

T-57



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2 - 12187

ТОНЕЕВ

Вячеслав Дмитриевич

ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ
И ЛЕГЧАЙШИХ ЯДЕР С ЯДРАМИ
В ОБЛАСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность - 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук



Дубна 1979

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент АН СССР,
профессор

М. Г. МЕШЕРЯКОВ

доктор физико-математических наук
профессор

Г. М. ВАГРАДОВ

доктор физико-математических наук

И. Н. МИХАЙЛОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Радиевый институт АН СССР им. В. Г. Хлопина, Ленинград

Автореферат разослан " " _____ 1979 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1979 года на заседании специализированного Совета Д047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета

Р. А. АСАНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В исследовании взаимодействий быстрых частиц с ядрами тесно переплетаются фундаментальные вопросы физики элементарных частиц и структуры атомного ядра. Действительно, в настоящее время убедительно показано, что из адрон-ядерных взаимодействий может быть извлечена нетривиальная информация о структуре ядра; с другой стороны, само ядро может играть роль селектора, отбирающего необходимые амплитуды элементарного взаимодействия. Более того, ядерная физика высоких энергий открывает уникальные возможности для изучения взаимодействия нестабильных частиц - или в более общей формулировке - для исследования пространственно-временной картины адронных столкновений. В то же самое время в ядерных реакциях при высоких энергиях обнаружен ряд специфических явлений, природа которых до сих пор еще до конца не выяснена. Это - выбивание из ядра сложных частиц высокой энергии, эмиссия тяжелых фрагментов, глубокое ядерное расщепление и т.п. Большое внимание привлекает актуальная проблема рождения в таких процессах кумулятивных частиц. Не исключена возможность проявления в ядерных соударениях каких-то новых форм коллективного движения ядерной материи или необычных состояний ядра. Широкие перспективы, открывающиеся в исследовании взаимодействий двух ядер при высоких энергиях, привели к созданию нового направления - релятивистской ядерной физики. Универсальность сильных взаимодействий, проявляющаяся в подобии ряда основных характеристик адрон-адронных и адрон-ядерных столкновений, ставит интересную проблему о связи механизма ядерной реакции со свойствами элементарных взаимодействий.



Исследование фундаментальных проблем ядерной физики стимулируется также необходимостью решения широкого круга прикладных задач, в частности, вопросов радиационной защиты ускорителей и космических аппаратов, ряда геофизических и космофизических задач.

Решение отмеченного круга проблем предполагает глубокое понимание физики происходящих ядерных процессов, развитие теории неупругих взаимодействий частиц с ядрами. Традиционные методы теории ядерных реакций, успешно используемые при извлечении информации о структуре ядра (Борновское приближение, приближение искаженных волн, методы учета связи каналов и т.п.), не подходят для рассмотрения реакций, когда происходит существенное изменение ядра-мишени, а в конечном состоянии имеется большое число частиц. С другой стороны, методы, развиваемые для многочастичных реакций в адронной физике высоких энергий (статистическая модель Ферми, гидродинамический подход, мультипериферические модели и т.п.), не могут быть просто перенесены на случай ядерных взаимодействий для обсуждаемой переходной области энергий от десятков Мэв до двух-трех десятков Гэв. Необходимо разработать новые методы, учитывающие отмеченную специфику явления. Здесь многообещающим представляется направление, использующее общую идею статистической физики с "сокращенном", "огрубленном" описании системы. Впервые эта идея была четко высказана и реализована в работах Н.Н.Боголюбова, давшего микроскопическое обоснование кинетическому и гидродинамическому подходам.

Целью работ является построение в рамках кинетического подхода теоретических методов описания неупругого взаимодействия быстрых частиц и легчайших ядер с атомными ядрами, исследование на их основе общих закономерностей ядерных реакций в области энергий $T_0 \lesssim 30$ Гэв, выявление основного механизма неупругих ядерных соударений, приложение развитых методов к решению проблемы прохождения высокоэнергетического излучения через вещество.

Научная новизна и практическая ценность

Новым вкладом является разработка совокупности конкретных моделей (каскадной, усовершенствованной каскадной, каскадно-экситонной), реализующей кинетический подход к ядерным реакциям,

иницируемым быстрыми адронами, γ -квантами и легчайшими ядрами.

Впервые на основе единого кинетического подхода дано теоретическое описание многочисленных экспериментальных данных в области физики промежуточных и высоких энергий, установлены и получили объяснение общие закономерности ядерных реакций, их проявление в специфических процессах (фрагментация, высокоэнергетическое деление и расщепление ядер, предравновесная эмиссия частиц) и особенности, связанные с типом и энергией бомбардирующей частицы.

Разработанные теоретические методы стали практическим инструментом для анализа экспериментальных данных, служат основой для оценок и предсказаний разнообразных характеристик неупругих ядерных взаимодействий, явились базой построения универсальных методов расчета прохождения высокоэнергетических частиц через вещество.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации

1. Развита каскадно-испарительная модель адрон-ядерных реакций и на ее основе дан систематический анализ имеющихся экспериментальных данных по неупругим ядерным соударениям. Выявлена область энергий, где взаимодействие адрона с ядром может быть сведено к серии независимых двухчастичных соударений. Указаны характеристики, наиболее чувствительные к изменению механизма реакции. Представлена систематика предсказаний каскадной модели, полезная при планировании экспериментов.

2. При промежуточных ($T_0 < 1$ Гэв) энергиях бомбардирующей частицы обнаружен существенный вклад ядерных эффектов в процесс образования на ядрах быстрых протонов в кинематической области, запрещенной для свободного рассеяния частиц. Здесь установлена слабая чувствительность инклюзивных распределений к деталям механизма взаимодействия.

3. Установлено и исследовано изменение механизма адрон-ядерного взаимодействия при энергиях $T_0 \approx (3-5)$ Гэв. Построена усовершенствованная каскадная модель, позволяющая объяснить этот факт за счет локального изменения плотности ядра по мере развития внутриядерного каскада. В рамках усовершенствованной каскадной модели дано объяснение основных свойств высокоэнер-

гетического деления, фрагментации и явления полного распада ядер.

4. Показано, что при $T_0 \lesssim 100$ Мэв существенный вклад в образование быстрых частиц дает механизм предравновесной эмиссии. В этой связи предложена экситонная модель предравновесного распада ядер и разработана каскадно-экситонная модель ядерных реакций, расширяющая область применимости кинетического подхода на энергии $T_0 \lesssim 100$ Мэв.

5. Сформулирована гипотеза ядерного квазискейлинга, выражающая важную роль предравновесной эмиссии в процессе образования частиц вне кинематической области, доступной для свободного рассеяния. Проанализированы следствия этой гипотезы, допускающие экспериментальную проверку.

6. Дано обобщение модели внутриядерного каскада на случай фотоядерных реакций при высоких энергиях. На базе этой модели впервые получила объяснение большая совокупность экспериментальных данных в области выше порога фоторождения π -мезонов.

7. Построена каскадная модель реакций, инициируемых ядрами дейтерия, трития и гелия. Исследованы общие закономерности неупругих ядро-ядерных соударений.

8. На основе развитых моделей адрон-ядерных реакций разработаны конкретные методы расчета взаимодействия быстрых частиц с блоками вещества, включая делящиеся среды, что имеет большое значение для решения ряда прикладных задач.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики. Ряд результатов доложен на XI Международной конференции по космическим лучам (Будапешт-1969), Международной школе ЦЕРН-ОИЯИ (Варна-1971), Гордоновской конференции по ядерной химии (США - 1970, 1972), Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Нью-Йорк-1969, Дубна-1971), Международном семинаре по взаимодействию быстрых нейтронов с ядрами (Гауссиг - 1973, 1975), Всесоюзной конференции по ядерным реакциям при высоких энергиях (Тбилиси-1972), Советании по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна-1973).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 53 статьи. Существенная часть результатов вошла в монографию "Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами".

Объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав основного содержания, заключения и приложения, содержит 226 страниц машинописного текста, 75 рисунков, 15 таблиц и библиографический список литературы из 268 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложен материал диссертации и дано обоснование актуальности и важности поставленных проблем.

В первой главе диссертации исследованы основные физические предположения, при которых из динамических обратимых уравнений для A частиц приходят к "огрубленным" уравнениям, описывающим необратимые процессы. При этом обсуждаются те формы необратимых уравнений, которые нашли применение в теории ядерных реакций, - обобщенное кинетическое (мастер-) уравнение, уравнение Больцмана, Фоккера-Планка, гидродинамические уравнения. Это позволяет выяснить условия применимости уравнений, являющихся отправной точкой для развиваемых в последующих главах феноменологических моделей взаимодействия частиц с ядрами.

Вторая глава диссертации посвящена построению каскадной модели ядерных реакций на основе болыцмановского уравнения. Обсуждаемые в § 2.1 условия применимости уравнения Больцмана к описанию ядерной реакции требуют, чтобы энергия рассматриваемой частицы была достаточно высока,

$$T \gg V_{сб} \quad \text{или} \quad \lambda \ll \Delta \quad (1)$$

(здесь $V_{сб}$ - энергия связи нуклона в ядре, Δ - среднее межнуклонное расстояние), а время взаимодействия было бы много меньше времени между последовательными соударениями частиц,

$$t_{вз} \ll 1 / \langle \sigma \rho \rangle v, \quad (2)$$

где $\langle \bar{\sigma} \rho \rangle^{-1}$ — средний свободный пробег частицы в ядре. В пренебрежении остаточными взаимодействиями между быстрыми (каскадными) частицами уравнение Больцмана линеаризуется, и для скалярного потока частиц $\Phi(\vec{r}, \vec{v}, t)$ в случае полубесконечной ядерной материи может быть приведено к интегральному уравнению

$$\Phi(\vec{r}, \vec{v}, t) = \Phi_0 \exp\left[-\int ds \langle \bar{\sigma} \rho \rangle\right] + \int_0^s ds' \exp\left[-\int_0^{s'} ds'' \langle \bar{\sigma} \rho \rangle\right] Q(\vec{r}-s'\vec{\Omega}, \vec{v}, t-s'/v), \quad (3)$$

где Φ_0 — падающий поток частиц, а функция источника Q выражается через интеграл от Φ . Уравнение (3) совпадает по форме с уравнением, описывающим прохождение частиц через вещество, что позволяет дать ему простую вероятностную интерпретацию и с помощью метода Монте Карло развить соответствующую схему решения. Отмеченная аналогия выражает основную идею каскадной модели, которая сводит взаимодействие быстрого адрона с ядром к серии последовательных столкновений частицы с внутриядерными нуклонами. Конкретная реализация модели представлена в § 2.2. При этом учтены диффузность распределения ядерной материи и ядерного потенциала, эффекты внутриядерного движения нуклонов и принцип Паули, процессы пинообразования и поглощения π -мезонов на квазидейтроновых парах. Распад возбужденных ядер, образовавшихся после прохождения через ядро лавины каскадных нуклонов, рассматривается на основе равновесной статистической теории последовательной эмиссии ("испарения") частиц (§ 2.3).

В рамках развитой каскадно-испарительной модели в следующем параграфе диссертации выполнен анализ имеющихся экспериментальных данных по неупругому соударению протонов и π -мезонов с ядрами при энергиях от нескольких десятков Мэв до $T_0 \sim 30$ Гэв, выявлена область реализации каскадного механизма реакции и степень расхождения предсказаний модели с опытом. Показано, что в области энергий $T_0 \approx (0.1-5)$ Гэв модель дает хорошее описание средних множественностей частиц, их угловых распределений, энергетических спектров, а также двойных дифференциальных распределений вне кинематической области, характерной для дифракционного рассеяния частиц.

При более высоких T_0 теоретические множественности нерелятивистских (g - и b -) частиц^{*)} начинают превышать эксперимен-

^{*)} Мы используем терминологию, принятую в опытах с ядерной фотоэмульсией: релятивистские s -частицы ($v \geq 0,7c$), g -частицы (протоны с $30 < T < 450$ Мэв, π -мезоны с $T < 80$ Мэв) и b -частицы (протоны с $T < 30$ Мэв и многозарядные частицы).

тальные: модель предсказывает монотонный рост $\bar{N}_g(T_0)$ и $\bar{N}_b(T_0)$, тогда как экспериментальные значения выходят на "плато". Это расхождение четко проявляется в характере корреляционных кривых $\bar{N}_g(N_s)$. Расхождение с опытом по множественности релятивистских s -частиц наступает при энергиях выше ~ 20 Гэв.

Ограничения на применимость каскадно-испарительной модели со стороны малых энергий, обусловленные нарушением условия (I), проявляются при $T_0 \approx 100$ Мэв. Характер отклонений от предсказаний каскадной модели указывает на вклад процессов предравновесной эмиссии частиц.

Для области энергий $0,1 \leq T_0 \leq 5$ Гэв, где такая модель оправдана, даны теоретические предсказания для различных характеристик неупругих нуклон- и мезон-ядерных взаимодействий. Это важно для сопоставления с результатами последующих опытов и планирования новых экспериментов.

В § 2.5 исследована чувствительность полученных результатов к параметрам модели и дано ее сравнение с другими версиями каскадной модели.

В связи с проблемой ядерного скейлинга исследован механизм реакции, приводящий к вылету быстрого протона в заднюю полусферу (§ 2.6). Развитая теория применена к анализу соответствующего эксперимента, выполненного в ЛЯП ОИЯИ при $T_0 = 640$ Мэв. Сказалось, что, во-первых, в образование таких протонов существенный вклад дает процесс рождения π -мезона в ядре с последующим поглощением его дьухнуклонной ассоциацией, распадающейся с вылетом протона назад. Во-вторых, из полученных результатов следует, что инклюзивные распределения слабо чувствительны к деталям механизма взаимодействия частицы с ядром.

В начале третьей главы диссертации рассматриваются физические эффекты, которые при $T_0 \geq 5$ Гэв приводят к изменению механизма адрон-ядерного взаимодействия, обсуждаемого в предыдущей главе.

Аналогия с прохождением частиц через непрерывную среду, выраженная уравнением (3), оправдана, если число нуклонов ΔA , вовлеченных в каскадную лавину, невелико, $\Delta A \ll A$, и не приводит к существенному изменению свойств ядра. При высоких энергиях и в случае легких ядер-мишеней это условие не выполняется. В связи с этим в § 3.2 развита новая каскадная модель, которая учитывает, что быстрые релятивистские частицы, образующиеся уже в пер-

вых актах неупругих $пN$ или NN столкновений, приводят к локальному изменению ядерной плотности. В результате более медленные, g -частицы, сталкиваются с относительно меньшим числом внутриядерных нуклонов. Этот эффект назван эффектом "траления" или "обеднения" ядерной плотности по мере развития внутриядерного каскада. Его учет позволяет количественно объяснить выход множественности низкоэнергетических частиц, $\bar{N}_g(T_0)$ и $\bar{N}_b(T_0)$, на "плато". Такой режим достигается при $T_0 \approx (3-5)$ ГэВ для ядра Ag и при $T_0 \approx 0,8$ ГэВ для легкой мишени ^{12}C . Модель правильно объясняет также другие характеристики реакции, в частности, корреляции множественности $\bar{N}_g(N_S)$. Следует отметить, что расхождение по множественности s -частиц при $T_0 \gtrsim 20$ ГэВ остается и в этой усовершенствованной каскадной модели; его причины рассмотрены ниже.

Другим ограничением каскадной модели со стороны высоких энергий является условие (2), которое предполагает, что каждая частица, образованная в ходе внутриядерного каскада, успевает до последующего акта взаимодействия "развиться", "сформироваться" до своего асимптотического состояния. Рождение резонансов, интенсивно происходящее при энергии в несколько ГэВ, и их вовлечение во внутриядерный каскад приводят к нарушению условия (2). На основе каскадной модели в § 3.3 выполнена оценка максимального влияния процесса образования резонансов на общие характеристики адрон-ядерных взаимодействий. Показано, что один этот эффект не может воспроизвести выход на "плато" средних множественностей $\bar{N}_g(T_0)$ и $\bar{N}_b(T_0)$; качественно другой вид имеет корреляционная кривая $\bar{N}_g(N_S)$.

В следующем параграфе дан качественный анализ следствий эффекта "траления". Показано, что на основе этого эффекта можно понять общие закономерности явлений фрагментации, деления и расщепления ядер. В частности, дано объяснение энергетическому поведению сечений образования фрагментов в адрон-ядерных реакциях, стабилизации формы углового и энергетического распределений фрагментов, энергетической зависимости эмпирических параметров, описывающих выход остаточных ядер в реакциях расщепления.

В рамках каскадной модели с учетом эффекта "траления" в § 3.5 выполнен теоретический анализ экспериментальных данных по делению ядер, бомбардируемых адронами высокой энергии. Деление рассматривается как процесс, конкурирующий с испусканием частиц

на медленной, испарительной стадии взаимодействия. Предложен метод аппроксимации барьеров деления ядер, который в сочетании со статистической теорией дает хорошее описание отношения вероятностей ядерного деления и испускания нейтронов, Γ_f / Γ_n . Собственно процесс деления высоковозбужденных ядер также рассматривается в рамках статистического подхода. Показано, что предложенная модель предсказывает правильное поведение и абсолютные значения для сечений деления ядер, характеристик частиц, сопровождающих деление, и частиц, испущенных в событиях без деления.

В § 3.6 усовершенствованная каскадная модель применяется к исследованию процесса "полного распада" ядер. Выполненный в диссертации анализ как степени согласия теории с опытом, так и характера обнаруженных расхождений показывает, что "полный распад" ядер не требует для своего понимания введения какого-то нового, специального механизма реакции (например, типа ударной волны) или, по крайней мере, рассмотренные характеристики нечувствительны к нему.

В заключительном параграфе этой главы обсуждаются ограничения предложенного варианта каскадной модели, которые приводят к превышению расчетной множественности релятивистских s -частиц над экспериментальными значениями. Это связано с нарушением условия (2) и необходимостью учета внутренней (кварк-партоновой) структуры адрона, что проявляется в существовании зоны формирования адронной фазы. Исследования, выполненные в диссертации, приводят к выводу, что такие эффекты необходимо учитывать при энергиях $T_0 \gtrsim 20$ ГэВ.

В четвертой главе построена модель предравновесного распада ядер. Она используется для описания послекаскадной стадии взаимодействия, которая ранее рассматривалась в рамках испарительной модели. Этого требует интерпретация инклюзивных распределений частиц при $T_0 \approx 100$ МэВ (глава II) и отдельных характеристик низкоэнергетической компоненты при более высоких энергиях (глава III).

В диссертации предложена и развита экситонная модель ядерной реакции, которая рассматривает взаимодействие частицы с ядром как процесс последовательного усложнения состояния ядра за счет остаточных двухчастичных взаимодействий. В основе теории лежит мастер-уравнение для вероятности $P_i(t)$ заселения состояний с различным числом возбужденных частиц-дрок (экситонов).

$$\frac{\partial P_j(t)}{\partial t} = \sum_j' [W(V \rightarrow V') P_j(t) - W(V \leftarrow V') P_j(t)] \quad (4)$$

Учтена возможность эмиссии частиц из ядра на предравновесной стадии. Усредненные матричные элементы для вероятностей переходов $W(V \rightarrow V')$ получены в классическом приближении, а величина $W(V \leftarrow V')$ для испускания частиц оценена на основе статистического рассмотрения. С использованием связи базисного уравнения модели (3) со случайными процессами реализована монте-карловская схема его решения.

Исследована динамика экситонной модели предравновесного распада (§ 4.4), характерной чертой которой является корреляция жесткости энергетического спектра с моментом времени испускания частицы (или со сложностью состояния, из которого испускается частица).

Сравнение с экспериментом, выполненное в § 4.5 при энергиях $T_0 \approx (10-30)$ Мэв, четко указывает на существенный вклад процесса предравновесной эмиссии частиц в "жесткую" часть спектра.

В § 4.6 экситонная модель впервые распространена на фотоядерные реакции. Для этого пришлось ввести ряд общих структурных особенностей, связанных с наличием в ядрах гигантских дипольных резонансов. Учет этого эффекта позволил описать энергетические спектры фотонейтронов.

В § 4.7 на основе развитых моделей внутриядерного каскада и предравновесного распада сформулирована каскадно-экситонная модель ядерных реакций, подразделяющая процесс взаимодействия на три стадии: каскадную, предравновесную и равновесную (т.е. образование компаунд-ядра). Конкретные вычисления, выполненные в рамках этой модели при $T_0 < 100$ Мэв, устраняют расхождения с опытом в инклюзивных распределениях, отмеченные ранее в главе II.

Идея предравновесной эмиссии частиц из возбужденного ядра дает возможность по-новому подойти к анализу экспериментальных данных по ядерному скейлингу. Обнаружено, что параметры структурной функции $E^{d\sigma}/d^3p$ слабо зависят от массового числа A уже в области энергий $T_0 \approx 100$ Мэв (ядерный квазискейлинг). Сопоставление в § 4.7 общих свойств предравновесной компоненты с эмпирическими закономерностями ядерного скейлинга позволяет высказать гипотезу о том, что как квазискейлинг, так и ядерный скейлинг в значительной степени обусловлены процессом предравно-

весной эмиссии частиц. Проанализированы физические следствия этой гипотезы, допускающие экспериментальную проверку.

Методы, развитые выше для адрон-ядерных взаимодействий, могут быть обобщены на случай реакций, инициируемых γ -квантами и легчайшими ядрами. Эта задача решается в пятой главе диссертации.

В § 5.1 построена модель фотоядерных реакций при энергии выше области гигантского дипольного резонанса. Она учитывает процессы поглощения γ -квантов протон-нейтронной парой и фоторождение π -мезонов на отдельных внутриядерных нуклонах, что позволило впервые исследовать неупругие взаимодействия γ -квантов с ядрами вплоть до энергии $\sim 1,5$ Гэв. Показано, что каскадная модель фотоядерных реакций вполне удовлетворительно описывает разнообразные характеристики процесса, включая сечения фотоделения ядер.

Обобщение каскадной модели на случай дейтрон-ядерных столкновений выполнено в § 5.2. Поскольку дейтрон является слабо связанной системой, в первом приближении его взаимодействие с ядром можно представить как суперпозицию внутриядерных каскадов, генерируемых нуклонами дейтрона. Сопоставление теоретических результатов с данными, имеющимися лишь в области сравнительно невысоких энергий, подтверждает основные положения модели. Даны предсказания каскадной модели для взаимодействия дейтронов с ядрами фотоэмиссии до энергии $T_0 = T_d/2 \approx 20$ Гэв/нуклон. Показано, что, как и в адрон-ядерных соударениях (глава III), эффект "траления" приводит к выходу на "плато" зависимости $\bar{N}_d(T_0)$ и $\bar{N}_p(T_0)$. Средние множественности вторичных частиц, инициируемых первичными дейтронами и протонами, не удовлетворяют простым соотношениям типа $\bar{N}_{d+A}(T_d) \approx 2 \bar{N}_{p+A}(T_d/2)$, ожидаемым из наивного представления о независимых каскадах. Опубликованные позднее результаты измерений, выполненных в ЛВЭ ОИЯИ при $T_0 \approx 3,3$ Гэв/нуклон, подтвердили предсказания каскадной модели.

В § 5.3 построена каскадная модель реакций с быстрыми α -частицами. Поскольку здесь упрощающее предположение о независимом взаимодействии нуклонов ядра-снаряда не является столь же очевидным, как для дейтрон-ядерных соударений, процесс исследован также и в другом предельном случае, когда первичная α -частица как целое взаимодействует с нуклоном ядра. Показано, что для обсуждаемых глобальных характеристик обе модели дают очень близкие результаты. Общие тенденции зависимостей $\bar{N}(T_0)$ те же, что

и для реакции $d + A$, но выход на "плато" наступает при меньших значениях T_0 . К моменту разработки модели экспериментальные данные практически отсутствовали. Получение пучков релятивистских α -частиц на синхрофазотроне ОИЯИ открыло возможность проверки предсказаний модели. Результаты опытов с фотоэмульсией при $T_0 \approx 3,3$ Гэв/нуклон оказались в хорошем согласии с теоретическими ожиданиями по разнообразным характеристикам, включая корреляции множественности частиц различного сорта.

В шестой главе диссертации разработанные методы исследования неупругих взаимодействий адронов с ядрами применяются к решению ряда задач, связанных с прохождением частиц высокой энергии через вещество. Основные физические предположения и общая схема расчета взаимодействия частиц с блоками вещества, базирующаяся на монте-карловском решении транспортного уравнения, кратко изложены в § 6.1. В § 6.2 выполнен анализ спектрально-угловых характеристик излучения за слоями защиты различной толщины, что имеет непосредственное отношение к проблеме радиационной защиты ускорителей и космических аппаратов. Приведены два примера космофизических задач. На основе расчета скоростей образования радиоактивных изотопов в железных телах под действием космического излучения восстановлен доатмосферный размер Арус-Ярдмлинского железного метеорита и исследован вопрос о вариации галактического излучения за длительный (порядка миллиарда лет) период времени.

Дана оценка физических параметров электроядерного метода получения интенсивных нейтронных потоков. В этой связи рассчитаны различные величины, характеризующие процесс размножения нейтронов в делящихся средах: число нейтронов, образующихся в блоке на один первичный протон, пространственное и спектрально-угловое распределения частиц, число радиационных захватов, число делений и т.п. Показано, что замена первичного протонного пучка на дейтронный приводит к заметному увеличению выхода нейтронов; наиболее перспективной представляется область энергий $T_0 \approx 0,6 + I$ Гэв.

В Заключении кратко перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

В Приложении изложен метод статистического моделирования

взаимодействия быстрых адронов с внутриядерными нуклонами и продемонстрирована точность восстановления характеристик πN - и NN - взаимодействий.

Литература

Результаты диссертации опубликованы в работах:

- I. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., Атомиздат, 1976.
2. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P2-4065, Дубна, 1974.
3. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Acta Phys. Polonica, 1969, 36, p. 415.
4. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. Acta Phys. Polonica, 1969, 36, p. 887.
5. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. Acta Phys. Polonica, 1969, 36, p. 457.
6. Барашенков В.С., Гудима К.К., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P2-5118, Дубна, 1970.
7. Барашенков В.С., Ильинов А.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P2-5507, Дубна, 1970.
8. Барашенков В.С., Ильинов А.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P2-5549, Дубна, 1970.
9. Barashenkov V.S., Gudima K.K., Eliseev S.M., Ilijnov A.S., Toneev V.D. Proc. of the 11-th Intern. Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969, p. 285.
10. Barashenkov V.S., Ilijnov A.S., Toneev V.D. JINR, E2-5282, Dubna, 1970.
11. Barashenkov V.S., Gudima K.K., Eliseev S.M., Ilijnov A.S., Toneev V.D. Proc. of the Third Intern. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, N-Y. 1969, Plenum Press, 1970, p. 382.
12. Barashenkov V.S., Ilijnov A.S., Sobolevsky N.M., Toneev V.D. Intern. JINR-CERN School on High Energy Physics, JINR, E2-5813, Dubna, 1971, p. 71.
13. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. IV Международная конференция по физике высоких энергий и структуре ядра, Дубна, 1972. ОИЯИ -DI-6349, Дубна, с. 153.

14. Барашенков В.С., Ильинов А.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. УФН, 1973, 109, с.91.
15. Barashenkov V.S., Bertini H.W., Chen H., Harp G.D., Miller J.M., Friedlander G., Ilijnov A.S., Toneev V.D. Nucl. Phys., 1972, A187, p. 531.
16. Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D., JINR, E2-11307, Dubna, 1978.
17. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1969, 10, с. 755.
18. Барашенков В.С., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1971, 13, с. 743.
19. Barashenkov V.S., Gudima K.K., Gereghi F.G., Ilijnov A.S., Toneev V.D. JINR, E2-6706, Dubna, 1972.
20. Barashenkov V.S., Gereghi F.G., Ilijnov A.S., Toneev V.D. Nucl. Phys. 1973, A206, p. 131.
21. Barashenkov V.S., Gereghi F.G., Ilijnov A.S., Toneev V.D. Nucl. Phys. 1974, A222, p. 204.
22. Барашенков В.С., Гудима К.К., Жереги Ф.Г., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Вопросы атомной науки и техники. Серия физика высоких энергий, вып. 1(3), Харьков, 1973, с. 89.
23. Барашенков В.С., Жереги Ф.Г., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P7-6798, Дубна, 1972.
24. Барашенков В.С., Жереги Ф.Г., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1973, 18, с. 37.
25. Тонеев В.Д., Чигринов С.Е. ОИЯИ, P2-7479, Дубна, 1973.
26. Зайдель К., Зелигер Д., Райф Р., Тонеев В.Д. ЭЧАЯ, 1976, 7, с. 499.
27. Гудима К.К., Ососков Г.А., Тонеев В.Д. Яд. физ. 1975, 21, с. 260.
28. Зелигер Д., Зайдель К., Хермспорф Д., Сассонов С., Тонеев В.Д. Нейтронная физика (Материалы 2-ой Всесоюзной конф. по нейтронной физике, Киев), т. I. Обнинск, 1974, с. 269.
29. Seeliger D., Seidel K., Toneev V.D. Interactions of Fast Neutrons with Nuclei, Gaussig, Zfk-271, 1974, p. 63.
30. Гудима К.К., Машник С.Г., Тонеев В.Д. Расчеты структуры ядра и ядерных реакций. Изд-во Штиинца, Кишинев, 1977, с. 12.
31. Лукьянов В.К., Селиверстов В.А., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1975, 21, с. 992.

32. Лукьянов В.К., Селиверстов В.А., Тонеев В.Д. Interactions of Fast Neutrons with Nuclei, Gaussig, Zfk-271, 1974, p. 69.
33. Gudima K.K., Toneev V.D. JINR, E4-9489, Dubna, 1976.
34. Гудима К.К., Тонеев В.Д. Расчеты структуры ядра и ядерных реакций. Изд-во Штиинца, Кишинев, 1977, с. 3.
35. Гудима К.К., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P2-4661, Дубна, 1969.
36. Гудима К.К., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. ОИЯИ, P4-4808, Дубна, 1969.
37. Barashenkov V.S., Gereghi F.G., Ilijnov A.S., Jonsson G.G., Toneev V.D. Nucl. Phys. 1974, A231, p. 462.
38. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1969, 9, с. 528.
39. Барашенков В.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1969, 10, с. 760.
40. Гудима К.К., Кириллов А.Д., Тонеев В.Д., Яковлев Ю.П. ОИЯИ, P2-5261, Дубна, 1970.
41. Барашенков В.С., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Acta Phys. Polonica, 1973, B4, p. 219.
42. Барашенков В.С., Гудима К.К., Жереги Ф.Г., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Яд. физ., 1973, 17, с. 434.
43. Барашенков В.С., Гудима К.К., Жереги Ф.Г., Ильинов А.С., Тонеев В.Д. Квантовая теория систем многих частиц. Изд-во Штиинца, Кишинев, 1973, с. III.
44. Barashenkov V.S., Gudima K.K., Gereghi F.G., Ilijnov A.S., Toneev V.D. 5-th Summer School on Nuclear Physics (Rudziska, 1972), Poland, 1973, v. 3, p. 1.
45. Дудкин В.Е., Митрикас В.Г., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д., Шелтий В.И. Дозиметрия излучений и физика защиты ускорителей заряженных частиц. ОИЯИ, I6-4888, Дубна, 1970, с. 72.
46. Барашенков В.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. Ат. эн., 1972, 32, с. 123.
47. Барашенков В.С., Тонеев В.Д., Чигринов С.Е. Сопровождение по программированию и матем. методам решения физических задач (Дубна, 1973). ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974.
48. Тонеев В.Д., Чигринов С.Е. ОИЯИ, Б1-16-9304, Дубна, 1975.

49. Барашенков В.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. Ат.эн., 1972, 32, с.217.
50. Барашенков В.С., Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. Геохимия, 1972, II, с.1325.
51. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Ат.эн., 1973, 35, с.163.
52. Барашенков В.С., Тонеев В.Д., Чигринов С.Е. ОИЯИ Р2-7694, Дубна, 1974.
53. Барашенков В.С., Тонеев В.Д., Чигринов С.Е. Ат.эн. 1974, 37, с.480.
54. Соболевский Н.М., Тонеев В.Д. Acta Phys.Polonica, 1969,35, p. 367.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1979 года.