматривается как указание на существование нового, неизвестного ранее физического явления радиального потока в системе спектаторных фрагментов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. А.С.Пак, А.В.Тарасов, В.В.Ужинский, Ч.Цэрэн// "К теории ядерно-ядерных взаимодействий при высоких энергиях", *Письма в ЖЭТФ*, 1978, т. 28, с. 314.
2. А.С.Пак, А.В.Тарасов, В.В.Ужинский, Ч.Цэрэн// "Фазовая функция в ядро-ядерном рассеянии", *ЯФ*, 1979, т. 30, с. 102.
3. А.С.Пак, В.В.Ужинский, Ч.Цэрэн// "О взаимодействии ядер с ядрами при высоких энергиях", *ЯФ*, 1979, т. 30, с. 343.
4. В.В.Ужинский, Ч.Цэрэн// "Ядерно-ядерное взаимодействие в приближении Глаубера", *сооб. ОИЯИ, P2-12079*, 1979, Дубна.
5. A.S.Pak, A.V.Tarasov, Ch.Tseren, V.V.Uzhinsky// "Nucleus-Nucleus Scattering Phase Shift in the Optical Limit of the Eikonal Theory", In: Intern. Conf. on High Energy Phys. and Nucl. Structure, 8th, Vancouver, 1979, Abstracts, p. 164.
6. A.S.Pak, A.V.Tarasov, Ch.Tseren, V.V.Uzhinsky// "Elastic and Inelastic Scattering α -Particles from ^{12}C , ^{40}Ca Isotopes (Theory)", In: Intern. Conf. on High Energy Phys. and Nuclear Structure, 8th, Vancouver, 1979, Abstracts, p. 165.
7. В.В.Ужинский// "Классификация диаграмм, описывающих упругое ядро-ядерное рассеяние", *препр. ОИЯИ, P2-13054*, 1980, Дубна.
8. И.У.Христова, З.Омбоо, А.С.Пак, А.В.Тарасов, В.В.Ужинский// "Сечение квазиупругого ядро-ядерного рассеяния в оптическом приближении", *Письма в ЖЭТФ*, 1980, т. 31, с. 495.
9. И.Б.Бободжанов, З.Омбоо, В.В.Ужинский, И.У.Христова// "О влиянии корреляций центра масс на структуру сечений квазиупругого адрон-ядерного рассеяния", *сооб. ОИЯИ, P2-80-596*, 1980, Дубна.
10. И.Б.Бободжанов, З.Омбоо, В.В.Ужинский, И.У.Христова// "Об одной параметризации одночастичных ядерных плотностей, близкой к фермиевской", *сооб. ОИЯИ, P2-80-597*, 1980, Дубна.

11. З.Омбоо, А.С.Пак, С.Б.Саакян, А.В.Тарасов, В.В.Ужинский// "Учет корреляций центра масс ядра-мишени в расчетах сечений инклюзивных реакций", *Письма в ЖЭТФ*, 1981, т. 33, с. 670.
12. V.V.Uzhinskii// "Approximation of independently cascading nucleons in the inelastic nucleus-nucleus scattering", *prep. JINR, E2-81-219*, 1981, Dubna.
13. V.V.Uzhinskii// "Nucleus-nucleus inelastic interaction cross sections calculating procedure", *JINR commun., E2-81-331*, 1981, Dubna.
14. В.В.Ужинский// "Вопросы теории неупругих взаимодействий легких ядер", *препр. ОИЯИ, P2-81-780*, 1981, Дубна.
15. В.В.Ужинский// "Оценка эффектов неупругих экранировок в упругом ядро-ядерном рассеянии", *препр. ОИЯИ, P2-81-789*, 1981, Дубна.
16. V.V.Uzhinskii// "Some results of the nucleus-nucleus scattering eikonal theory", *JINR commun., E2-82-426*, 1982, Dubna.
17. Z.Omboo, V.V.Uzhinskii// "List of diagrams for $^4\text{He} + ^4\text{He}$ interactions", *prep. JINR, E2-83-250*, 1983, Dubna.
18. V.V.Uzhinskii, Z.Omboo// "Preliminary results of the analysis of the CERN ISR data on $p\alpha$ - and $\alpha\alpha$ -interactions within the frame of eikonal model", *JINR commun., E2-83-254*, 1983, Dubna.
19. V.V.Uzhinskii, Z.Omboo// "Analysis of specific nucleus-nucleus scattering processes", *JINR commun., E2-83-816*, 1983, Dubna.
20. В.С.Барашенков, Ж.Ж.Мусульманбеков, Н.В.Славин, В.В.Ужинский// "О моделировании неупругих столкновений высокоэнергетических адронов", *ЯФ*, 1984, т. 39, с. ???.
21. А.М.Задорожный, В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "Стохастический метод вычисления характеристик ядро-ядерного рассеяния в эйкональном подходе", *ЯФ*, 1984, т. 39, с. 1155.
22. А.М.Задорожный, В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "Взаимодействие составляющих кварков в ядро-ядерных соударениях", *сооб. ОИЯИ, P2-86-316*, 1986, Дубна.

23. В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "К интерпретации "аномальных эффектов" во взаимодействиях α -частиц при $\sqrt{s} = 125$ ГэВ", *Письма в ЖЭТФ*, 1987, 45, с. 524.
24. S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinskii// "Transverse energy spectrum in the central region of $\alpha\alpha$ interactions: calculations using various models", *Zeit. für Phys.*, 1987, C36, p. 77.
25. В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "Как удовлетворить закону сохранения энергии-импульса и учесть ферми-движение конститuentов при моделировании взаимодействий составных систем", *ЯФ*, 1988, 48, с. 1097.
26. S.Yu.Shmakov, N.V.Slavin, V.V.Uzhinskii// "New putting-onto-mass-shell algorithm", *JINR commun.*, E2-88-792, 1988, Dubna.
27. А.С.Пак, В.В.Ужинский// "О применимости модели "раненых" нуклонов при промежуточных энергиях", *сооб. ОИЯИ*, P2-88-898, 1988, Дубна.
28. A.Polanski, S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinskii// "Description of inelastic nucleus-nucleus interactions at medium energy using dual parton model", *Zeit. für Phys.*, 1989, C43, p. 587.
29. S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinski, A.M.Zadorojny// "DIAGEN – Generator of inelastic nucleus-nucleus interactions diagrams", *Comp. Phys. Commun.*, 1989, v. 54, p. 125.
30. А.С.Пак, Л.Сэрдамба, В.В.Ужинский// "Обобщение модели Андерссона - Отгерлунда - Стенлунда для описания выхода медленных частиц во взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии", *сооб. ОИЯИ*, P2-90-113, 1990, Дубна.
31. V.G.Ableev, ..., V.V.Uzhinskii, S.A.Zaporozhets// "Diffraction scattering of alpha-particles on nuclei at 17.9 GeV/c" *Zeit. für Phys.*, 1991, v. A340, p. 191.
32. В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "О монте-карловских реализациях модели кварк-глюонных струн", *ЯФ*, 1991, 53, с. 1688.

33. В.В. Ужинский, С.Ю. Шмаков// "Сечения ядро-ядерных взаимодействий при высоких и сверхвысоких энергиях в квазиэikonальном подходе", *Деп. публ. ОИЯИ*. 1992. Б1-2-92-570, Дубна.
34. A.G.Galperin, A.S.Pak, V.V.Uzhinskii// "Slow particle multiplicity distributions for $^{197}\text{Au} + \text{Em}$ interactions", *JINR commun.*, 1992, E2-92-530. Дубна.
35. A.G.Artukh, ..., V.V.Uzhinskii// "Study of properties on Ne - Al neutron rich isotopes at and near N=20 magic shell using elastic scattering in inverse kinematics", *JINR commun.*, 1993, E7-93-74. Dubna.
36. A.G.Galperin, V.V.Uzhinskii// "The calculation of nucleus-nucleus interaction cross-sections at high energy in the Glauber approach". *JINR commun.*, 1994, E2-94-505. Дубна.
37. В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков// "Учет корреляций четра масс при моделировании ядерных реакций", *ЯФ*, 1994, 57, с. 1532.
38. V.V.Uzhinskii, Kh.Abdel-Waged, A.S.Pak, A.Polanski// "Estimation of nuclear destruction in high energy nucleus-nucleus interactions", *JINR commun.*, 1995, E2-95-296, Dubna.
39. M.El-Nadi, M.M.Sherif, A.Hussien, A.A.Fakeha, V.V.Uzhinskii// "On slow-particle production in 200 A GeV ^{16}O -emulsion interactions", *Nuovo Cimento A*, 1995, v. 108, p. 87.
40. Ф.А.Гареев, С.Н.Ершов, Г.С.Казача, С.Ю.Шмаков, В.В.Ужинский// "Изучение свойств экзотических ядер в упругом рассеянии", *ЯФ*, 1995, 58, с. 620.
41. V.V.Uzhinskii// "Modified code FRITIOF. User's Guide", *JINR commun.*, 1996, E2-96-192, Dubna.
42. А.С.Пак, В.В.Ужинский// "Систематическое сравнение расчетов по каскадно-испарительной модели с экспериментальными данными о множественностях рожденных частиц во взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии при энергиях 3.1 - 3.5 ГэВ/нуклон". *ЯФ*, 1996, 59, с. 1109.

43. Kh. El-Waged, V.V. Uzhinskii// "Model of nuclear destruction in high energy nucleus-nucleus interactions" *ЯФ*, 1997, т. **60**, с. 925.
44. M.I.Adamovich, ..., V.V. Uzhinskii et al. (EMU-01 Collaboration)// "Complex analysis of gold interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 GeV/nucleon within the framework of cascade and FRITIOF models", *Zeit. für Phys. A*, 1997, v. **358**, p. 337.
45. M.I.Adamovich, ..., V.V. Uzhinskii et al. (EMU-01 Collaboration)// "Multifragmentation of gold nuclei in the interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 GeV/nucleon", *Zeit. für Phys. A*, 1997, v. **359**, p. 277.
46. V.V. Uzhinskii and EMU-01 Collaboration)// "Multifragmentation of gold nuclei in the interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 A GeV", Conference on Nuclear and Particle Physics, 15 - 19 Nov., 1997, Cairo, Egypt.
47. В.Ш.Навотный, В.В.Ужинский// "Радиальный поток спектаторных фрагментов во взаимодействиях ядер золота с ядрами фотоэмульсии при энергии 10,7 А ГэВ", *ЯФ*, 1998, т. **61**, N 4.

Цитированная литература

1. G.D. Alkhasov et al.// *Nucl. Phys.*, 1977, v. **A280**, p. 365.
2. A. Chaumeaux et al.// *Nucl. Phys.*, 1976, v. **A267**, p. 413.
3. А.Б.Кайдалов, Л.А.Пономарев, К.А.Тер-Мартиросян// *ЯФ*, 1986, т. **44**, с. 722.
4. К.Г.Боресков, А.Б.Кайдалов, С.Т.Киселев, Н.Я.Смородинская// *ЯФ*, 1991, т. **53**, с. 569.
5. B.Andersson et al.// *Nucl. Phys.*, 1987, v. **B281**, p. 289; B.Nilsson-Almquist, E.Stenlund// *Comp. Phys. Comm.*, 1987, v. **43**, p. 387.
6. A.S. Botvina, I.N. Mishustin et al.// *Nucl. Phys. A*, 1995, v. **584**, p. 737.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1998 года.