

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-93-89.

УДК 539.172.17

На правах рукописи

ШМАКОВ
Сергей Юрьевич

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ФИЗИКИ
ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Специальность: 05.13.16 — применение вычислительной
техники, математических методов и математического
моделирования в научных исследованиях**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1993

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы разработки методов моделирования взаимодействий ядер с ядрами при высоких энергиях обусловлена как потребностями экспериментальной ядерной физики так и практическими задачами. В настоящее время в ряде крупных физических центров мира планируются и реализуются обширные программы экспериментальных исследований с использованием ядерных пучков. Получен большой объем экспериментальных данных при низких, промежуточных и высоких энергиях. Для интерпретации полученных данных и выбора наиболее перспективных направлений исследования необходимо развивать существующие теоретические подходы и разрабатывать новые, применимые во всем диапазоне ускорительных энергий. С точки зрения физики высоких энергий, исследование рождения большого числа частиц в ограниченном объеме может привести к выявлению новых черт как процесса множественного рождения частиц, так и структуры элементарных частиц. В настоящее время активно ведется поиск сигналов образования новой формы материи — кварк-глюонной плазмы, предсказываемой квантовой хромодинамикой. Такими сигналами могут быть повышенный выход странных частиц, подавление выхода J/ψ -частиц и ряд других. Часто эти сигналы замаскированы фоном, выделение которого становится особенно важной задачей. Недостаточно корректное выделение исследуемого сигнала из фона может приводить к ошибочной интерпретации получаемых экспериментальных данных и обнаружению "аномальных" явлений.

В последнее время в различных физических центрах наблюдается рост интереса к физике ядро-ядерных взаимодействий при промежуточных и низких энергиях. Изучение таких процессов может дать информа-

Общественный институт
специальных расследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории Вычислительной Техники и Автоматизации Объединенного Института Ядерных Исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Гареев

Фангиль Ахматгареевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Савелова

Татьяна Ивановна

кандидат физико-математических наук

Гончаров

Сергей Антонович

Ведущая организация: Российский Университет Дружбы Народов

Автореферат разослан "___" _____ 1993 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1993 г. на заседании специализированного Ученого совета Д047.01.04 Лаборатории Вычислительной Техники и Автоматизации Объединенного Института Ядерных Исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь совета

кандидат физико-математических наук Э.М.Иванченко

Иванченко

цию о свойствах и структуре экзотических ядер, уравнении состояния ядерного вещества при больших плотностях и температурах, а также о закономерностях возможных фазовых переходов в ядерной материи.

Практические задачи возникают в связи с разработкой новых экспериментальных установок и ускорителей и связанной с этим необходимостью оценки фоновых условий, а также в космическом материаловедении, в частности, при определении времени жизни электронных приборов под действием космического излучения, определенную часть которого составляют высокоэнергетические атомные ядра.

Самой первой задачей физики ядро-ядерных взаимодействий является описание амплитуд и сечений, являющихся определяющими для вычисления всех остальных характеристик. В теории адрон-ядерных взаимодействий общепризнанным инструментом для их нахождения является теория многократного рассеяния (ТМР) Глаубера-Ситенко, аппарат которой для этого случая детально разработан. Формальный переход от адрон-ядерных к ядро-ядерным взаимодействиям тривиален, однако проведение конкретных вычислений встречает большие трудности. Основной проблемой является нахождение суммы (конечной) эйконального ряда ТМР, число членов которого экспоненциально зависит от произведения массовых чисел сталкивающихся ядер, что практически исключает вычисление ряда путем его прямого суммирования даже для сравнительно легких ядер. Поэтому исследования развивались, в основном, в плоскости поиска приближенных аналитических выражений на основе выделения некоторого подмножества членов ряда. Значительный прогресс в разработке методов расчета характеристик ядро-ядерных взаимодействий был достигнут в рамках оптического приближения. В этом приближении конечный ряд ТМР заменяется бесконечным, который уда-

ется просуммировать для множества диаграмм без замкнутых петель. На этом пути однако возникают весьма серьезные проблемы сходимости аппроксимирующего ряда, нерешенные до сих пор. Нерешенным до конца остается и вопрос о роли петлевых диаграмм в ядро-ядерном рассеянии и задача вычисления сечений различных неупругих конфигураций NN -взаимодействий. Кроме того, аналитический подход требует введения многочисленных упрощающих предположений о виде ядерных плотностей и элементарных адрон-нуклонных амплитуд, затруднен учет экспериментальных условий и ограничений.

Для анализа процессов множественного рождения в настоящее время существует целый ряд генераторов искусственных событий, наиболее популярными среди которых являются LUND-модель и дуальная модель кварк-глюонных струн (МКГС). Однако, из-за трудностей связанных с вычислением выражений ТМР, большинство из них использует весьма грубые приближения для описания сечений.

И, наконец, остается открытым вопрос об описании процесса ядерной мультифрагментации, изучением которого интенсивно занимаются многочисленные экспериментальные группы. Несмотря на большое количество различных моделей в настоящее время не существует какого-либо общепринятого генератора мультифрагментационных событий.

Целью диссертационной работы является разработка методов моделирования различных характеристик процессов ядро-ядерных столкновений применимых в широком диапазоне энергий налетающих ядер и расчет характеристик упругих и неупругих процессов ядро-ядерных взаимодействий.

Научная новизна.

1. Разработан и реализован программным образом монте-карловский

метод вычисления амплитуды ядро-ядерного рассеяния. Предложенный метод не требует использования дополнительных приближений таких как переход к оптическому пределу по атомным номерам и пренебрежение радиусом NN -взаимодействия. Разработан вариант метода для учета эффектов неупругих экранировок и получены их оценки в сечениях протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений в рамках квазиэikonального приближения при сверхвысоких энергиях.

2. Разработан и реализован программным образом монте-карловский генератор неупругих конфигураций ядро-ядерных взаимодействий в соответствии с ТМР. Предложенный метод автоматически учитывает вклад всех диаграмм ядро-ядерного рассеяния. Показано, что диаграммы, не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях, играют существенную роль в как в сечениях так и в характеристиках множественного рождения частиц в ядро-ядерных взаимодействиях.
3. С помощью разработанных методов проанализировано упругое рассеяние пучков низкоэнергетических ядер на различных мишенях в рамках ТМР, проведено сравнение результатов расчетов с приближенными методами. Достигнуто удовлетворительное описание упругого рассеяния радиоактивного ядра ^{11}Li при 60 МэВ/нуклон.
4. Разработана монте-карловская реализация модели кварк-глюонных струн обеспечивающая точное выполнение закона сохранения энергии-импульса, учет процессов дифракционной диссоциации и нарушения правил Абрамовского-Грибова-Канчели при конечных энергиях. Получен набор вершинных функций фрагментации кварков

в адроны, удовлетворяющий реджевским асимптотикам. Достигнуто описание различных характеристик множественного рождения в широком диапазоне энергий.

5. Вычислено подавление выхода J/ψ -частиц в центральных ядро-ядерных столкновениях по сравнению с периферическими, обусловленное отличием кварк-глюонных структурных функций ядер от структурных функций свободных нуклонов. Показано, что этот механизм лишь частично объясняет величину экспериментально наблюдаемого эффекта.
6. Разработана перколяционная модель образования фрагментов в ядро-ядерных реакциях при высоких энергиях, позволяющая описать широкий набор экспериментальных данных.

Практическая ценность В целом, разработан аппарат моделирования амплитуд и сечений ядро-ядерных взаимодействий в ТМР на основе метода Монте-Карло. Разработанные в диссертации программы использовались для интерпретации экспериментальных данных по квазиупругому рассеянию α -частиц на ядрах при 17.9 ГэВ/с, неупругому dd - и $\bar{d}d$ -рассеянию при импульсе 12 ГэВ/с, данных FNAL по p - ^{20}Ne взаимодействиям при импульсе 300 ГэВ/с, данных по взаимодействию 3200 ГэВ ядер ^{16}O и 82 ГэВ ядер ^{20}Ne с эмульсией (коллаборация EMU01), а также при моделировании радиационных повреждений микрoэлектронных приборов пучками высокоэнергетических частиц и ядер.

Программа генерации диаграмм неупругих ядро-ядерных взаимодействий используется как составная часть в ряде генераторов искусственных событий. Разработанные алгоритмы и программы могут применяться для анализа различных экспериментальных характеристик упру-

гих и неупругих адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий. Программные и алгоритмические решения, разработанные в диссертации могут быть использованы в существующих и вновь создаваемых программах моделирования ядро-ядерных взаимодействий.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на семинарах ЛВТА и ЛТФ ОИЯИ, ЛИЯФ, ИТЭФ, ФИАН, докладывались на международных конференциях и совещаниях: "17 Spring Symposium on High Energy Physics", Кордобанг (1985), ГДР; "Hadron structure-87", Смоленце, (1987) ЧССР; "IX Международный семинар по проблемам физики высоких энергий", Дубна (1988) "International Workshop on Physical Experiments and First Results on Heavy Ion Storage and Cooler Rings", Смоленце, (1992) Чехословакия; "International conference on Nuclear structure and Nuclear reactions at low and intermediate energies" Дубна, (1992).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, одного приложения и списка литературы - всего страниц машинописного текста, включая 35 рисунков и библиографию из 198 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано краткое введение в круг задач физики ядро-ядерных взаимодействий, затронутых в диссертации, представлена общая структура изложения диссертации.

В первой главе рассматривается задача расчета амплитуды ядро-ядерного рассеяния и сечений различных процессов. Здесь кратко сформулированы основные положения теории Глаубера-Ситенко в применении к адрон-ядерному и ядро-ядерному рассеянию. Обсуждаются проблемы подходов связанного с использованием оптического приближения, а также

ряд стандартных приближений, используемых в расчетах - приближение некоррелированного распределения нуклонов в ядре, приближение толщины. Далее излагается алгоритм вычисления амплитуд и сечений ядро-ядерного рассеяния с помощью метода Монте-Карло.

Показано, что можно обойти технически очень сложную задачу приведения подобных членов и вычисления существенно различающихся членов ряда ТМР путем монте-карловского усреднения некоторых выражений по мере, определяемой волновыми функциями сталкивающихся ядер. На основе вероятностной интерпретации глауберовского приближения предложен реализованный в программе DIAGEN алгоритм генерации диаграмм неупругого ядро-ядерного рассеяния в соответствии с их сечениями. Использование метода Монте-Карло позволяет избежать дополнительных приближений таких как переход к оптическому пределу по атомным номерам и пренебрежение радиусом NN -взаимодействия.

Расчитаны сечения ряда различных неупругих процессов в $^{12}C^{12}C$ -взаимодействиях при высоких энергиях. Показано, что в многократных неупругих ядро-ядерных столкновениях существенную роль играют процессы, не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях, а в столкновениях тяжелых ядер диаграммы, содержащие замкнутые петли доминируют в сечениях рождения новых частиц.

Рассмотрен вопрос об учете неупругих экранировок, обусловленных переходом нуклонов в процессе рассеяния в пучки частиц с малой массой. На основе метода собственных состояний дано обобщение квазиэikonальной теории неупругих экранировок на случай ядро-ядерного рассеяния и сформулирован соответствующий монте-карловский алгоритм. Проведены оценки эффектов неупругих экранировок в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в рамках квазиэikonального подхода.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам моделирования процессов множественного рождения частиц в столкновениях ядер. Здесь кратко излагаются основы модели дуально-топологической унитаризации (модели кварк-глюонных струн) и обсуждается модификация правил разрезания Абрамовского-Грибова-Канчели при конечных энергиях в духе представлений аддитивной кварковой модели. Далее излагается алгоритм "вывода на массовую поверхность", позволяющий точно учесть закон сохранения энергии-импульса в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях. Предложенный алгоритм имеет самостоятельное значение и представляет интерес в связи с моделированием экспериментов на калориметрах. Изложен алгоритм моделирования множественного рождения в ядро-ядерных столкновениях, реализованный в программе NOLIAF. Проведено сравнение расчетов с выборочными экспериментальными данными в области высоких и промежуточных энергий.

В следующем разделе второй главы обсуждается роль многократных перерассеяний в характеристиках множественного рассеяния. Приведены результаты расчетов инвариантных сечений и спектров поперечной энергии частиц, рождающихся в центральной области $\alpha\alpha$ -взаимодейств при $\sqrt{s_{NN}} = 31.2$ ГэВ и показано, что корректный учет всех диаграмм неупругого $\alpha\alpha$ рассеяния в соответствии с TMR позволяет объяснить "аномалии" в поведении этих характеристик.

Отдельный раздел второй главы посвящен обсуждению обнаруженного группой NA-38 эффекта подавления выхода J/ψ -частиц в центральных соударениях $200 \cdot A$ ГэВ ядер кислорода с ураном по сравнению с периферическими. Это подавление может быть интерпретировано как сигнал образования кварк-глюонной плазмы. При этом, однако, необхо-

димо учитывать "обычные эффекты", которые могут имитировать образование кварк-глюонной плазмы. Вычислен вклад одного из таких возможных механизмов обусловленного различием кварк-глюонной структуры ядер и свободных нуклонов. Показано, что этот механизм лишь частично объясняет величину наблюдаемого эффекта.

В последнем разделе главы обсуждаются проблемы реализации модели кварк-глюонных струн при очень высоких энергиях и излагается метод восстановления вершинных функций по реджевским асимптотикам функций фрагментации. Полученный набор вершинных функций для процесса фрагментации кварков в адроны позволяет учесть рождение как легких, так и тяжелых мезонных и барпоновых резонансов. Вычисленные с его помощью функции фрагментации имеют в областях $z \rightarrow 0$ и $z \rightarrow 1$ поведение, требуемое моделью кварк-глюонных струн. Показано, что имеющееся в литературе утверждение о необходимости модифицировать квазиэikonальные сечения для описания данных по $\bar{p}p$ -взаимодействиям при энергиях $\sqrt{s} = 200 \div 900$ ГэВ связано с некорректным использованием в качестве вершинных функций функций фрагментации. Использование предложенных вершинных функций позволяет удовлетворительно описать распределения по множественности как в pp -взаимодействиях при различных энергиях, так и в $\bar{p}p$ -взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s} = 200 \div 900$ ГэВ не прибегая к модификации сечений образования многопомеронныхливней, полученных в квазиэikonальном подходе.

Третья глава диссертации посвящена процессу мультифрагментации ядер при высоких энергиях. Кратко обсуждается состояние проблемы и существующие теоретические подходы к ее описанию. Предложена перколяционная модель образования фрагментов в ядро-ядерных реак-

циях при высоких энергиях. Особенностью предложенной модели является то, что перколяционный подход используется для построения исходного ядра, которое представляется перколяционным кластером, а процесс мультифрагментации – как его разрушение вследствие развития первоначальных дефектов, образованных удалением части нуклонов "выбитых" на быстрой стадии процесса. Выбивание рассматривается на основе глауберовского приближения что позволяет избежать введения плохо определенных феноменологических зависимостей. Показано, что предложенная модель позволяет описать широкий набор экспериментальных данных в контексте мультифрагментации.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении приведены полученные в диссертации параметры функций фрагментации кварков в адроны.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] А.М.Задорожный, В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, *ЯФ* 39 (1984) 1155.
- [2] В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "К интерпретации "аномальных эффектов" во взаимодействиях α -частиц при $\sqrt{s} = 125$ ГэВ", *Письма в ЖЭТФ* 45 (1987) с.524
- [3] V.V.Uzhinski, S.Yu.Shmakov, "Transverse energy spectra in the central region of $\alpha\alpha$ interactions", *Z. Phys.* C36 (1987) 77.
- [4] V.V.Uzhinski, S.Yu.Shmakov, "How to satisfy the energy-momentum conservation law and to take into account the Fermi motion of the constituents of composite system interactions", *ЯФ* 48 (1988) 1097.

- [5] V.V.Uzhinski, S.Yu. Shmakov, A.M.Zadorojny, "DIAGEN - generator of inelastic AA-interaction diagrams", *Comp. Phys. Commun.* 54 (1989) 125.
- [6] V.V.Uzhinski, S.Yu.Shmakov, A.Polanski "Description of inelastic nucleus-nucleus interactions at medium energies using dual parton model", *Z. Phys.* C43 (1989) 587.
- [7] A.V.Efremov, V.T.Kim, V.V.Uzhinski, S.Yu. Shmakov, "Ядерные структурные функции и подавление выхода J/ψ мезонов в ядерных столкновениях" *ЯФ* 50 (1989) 1168.
- [8] В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "О монте-карловских реализациях модели кварк-глюонных струн", *ЯФ* 53 (1991) 1688.
- [9] F.A.Gareev, ..., S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinski, "Study of properties of exotic nuclei using elastic scattering. Theoretical consideration.", *препринт ОИЯИ Е4-92-458* (1992)
- [10] F.A.Gareev, ..., S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinski, "Elastic scattering and structure of exotic nuclei", In: *Proceedings of International Workshop on Physical Experiments and First Results on Heavy Ion Storage and Cooler Rings*, Smolenice, June 1-5, 1992, 25.
- [11] F.A.Gareev, ..., S.Yu.Shmakov, V.V.Uzhinski, "Elastic of nuclei ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{He}$, and ${}^{12}\text{C}$, ${}^{11}\text{Li}$ on proton and nuclei", in: *Proceedings of International conference on Nuclear structure and Nuclear reactions at low and intermediate energies NSNR Dubna*, (1992) p.81.(Abstract)
- [12] V.V.Uzhinski, S.Yu. Shmakov, "New realization of the $hh-$, $hA-$ and $AA-$ interaction fragmentation model", *Proc. of "Hadron Structure-87". Phys. and Appl.*, v.14 (1988) 85.

- [13] V.V.Uzhinski, S.Yu.Shmakov, N.V.Slavin "New putting-onto-mass-shell algorithm" *preprint JINR E2-88-792* (1988).
- [14] В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "Сечения ядро-ядерных взаимодействий при высоких и сверхвысоких энергиях в квазиэikonальном подходе.", *Депонированная публикация ОИЯИ Б1-2-92-570* (1992).
- [15] В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "Функции фрагментации в моделях кварк-глюонных струн", *Депонированная публикация ОИЯИ Б1-2-91-57* (1991).
- [16] V.V.Uzhinski, S.Yu. Shmakov, "Percolation and multifragmentation of nuclei" *preprint JINR E2-89-511* (1989).
- [17] А.М.Задорожный, В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "Взаимодействие составляющих кварков в неупругих АА-взаимодействиях", *препринт ОИЯИ Р2-86-361* (1986).
- [18] В.В.Ужинский, С.Ю.Шмаков, "Моделирование неупругих АА-взаимодействий в рамках ДПМ", *Депонированная публикация ОИЯИ Б1-11-86-768* (1986)

Рукопись поступила в издательский отдел
22 марта 1993 года.