

У-335

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

2-92-328

**УЖИНСКИЙ
Владимир Витальевич**

УДК 539.17.01

**ДРЕВЕСНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В ТЕОРИИ
МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЯДЕР ЯДРАМИ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
ТЕОРИИ НЕУПРУГИХ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

Специальность - 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1992

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Тарасов
старший научный сотрудник Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Тонеев
профессор Вячеслав Дмитриевич

кандидат физико-математических наук Боресков
ведущий научный сотрудник Константин Григорьевич

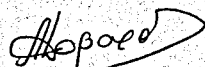
Ведущая организация: Физический Институт РАН

Автореферат разослан "___" _____ 1992 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1992 г. на заседании специализированного Ученого совета К 047.01.01 Лаборатории Теоретической Физики Объединенного Института Ядерных Исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических наук


А. В. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы создания количественной теории взаимодействий ядер с ядрами при высоких энергиях обусловлена несколькими причинами. Во-первых, практическими задачами космического материаловедения, в частности, необходимостью оценки "времени жизни" электронных приборов под действием космического излучения, определенную часть которого составляют атомные ядра. Во-вторых, потребностями экспериментальной ядерной физики высоких энергий. В настоящее время в ряде крупнейших физических центров мира планируются и реализуются обширные программы экспериментальных исследований с использованием ядерных пучков и мишеней. Интерес к ним, с точки зрения низкоэнергетической физики атомного ядра, обусловлен тем, что они могут дать информацию об уравнении состояния ядерного вещества при больших плотностях и температурах, о закономерностях ядерного перехода жидкость - газ, о процессе образования короткоживущих изотопов, их свойствах и т.д. С другой стороны, с точки зрения традиционной 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. Здесь обнадеживающе звучит предсказание квантовой хромодинамики на решетке о новой форме материи - кварк-глюонной плазме.

Однако, до реализации открывающихся перспектив еще далеко. Как в экспериментальном, так и в теоретическом планах остро стоят вопросы как о сигналах образования кварк-глюонной плазмы и условиях ее возникновения, так и о характеристиках фоновых,

"обычных" процессов. Нет сомнения, что большая часть взаимодействий ядер с ядрами обусловлена механизмом многократного рассеяния нуклонов, для описания которого в теории адрон-ядерных взаимодействий используется теория Глаубера - Ситенко. Ее достаточно полный аналог в теории ядро-ядерных соударений еще не создан.

Задача вычисления амплитуды упругого ядро-ядерного рассеяния в рамках глауберовского приближения была сформулирована в 1968 г. Виктором Франко. В последующие два года были найдены амплитуды рассеяния легчайших ядер и предложено выражение для оценки амплитуды рассеяния тяжелых ядер - "оптическое" приближение Чжа - Максимова (см. ссылки в [1]). Недостатки последнего послужили стимулом для развития других приближений. Наиболее общие результаты были получены В. Франко, Г. К. Вармой и И. В. Андреевым (см. ссылки в [1]). Особенно примечателен результат И. В. Андреева (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.

В работах [2,3] результаты И. В. Андреева были получены другим, традиционным способом, что значительно расширило область применения развиваемой теории. Однако, как в первом, так и во втором подходах оставался ряд нерешенных вопросов. Их решение требовало создания нового, альтернативного метода вычисления фазовой функции упругого ядро-ядерного рассеяния.

Цель диссертационной работы - анализ структуры амплитуды упругого рассеяния в пределе больших массовых чисел сталкивающихся ядер; разработка нового метода вычисления фазовой функции; расчет характеристик упругих и неупругих ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

Достижение указанных целей предполагает решение множества задач комбинаторного плана. Например, амплитуда упругого ядро-ядерного рассеяния состоит из $2^{AB}-1$ членов, где A и B - массовые числа сталкивающихся ядер. Первая задача - приведение подобных.

Научная новизна работы заключается в последовательном привлечении понятий и методов теории графов для решения комбинаторных задач как в приложении к задаче вычисления амплитуды упругого рассеяния, так и в теории неупругих реакций.

Анализ фазовой функции упругого рассеяния показал - ряд И. В. Андреева есть вклад деревьев в приближении малости радиуса NN-взаимодействия по сравнению с ядерными размерами, а указанный комбинаторный коэффициент равен числу 2-раскрашенных помеченных деревьев, которые можно построить на m и n вершинах.

В терминах теории графов сформулирована и решена задача вычисления неупругих сечений. Впервые показано, что в многократных ядро-ядерных столкновениях доминируют процессы, не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях.

Научные результаты достигнутые на этом пути следующие:

Предложен новый метод определения, вычисления фазовой функции упругого ядро-ядерного рассеяния. Найдены и вычислены поправки к амплитуде и фазе упругого ядро-ядерного рассеяния, обусловленные

однопетлевыми диаграммами, ненулевым радиусом NN- взаимодействия, корреляциями ядерных нуклонов, конечностью массовых чисел взаимодействующих ядер и, наконец, неупругими экранировками. Обнаружено, что наиболее существенные поправки связаны с конечностью массовых чисел взаимодействующих ядер.

Получены конкретные выражения для амплитуд образования изобарных ядер, реакций возбуждения и перезарядки, а также для сечения квазиупругого рассеяния и полного сечения неупругих реакций.

Полное сечение неупругих ядро-ядерных взаимодействий представлено в виде суммы сечений различных процессов. Для случая α -взаимодействий найдены все эти сечения и показано, что в многократных соударениях доминируют процессы, не имеющие аналога в адрон - ядерных взаимодействиях. Предложены обобщение модели Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда для описания выхода медленных частиц в процессах множественного рождения частиц в ядро-ядерных соударениях и обобщение модели каскада лидирующего бариона.

Практическая ценность.

Найдена сумма вкладов деревьев в фазовую функцию упругого ядро-ядерного рассеяния. Представлены основные поправки к ней. С учетом поправок достигнуто описание экспериментальных данных по упругому рассеянию α -частиц изотопами углерода и кальция при $T_\alpha = 1,37$ ГэВ. Достигнуто описание экспериментальных данных по дифференциальным сечениям возбуждений ядер в реакциях α -частиц с изотопами углерода и кальция при $T_\alpha = 1,37$ ГэВ. В рамках модельных представлений с использованием корректных сечений достигнуто описание характеристик вторичных частиц, рождающихся в ядро-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях.

В целом, разработан расчетный аппарат глауберовской теории ядро-ядерных взаимодействий.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР, представлялись на международные конференции и совещания, обсуждались на семинарах ОИЯИ.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в виде 6 журнальных статей, 14 препринтов и сообщений ОИЯИ, 2 сообщений в материалах конференции. Список приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы - всего 106 страниц машинописного текста, включая 39 рисунков и библиографию из 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор современного состояния теории многократного рассеяния ядер ядрами, сформулированы задачи и цели диссертационной работы, представлены общий план рассмотрения и основные результаты.

В первой главе рассматривается расчет амплитуды упругого ядро - ядерного рассеяния. В § 1 кратко изложены основные положения теории Глаубера - Ситенко в применении к адрон - ядерному рассеянию. Рассмотрен ряд стандартных приближений, используемых в расчетах - предположение о некоррелированности распределения нуклонов в ядре, приближение толщины - приближение

малости радиуса NN-взаимодействия по сравнению с ядерными размерами, переход к оптическому пределу. В § 2 приведено выражение для амплитуды ядро - ядерного рассеяния в виде ряда по степеням кратности нуклон - нуклонных столкновений в представлении прицельного параметра. Показано, что технически очень сложная задача приведения подобных членов и вычисления существенно различающихся членов этого ряда может быть сформулирована в терминах теории графов. Приведение подобных членов эквивалентно задаче о перечислении так называемых изоморфных графов. Введено понятие о связанных и несвязных диаграммах (графах) и показано, что в оптическом пределе по массовым числам ядер фазовая функция упругого ядро - ядерного рассеяния определяется только вкладами связанных диаграмм. С помощью понятия корневых диаграмм связанные диаграммы удается классифицировать и разбить на два класса - древесных диаграмм и диаграмм с петлями. В приближении толщины вклад первых из них в фазовую функцию можно записать в виде бесконечного двойного знакопеременного ряда, который удается просуммировать (§ 3). Тем самым решается задача о вычислении фазовой функции - $\chi(\vec{B})$, а, следовательно, и амплитуды упругого ядро - ядерного рассеяния в древесном приближении.

$$\chi(\vec{B}) = \frac{2}{\sigma} \int d^2s [x + y - u - z - uz], \quad (1)$$

$$\begin{cases} u = y e^{-z} \\ z = x e^{-u} \end{cases} \quad (2)$$

$$y = \frac{2}{\sigma} T_B(\vec{B}-\vec{s}), \quad x = \frac{2}{\sigma} T_A(\vec{s}), \quad \sigma = \sigma_{NN}^{tot} (1 - i \operatorname{Re} f(0)/\operatorname{Im} f(0)).$$

T_A и T_B - функции толщин ядер, $f(\vec{q})$ - амплитуда упругого NN-рассеяния, σ_{NN}^{tot} - полное сечение NN- взаимодействий.

Что касается диаграмм с петлями (графов с циклами), то для оценки их вклада необходимо задать конкретную параметризацию амплитуды N-N рассеяния. В рамках гауссовой параметризации показано, что вклад диаграмм с петлями содержит малый параметр $\epsilon \approx \sigma_{NN}^{el}/\sigma_{NN}^{tot} \approx 0.25$. При этом вклад n-петлевых диаграмм пропорционален ϵ^n . Вычислен вклад однопетлевых диаграмм в фазовую функцию упругого рассеяния. Его величина сравнивается с вкладом древесных диаграмм.

Результаты расчетов дифференциального сечения упругого рассеяния α -частиц на ядрах углерода и кальция при энергии $T_\alpha = 1,37$ ГэВ сравниваются с экспериментальными данными и результатами других приближений (см. рис. 1).

Детально проанализирована точность расчетов. Показано, что в существенной области изменения прицельного параметра поправки к приближению толщины порядка 2 - 5%. Предложен метод учета корреляционных эффектов и поправок к оптическому приближению. Поправки к оптическому приближению, учитывающие конечность массовых чисел сталкивающихся ядер A и B, рассчитаны с точностью порядка $1/A$, $1/A^2$, $1/B$, $1/B^2$.

Отдельно рассмотрен вопрос об учете неупругих экранировок, обусловленных переходом нуклонов в процессе рассеяния в пучки частиц с малой массой. В теории адрон - ядерных взаимодействий для решения этой задачи было предложено несколько подходов. В последнем разделе главы I на основе метода собственных состояний оператора рассеяния дано их обобщение на случай ядро - ядерного рассеяния. Численные оценки показали, что учет неупругих экранировок в среднем дает 5% -ую поправку к полным сечениям; в

дифференциальных сечениях величина эффекта зависит от величины передаваемого импульса.

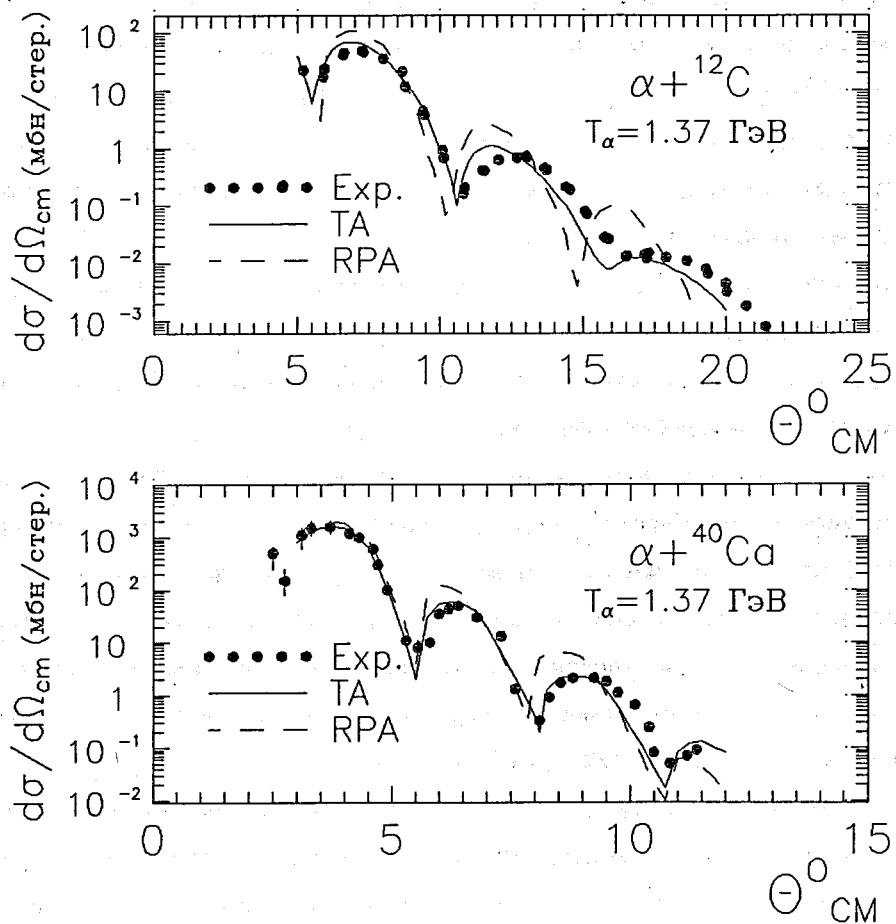


Рис 1.

Дифференциальные сечения упругого ${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C}$ и ${}^4\text{He} + {}^{40}\text{Ca}$ рассеяний при $T_\alpha = 1,37$ ГэВ. Точки - экспериментальные данные. Сплошная и пунктирная кривые - расчеты в древесном приближении и в приближении "жесткого" налетающего ядра, соответственно.

Во второй главе диссертации развивается техника расчета амплитуд и сечений некоторых важных некогерентных ядро - ядерных реакций. Простейшим примером является возбуждение однонуклонного уровня. В глауберовском подходе амплитуда такого процесса в адрон - ядерных взаимодействиях связана с функциональной производной амплитуды упругого рассеяния по функции толщины ядра. Это же справедливо и в теории ядро - ядерных взаимодействий. Использование здесь древесного приближения позволило получить конкретное выражение для амплитуды возбуждения. С его помощью выполнены численные расчеты на ЭВМ, результаты которых сравниваются с экспериментальными данными (см. рис. 2).

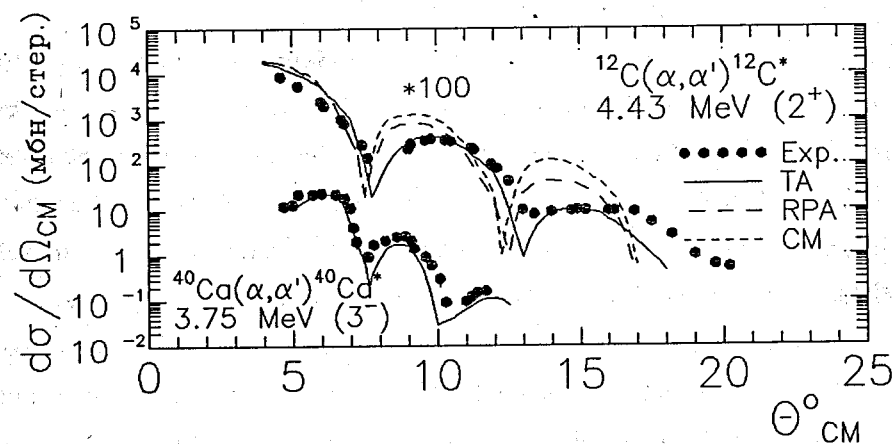


Рис. 2.

Дифференциальные сечения реакций возбуждений. Точки - экспериментальные данные. Сплошная кривая - расчет в древесном приближении. Штриховая и пунктирная кривые - расчеты в приближениях "жесткого" налетающего ядра и Чича-Максимона, соответственно.

Более сложным примером некогерентного процесса является квазиупругое ядро - ядерное рассеяние, сопровождающееся возбуждением или развалом ядра - мишени. Способ вывода выражения для сечения квазиупругого ядро - ядерного рассеяния аналогичен тому, который использовался для получения сечения квазиупругого адрон - ядерного рассеяния. При этом существенно используется условие полноты для волновых функций конечных состояний возбуждающегося ядра. В результате для сечения квазиупругого ядро - ядерного рассеяния удается получить замкнутое выражение. По своей структуре оно сходно с соответствующим выражением для адрон - ядерного рассеяния, однако с вычислительной точки зрения значительно сложнее.

Отдельный раздел главы II посвящен процессам типа перезарядки. Их исследование представляет интерес в связи с тем, что они весьма информативны с точки зрения изучения структуры ядер. Примером может служить хорошо известная проблема о нейтронном гало в нейтроноизбыточных ядрах или, говоря по другому, вопрос о различии распределений протонов и нейтронов в ядрах.

Сначала рассмотрена упрощенная постановка задачи - оценка амплитуды образования изобарных ядер в простейшем предположении о виде переходной плотности. В общем случае используется то, что в области высоких энергиях сечение нуклон - нуклонной перезарядки существенно меньше сечения упругого нуклон - нуклонного рассеяния. Поэтому амплитуда ядро - ядерной перезарядки строится в виде ряда по степеням амплитуды N-N перезарядки. В первом порядке это соответствует замене в каждом члене ряда многократного рассеяния одной амплитуды упругого нуклон - нуклонного рассеяния на

амплитуду нуклон - нуклонной перезарядки. Очевидно, что искомая амплитуда может быть связана с функциональной производной амплитуды упругого ядро-ядерного рассеяния по амплитуде упругого NN-рассеяния, когда переходная плотность мало отличается от одночастичной плотности ядра.

Более корректное рассмотрение проведено в § 3, где определяется и амплитуда процесса двукратной перезарядки с помощью метода корневых диаграмм.

В третьей главе диссертации анализируются характеристики процессов множественного рождения частиц при столкновениях двух ядер. Здесь предложено конкретное графическое (диаграммное) представление неупругих процессов. С его помощью полное неупругое сечение ядро-ядерных реакций представлено в виде суммы вкладов отдельных диаграмм. Далее на основе вероятностной интерпретации глауберовского приближения неупругое сечение представлено в виде суммы сечений процессов, отличающихся как числом внутриядерных соударений, так и конфигурацией этих столкновений. Предложена процедура вычисления сечений и рассчитаны сечения различных процессов в ${}^4\text{He}+{}^4\text{He}$ - взаимодействиях при высоких энергиях. На основе анализа сечений сделан вывод о том, что в многократных ядро-ядерных столкновениях доминируют процессы, не имеющие аналога в адрон-ядерных взаимодействиях.

С точки зрения реджевского подхода в предположении о доминировании в упругом нуклон-нуклонном рассеянии однопомеронного обмена полученные в данном разделе результаты можно интерпретировать как конкретное применение общих правил разрезания Абрамовского - Грибова - Канчели. В частности, их конкретное

применение к амплитуде упругого ядро-ядерного рассеяния: Поскольку амплитуда упругого ядро-ядерного рассеяния может быть вычислена в различных приближениях, открывается путь построения различных приближений в теории неупругих реакций. В качестве примера в диссертации представлен аналог приближения Чиха - Максимова.

Ранее (см. ссылки в [19]) в рамках этого приближения для описания множественности рожденных частиц была предложена, так называемая модель "раненых" нуклонов. В диссертации показано, что корректный учет всех диаграмм неупругих ядро-ядерных реакций позволяет достичь согласия предсказаний этой модели с экспериментальными данными. В частности, получить описание выхода π^- -мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях при импульсе $4.5 \cdot A$ ГэВ/с (рис. 3).

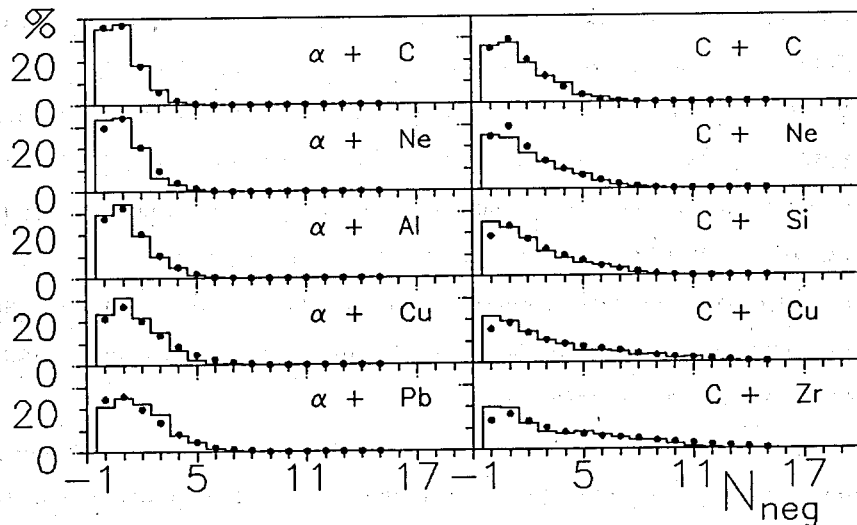


Рис. 3.

Распределения по множественности отрицательно заряженных частиц. Гистограмма - экспериментальные данные, точки - расчет.

Знание сечений неупругих процессов позволяет развивать различные модели множественной генерации частиц. Так в § 3 главы III представлено обобщение модели Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда в применении к ядро-ядерным взаимодействиям для описания выхода медленных частиц. В рамках этого обобщения достигнуто согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными по выходам g - и b - частиц, наблюдаемым во взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии (см. рис. 4).

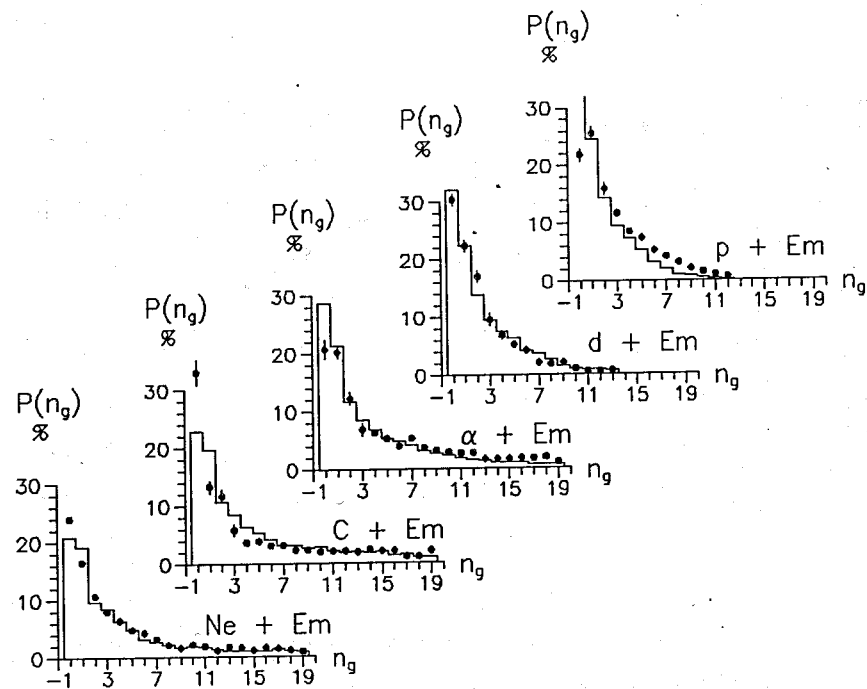


Рис. 4

Распределения по множественности g -частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при $4.2 \cdot A$ ГэВ/с. Точки - экспериментальные данные. Гистограммы - расчет.

В § 4 главы III рассмотрено обобщение модели каскада лидирующего бариона. Ранее эта модель, берущая свое начало в глауберовской теории энергетических потерь частиц в квазиупругом рассеянии, применялась в теории адрон-ядерных взаимодействий. Для использования ее в теории ядро-ядерных соударений потребовалась некоторое уточнение. В результате, достигнуто описание характеристик вторичных частиц во взаимодействиях α -частиц при $\sqrt{s_{\alpha\alpha}} = 126$ ГэВ.

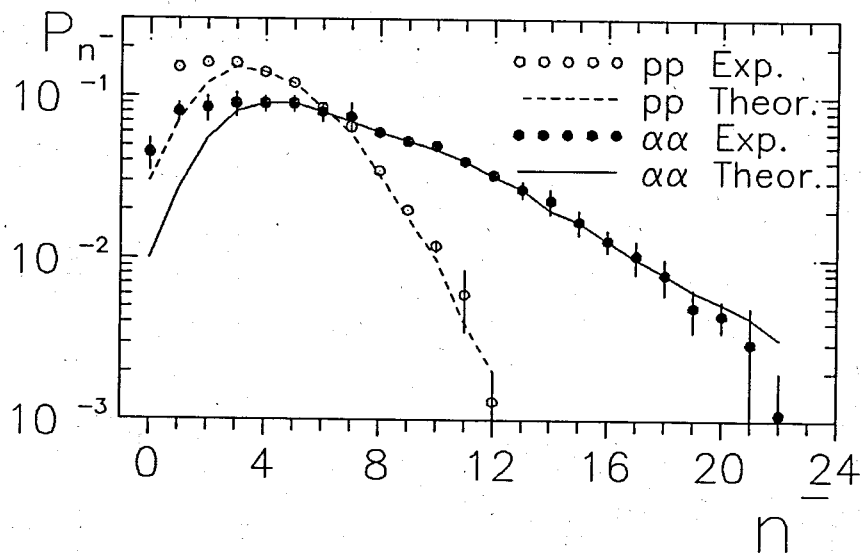


Рис. 5.

Расчетные и экспериментальные распределения по множественности отрицательно заряженных частиц в неупругих взаимодействиях α -частиц при $\sqrt{s_{NN}} = 31,5$ ГэВ.

В Заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В Приложения вынесены вопросы, представляющие самостоятельный интерес и часто используемые в расчетах. В Приложении А рассматриваются вопросы связанные с суммированием рядов. В частности, суммирование вклада древесных диаграмм в фазовую функцию упругого ядро - ядерного рассеяния. В Приложении В подробно обсуждается метод корневых диаграмм, используемый для вычисления некоторых амплитуд и сечений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.В. Ужинский, Ч. Цэрэн//Ядерно-ядерное взаимодействие в приближении Глаубера - препринт ОИЯИ, P2-12079, 1979, Дубна.
2. 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.
3. А.С. Пак, А.В. Тарасов, В.В. Ужинский, Ч. Цэрэн// Фазовая функция в ядро-ядерном рассеянии -ЯФ, 1979, т. 30, с. 102.
4. А.С. Пак, В.В. Ужинский, Ч. Цэрэн// О взаимодействии ядер с ядрами при высоких энергиях - ЯФ, 1979, т. 30, с. 343.
5. В.В. Ужинский// Классификация диаграмм, описывающих упругое ядро-ядерное рассеяния -препринт ОИЯИ, P2-13054, 1980, Дубна.
6. И.У. Христова, З.Омбоо, А.С.Пак, А.В.Тарасов, В.В.Ужинский// Сечение квазиупругого ядро-ядерного рассеяния в оптическом приближении - препринт ОИЯИ, P2-80-54, 1980, Дубна.
7. V.V. Uzhinskii// Approximation of independently cascading nucleons in the inelastic nucleus-nucleus scattering - preprint JINR, E2-81-219, 1981, Dubna.

8. V.V. Uzhinskii// Nucleus-nucleus inelastic interaction cross section calculating procedure -preprint JINR, 1981, E2-81-331, Dubna.
9. В.В. Ужинский// Вопросы теории неупругих взаимодействий легких ядер - препринт ОИЯИ, 1981, P2-81-780, Дубна.
10. В.В. Ужинский// Оценка эффектов неупругих экранировок в упругом ядро-ядерном рассеянии - препринт ОИЯИ, P2-81-789, 1981, Дубна.
11. V.V. Uzhinskii// Some results of the nucleus-nucleus scattering eikonal theory -preprint JINR, 1982, E2-82-426.
12. Z. Omboo, V.V. Uzhinskii// List of diagrams for $^4\text{He}-^4\text{He}$ interactions -preprint JINR, 1983, E2-83-250, Dubna.
13. Z. Omboo, V.V. Uzhinskii// Preliminary results of the analysis of the CERN ISR data on $p\alpha$ - and $\alpha\alpha$ - interactions within the frame of eikonal model - preprint JINR, 1983, E2-83-254, Dubna.
14. А.М. Задорожный, В.В. Ужинский, С.Ю. Шмаков// Стохастический метод вычисления характеристик ядро-ядерного рассеяния в эйкональном подходе - ЯФ, 1984, т. 39, в. 5, с. 1155.
15. V.V. Uzhinskii, Z. Omboo, // Analysis of specific nucleus-nucleus scattering processes - preprint JINR, 1983, E2-83-816, Dubna.
16. А.М. Задорожный, В.В. Ужинский, С.Ю. Шмаков// Взаимодействие составляющих кварков в ядро-ядерных соударениях - препринт ОИЯИ, 1986, P2-86-361, Дубна.
17. В.В. Ужинский, С.Ю. Шмаков// К интерпретации "аномальных" эффектов во взаимодействиях α -частиц при $\sqrt{s} = 125$ ГэВ - Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 45, с. 524.

18. S.Yu.Shmakov, V.V. Uzhinskii// Transverse energy spectrum in the central region of $\alpha\alpha$ interactions: calculations using various models - Zeit. fur Phys., 1987, C36, p.77.
19. А.С. Пак, В.В. Ужинский// О применимости модели "раненых" нуклонов при промежуточных энергиях - препринт ОИЯИ, 1988, P2-88-898, Дубна.
20. А.С. Пак, Л. Сэрдамба, В.В. Ужинский// Обобщение модели Андерссона - Оттерлунда - Стенлунда для описания выхода медленных частиц во взаимодействиях ядер с ядрами фотоэмульсии-препринт ОИЯИ, 1990, P2-90-113, Дубна.
21. 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., Vancouver, 1979, p. 164.
22. 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 Nucl. Structure, 8th. Vancouver, 1979, Abstracts., Vancouver, 1979, p. 165.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1992 года.