

Б-383

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.12.01

2-85-223

БЕДНЯКОВ

Вадим Александрович

**РАЗВИТИЕ ПАРТОННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
О СТРУКТУРЕ АДРОНОВ
И ГЛУБОКОНЕУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

П.С.Исаев

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор

Р.Н.Фаустов

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

А.В.Радзихин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, Протвино.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1985 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1985 г.
на заседании Специализированного совета КО.47.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И.Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время квантовая хромодинамика (КХД) считается основным претендентом на роль правильной теории сильных взаимодействий элементарных частиц.

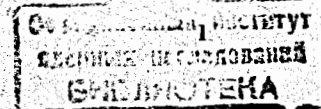
Присущее КХД свойство асимптотической свободы позволяет применять методы теории возмущений для исследования процессов глубоконеупругого рассеяния. Инклюзивные характеристики этих процессов служат источником важной информации о структуре и свойствах адронной материи в малых пространственно-временных интервалах.

В основе современного понимания динамики глубоконеупругого взаимодействия лежат представления о партонной структуре адронов. В рамках партонной модели, получившей надежное обоснование в КХД, сечения и структурные функции глубоконеупругого рассеяния связаны с одночастичными функциями распределения кварков и глюонов $-f_i(x, Q^2)$.

Помимо процессов глубоконеупругого рассеяния ценным источником информации о структуре адронов и механизме их формирования из кварков являются инклюзивные реакции, в конечных состояниях которых регистрируются один или несколько рожденных адронов. В рамках партонных представлений анализ импульсных спектров таких адронов основан на применении мультипартонных функций распределения, которые представляют собой прямое и естественное обобщение одночастичных функций распределения. Использование мультипартонных функций распределения, по существу, означает расширение области применения партонных представлений о структуре адронов.

Несмотря на широкое распространение, которое получили мультипартонные распределения - с их помощью удалось описать значительное количество экспериментальных данных и сделать ряд успешных предсказаний - до сих пор отсутствуют корректные феноменологические схемы их расчета. Эта задача встречается с определенными трудностями, одна из которых - инфракрасные расходимости, обусловленные "мягкими" партонами.

Для процессов глубоконеупругого рассеяния в рамках теории возмущений КХД получены эволюционные уравнения, задающие логарифмическую



Q^2 -зависимость одночастичных функций распределения $f_i(x, Q^2)$. Эти предсказания содержат пока значительный функциональный произвол, связанный с теоретической неопределенностью в КХД начальных условий эволюционных уравнений $-f_i(x, Q_0^2)$. Для их задания требуется привлечение дополнительной информации, например, в виде физически содержательных моделей; построенных в согласии с основными положениями КХД. Выбор определенных начальных условий приводит к некоторой конкретной реализации КХД-партонной модели, на основе которой предсказания КХД сравниваются с экспериментальными данными.

В практических приложениях удобнее располагать заданными в явной аналитической форме приближенными решениями эволюционных уравнений, а не точными их решениями, полученными численно. Для нуклонов такие решения были найдены, различные их варианты широко представлены в литературе, при этом в качестве начальных условий использовались предсказания феноменологических моделей.

Совершенно отсутствуют решения эволюционных уравнений для функций распределения партонов в \mathcal{N} -мезоне, интерес к которым возрос в связи с КХД-анализом глубокоэластичных процессов с участием \mathcal{N} -мезонов.

При умеренных значениях переданного импульса Q^2 ($1 \leq Q^2 \leq 15 \text{ ГэВ}^2$) в глубокоэластичных процессах существенную роль приобретают не поддающиеся учету в рамках теории возмущений поправки к результатам КХД-партонной модели. Наиболее известны из них твистовые $1/Q^2$ -поправки. Их учет особенно актуален при экспериментальном определении КХД параметра Λ и фундаментального параметра электрослабой теории $\sin^2 \theta_W$ в области относительно малых энергий ($E \approx 70 \text{ ГэВ}$).

Невозмущенческий характер имеют поправки, обусловленные существованием в нуклоне крупномасштабных объектов - составляющих кварков и кластеров, обладающих внутренней кварк-глюонной структурой. Проявление такого (двухуровневого) строения нуклона в глубокоэластичных процессах связано с действием сил конфайнмента, и в настоящее время может быть исследовано лишь на основе феноменологических моделей, явно учитывающих невыветание кварков и согласующихся с КХД. Построение такого сорта моделей, по существу, означает развитие партонных представлений о структуре адронов, расширение области применения КХД-партонной модели в сторону средних энергий и умеренных передач. Интерес к изучению этой области определяется возможностью экспериментального разделения в ней логарифмической и степенной Q^2 -зависимостей структурных функций глубокоэластичного рассеяния. Последнее позволяет надеяться на более правильное определение КХД параметра Λ .

Цель работы

- Построение в рамках статистической партонной модели корректной феноменологической схемы вычисления произвольных мультипартонных функций распределения.
- Нахождение решений эволюционных уравнений КХД для функций распределения кварков и глюонов в пионе.
- Оценка влияния твистовых поправок на значение $\sin^2 \theta_W$.
- Развитие новой двухуровневой КХД-модели нуклона для описания данных по глубокоэластичному рассеянию в области умеренных передач.
- Изучение механизма нарушения изотопической симметрии кварковых функций распределения.
- Апробация мультипартонных функций распределения и вычисление на их основе импульсных спектров образования очарованных частиц в протон-протонных и нейтрино-протонных столкновениях.

Научная новизна и практическая ценность

В рамках статистической партонной модели с реджевской асимптотикой развит подход к вычислению мультипартонных функций распределения в адронах. Эти функции дают основу феноменологическому описанию дальнедействующих корреляций между партонами. Они могут быть использованы, например, для расчета инклюзивных спектров рождения частиц в адрон-адронных взаимодействиях, а также для задания начальных условий эволюционных уравнений КХД.

На основе статистических партонных представлений рассмотрены некоторые допускающие экспериментальную проверку следствия гипотезы о существовании в нуклоне сингулярной компоненты глюонной функции распределения.

Впервые в явной аналитической форме найдены обладающие высокой точностью приближенные решения эволюционных уравнений КХД для \mathcal{N} -мезона. Они дают основу квантовохромодинамическому анализу глубокоэластичных процессов с участием \mathcal{N} -мезонов.

Рассмотрено влияние твистовых поправок на извлекаемое из глубокоэластичного рассеяния значение $\sin^2 \theta_W$. Показано, что учет поправок имеет особенно важное значение в области относительно малых значений энергии нейтрино. Этот результат приобретает актуальность в связи с проектами прецизионного измерения $\sin^2 \theta_W$ на нейтринном пучке ИФВЭ.

В простой модели нуклона - три кварка в релятивистском осцилляторном потенциале - вычислены структурные функции $F_1(x, Q^2)$, $F_2(x, Q^2)$ и величина $R(x, Q^2) = \sigma_2/\sigma_1$, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Развита новая квантовохромодинамическая версия двухуровневой

модели нуклона. Ее отличительные особенности состоят в том, что, во-первых, функции распределения крупномасштабных объектов рассчитываются на основе волновой функции релятивистского осцилляторного потенциала путем выполнения явного предельного перехода в систему бесконечного импульса. Во-вторых, функции распределения партонных объектов являются решениями эволюционных уравнений КХД. Эти решения найдены в явном аналитическом виде, определяемом статистической партонной моделью.

КХД-двухуровневая модель используется для описания глубоконеупругого рассеяния в области умеренных Q^2 и анализа возможных механизмов нарушения изотопической (ароматической) симметрии кварковых распределений ($f_u \neq 2f_d$).

На примере вычисления инклюзивных импульсных спектров образования очарованных частиц в νp - и pp -столкновениях проведена апробация мультипартонных распределений. Из сравнения с экспериментальными данными по образованию D -мезонов и Λ_c^+ -барионов в pp -столкновениях полностью определены двух- и трехчастичные функции распределения в протоне. С помощью этих функций проведены расчеты спектров рождения очарованных частиц в νp -столкновениях. Результаты этих расчетов используются для моделирования процессов рождения и распада очарованных частиц на нейтринном пучке ИФВЭ.

Таким образом, в диссертации на основе единой феноменологической схемы предпринята попытка развития партонных представлений о глубоконеупругой структуре адронов как в количественном аспекте - рассмотрение, расчет и использование мультипартонных функций распределения, так и в качественном - учет существования в нуклонах крупномасштабных объектов.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты

1. На основе статистических партонных представлений построена корректная феноменологическая схема вычисления произвольных мультипартонных функций распределения в любых адронах (составляющих кварках, кластерах, адронных мешках и т.д.).

На примере одночастичных функций распределения рассмотрены следствия гипотезы о существовании в нуклоне сингулярной компоненты глюонной функции распределения.

2. В явном аналитическом виде найдены функции распределения кварков и глюонов в π -мезоне, с высокой точностью удовлетворяющие эволюционным уравнениям КХД.

3. Получена оценка погрешности извлекаемого из глубоконеупругого рассеяния значения $\sin^2 \theta_W$, обусловленная пренебрежением вкладами

твистовых $1/Q^2$ -поправок. Рассчитана зависимость этой погрешности от энергии нейтрино.

4. Предложена и развита новая КХД версия двухуровневой модели нуклона, в которой невылетание кварков обеспечивается релятивистским осцилляторным потенциалом, а кварк-глюонная структура определяется в КХД на основе статистической партонной модели.

5. Путем осуществления явного предельного перехода в систему бесконечного импульса мишени найдены гладкие и ограниченные выражения для функций распределения крупномасштабных объектов внутри нуклона.

6. На основе КХД-двухуровневой модели получены предсказания для структурных функций в области умеренных значений Q^2 и исследованы возможные механизмы нарушения изотопической (ароматической) симметрии кварковых распределений. Предсказания находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

7. В простой трехкварковой модели нуклона, явно учитывающей невылетание кварков, рассчитаны X - и Q^2 -зависимости структурных функций $F_1(x, Q^2)$, $F_2(x, Q^2)$ и величины $R(x, Q^2) = \sigma_L/\sigma_T$. Расчет проведен в системе покоя мишени с использованием волновой функции релятивистского осцилляторного потенциала.

8. Вычислены импульсные спектры и сечения инклюзивного образования адронов с открытым очарованием в νp - и pp -столкновениях. Найдены явные выражения для всех возможных двух- и трехчастичных функций распределения партонных в протоне.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики, Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, на сессиях ОИФ АН СССР, на рабочих совещаниях по программе физических исследований на установке "Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ", на всесоюзных конференциях и совещаниях, представлялись на международные конференции.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 статей.

Объем работ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 123 страницы машинописного текста, 29 рисунков, 7 таблиц и библиографический список литературы из 160 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор КХД теории глубокоэластичных процессов. Обсуждается актуальность развития партонных представлений о структуре адронов. Кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена статистической партонной модели с реджевской асимптотикой и вычислению в ее рамках мультипартонных функций распределения.

В § 1 кратко изложены цель и содержание главы.

В § 2 приведены основные положения статистической партонной модели с реджевской асимптотикой и получены в общем виде выражения для искомым мультипартонных функций распределения.

Модель опирается на знание одночастичных функций распределения в области малых значений импульсной переменной X . Далее они называются затравочными функциями. Реджевский анализ амплитуды виртуального комптон-эффекта позволяет фиксировать поведение затравочных функций в окрестности точки $X=0$. С помощью этих функций построен производящий функционал, учитывающий кинематические корреляции между партонами и некоторые специфические свойства адронов. В производящем функционале проведена регуляризация, гарантирующая отсутствие инфракрасных расходимостей в мультипартонных распределениях. В общем виде установлена связь конечных и нормированных мультипартонных функций распределения с регуляризованным производящим функционалом.

В § 3 на основе конкретного вида затравочных функций получены формулы, позволяющие находить явные выражения для мультипартонных функций распределения в любых адронах.

В § 4 проанализированы следствия гипотезы о существовании в нуклоне сингулярной компоненты функции распределения глюонов. Анализ проведен в рамках статистической партонной модели. При этом формализм производящего функционала обобщен на случай сингулярных затравочных функций.

Вторая глава посвящена решению эволюционных уравнений КХД и оценке роли твистовых $1/Q^2$ -поправок.

В § 1 кратко изложено содержание главы, дано определение структурных функций глубокоэластичного лептон-нуклонного рассеяния, указана связь этих функций с предсказаниями КХД.

В § 2 приведены эволюционные уравнения КХД, определяющие Q^2 -зависимости одночастичных функций распределения. Показана целесообразность поиска приближенных решений этих уравнений в явном аналитическом виде. Обсуждена проблема задания начальных условий эволюционных уравнений, т.е. вида X -зависимости функций распределения при фиксированном Q^2 .

В § 3 получены приближенные решения эволюционных уравнений для функций распределения кварков и глюонов в \mathcal{N} -мезоне. Начальные условия заданы на основе результатов статистической партонной модели главы I. Решения найдены в явном аналитическом виде методом пробных функций.

В § 4 обоснована необходимость учета твистовых поправок при сравнении предсказаний КХД с имеющимися в настоящее время экспериментальными данными. Обсуждается вопрос о партоноподобной интерпретации твистовых вкладов в структурные функции и о возможности экспериментального определения величины этих вкладов.

В § 5 получена оценка погрешности в извлекаемом из глубокоэластичного рассеяния значении $\sin^2 \theta_W$, обусловленная пренебрежением твистовыми поправками. Показано, что погрешность незначительна при больших энергиях нейтринного пучка и достаточно велика при малых.

Масштаб твистовых поправок определен из КХД-анализа данных.

Третья глава посвящена развитию новой КХД версии двухуровневой модели нуклона, описанию в ее рамках глубокоэластичного рассеяния в области умеренных передач и исследованию механизмов нарушения изотопической симметрии кварковых распределений.

В § 1 кратко изложено содержание главы.

В § 2 приведена ковариантная и ограниченная волновая функция основного состояния системы из трех частиц, взаимодействующих друг с другом релятивистски осцилляторным образом. Определены структурные функции $F_1(x, Q^2)$ и $F_2(x, Q^2)$, получены предсказания для величины $R(x, Q^2) = \sigma_L/\sigma_T$, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными при $X \approx 0,2$. Расчет проведен в системе покоя мисени в рамках простой трехкварковой модели нуклона, в которой запирающее кварки взаимодействие описывается релятивистским осцилляторным потенциалом.

В § 3 предложена и разработана новая двухуровневая КХД партонная модель, в которой предполагается наличие в нуклоне двух структурных уровней с существенно различными свойствами. Первый уровень — три крупномасштабных объекта (составляющих кварка), релятивистское осцилляторное взаимодействие между которыми обеспечивает конфайнмент. Вторым уровнем составляет универсальная КХД кварк-глюонная структура крупномасштабных объектов. В двухуровневой модели удается объединить спектроскопические и партонные представления о структуре адронов.

Ограниченные и гладкие выражения для функций распределения крупномасштабных объектов в нуклоне $\psi_p(y)$ найдены прямым предельным переходом в систему бесконечного импульса нуклона ($P \rightarrow \infty$).

Функции распределения партонов внутри крупномасштабных объектов $f_{i/p}(x)$ рассматриваются как решения эволюционных уравнений КХД, полу-

ченных в главном логарифмическом и следующем за ним приближениях теории возмущений.

С помощью модели удалось описать данные по глубоконеупругому рассеянию в области умеренных значений Q^2 .

В § 4 на основе двухуровневой модели исследованы два возможных механизма нарушения изотопической симметрии кварковых распределений. В варианте А нарушение осуществляется на первом уровне — функции распределения составляющих кварков зависят от аромата этих кварков, т.е. $\varphi_u(y) \neq \varphi_d(y)$. В варианте Б нарушение осуществляется на втором уровне — функции распределения кварков внутри крупномасштабных объектов зависят от аромата, т.е. $f_{u/d}(x) \neq f_{d/u}(x)$. Предсказания варианта А отличаются от предсказаний варианта Б только в области весьма близкой к точке $X=1$, в которой нет пока экспериментальных данных. Вне этой области оба варианта находятся в хорошем согласии с экспериментом.

В § 5 на основе предположения об образовании в нуклоне при $X \rightarrow 1$ кластера их u - и d - составляющих кварков естественным образом в рамках статистической партонной модели главы I удалось объяснить нарушение изотопической симметрии кварковых распределений.

Четвертая глава посвящена апробации мультипартонных функций распределения и вычислению импульсных спектров образования очарованных адронов в νp - и pp -столкновениях.

В § 1 обсуждается механизм образования очарованных адронов путем рекомбинации очарованного кварка с кварками из начальных протонов. Изложены основные предположения этого подхода.

В § 2 рассмотрено инклюзивное рождение очарованных D -мезонов и Λ_c^+ -барионов в pp -столкновениях. Из анализа экспериментальных данных определены конкретные выражения для двух- и трехчастичных функций распределения кварков и глюонов в протоне.

В § 3 на их основе рассчитаны импульсные спектры инклюзивного рождения F и D -мезонов, Σ_c^{++} и Λ_c^+ -барионов в νp -столкновениях.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении приведены параметры эволюционных уравнений КХД.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. Бедняков В.А., Исаев П.С., Коваленко С.Г. Мультипартонные распределения в адронах. ЯФ, 1984, т.40, с.1312.
2. Бедняков В.А., Коваленко С.Г. Глубоконеупругая структура нуклона и глюонный конденсат. Препринт ОИЯИ, P2-84-143, Дубна, 1984.

3. Бедняков В.А., Коваленко С.Г. Пионные распределения кварков и глюонов в КХД. ЯФ, 1983, т.37, с.400.
4. Бедняков В.А., Иванов Ю.П., Исаев П.С. О влиянии гвистовых поправок на $\Sigma \ln^2 Q_W$. Препринт ОИЯИ, P2-84-816, Дубна, 1984.
5. Бедняков В.А., Иванов Ю.П. Лептон-нуклонное рассеяние в модели релятивистского осциллятора. ЯФ, 1985, т.41, с.400.
6. Бедняков В.А., Иванов Ю.П., Исаев П.С., Коваленко С.Г. Квантовохромодинамическая модель нуклона с релятивистским осцилляторным взаимодействием между составляющими кварками. ЯФ, 1983, т.37, с.1524.
7. Бедняков В.А. Нарушение ароматической симметрии кварковых распределений в двухуровневой КХД модели. ЯФ, 1983, т.38, с.1295.
8. Бедняков В.А. Крупномасштабная структура протона и кварковые распределения. ЯФ, 1984, т.40, с.221.
9. Бедняков В.А., Исаев П.С., Коваленко С.Г. Спектры очарованных адронов в протон-протонных столкновениях. В кн: "Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ", Д1, 2, 13-84-332, с.185, Дубна, 1984.
10. Бедняков В.А., Бунятов С.А., Исаев П.С. Спектры очарованных частиц, рожденных в νp -взаимодействиях. Сообщение ОИЯИ, P2-84-820, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 марта 1985 года