



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д 795

УДК 539.126.1

2-89-422

ДУБНИЧКА Станислав

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ
И АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ИХ ФОРМФАКТОРОВ**

**Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика**

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

Дубна 1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор	С.М. БИЛЕНЬКИЙ
доктор физико-математических наук	А.И. ЛЕБЕДЕВ
доктор физико-математических наук	Э.А. КУРАЕВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
ядерных исследований АН СССР, Москва.

Автореферат разослан " _____ " 1989 г.

Защита диссертации состоится " _____ " 1989 г.
на заседании специализированного совета Д047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного
института ядерных исследований.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат физико-математических наук

В.И. КУРАВЛЕВ

Актуальность темы

Динамическое описание электромагнитной (ЭМ) структуры сильно-
взаимодействующих частиц, экспериментально открытой еще в середине
пятидесятых годов в опытах Хофштадтера по упругому рассеянию
электронов на разных мишенях, остается одной из важных нерешенных
проблем физики элементарных частиц. Феноменологически эта структу-
ра учитывается путем введения скалярных функций квадрата переданно-
го фотоном четырехмерного импульса $t = -Q^2$, так называемых ЭМ
формфакторов (ФФ) $F_k(t)$. Они появляются в виде коэффициентов в
разложении матричного элемента ЭМ тока рассматриваемой сильно-
действующей частицы по максимальному числу линейно-независимых
ковариантов, конструируемых из спиновых параметров и соответствую-
щих четырехмерных импульсов.

Функциональная зависимость ЭМ ФФ является предметом вычисле-
ний будущей теории сильных взаимодействий. Как известно, на роль
такой теории сегодня претендует квантовая хромодинамика (КХД) -
калибровочно-инвариантная локальная квантовая теория поля взаимо-
действий цветных кварков и глюонов. Однако она в результате своей
асимптотической свободы в рамках теории возмущений, грубо говоря,
только воспроизводит асимптотическое поведение формфакторных функ-
ций, предсказываемое раньше правилами кваркового счета с точностью
до логарифмической поправки. С помощью методов правил сумм (по су-
ществу своему непертурбативных) КХД предсказывает поведение ЭМ ФФ
в ограниченном интервале t в пространственноподобной области.
Но во времениподобной области, где ФФ являются комплексными функ-
циями своего аргумента и эксперименты по электрон-позитронной ан-
нигиляции в адрон-антиадрон выявляют их нетривиальное поведение,
вызванное рождением состояний разнообразных нестабильных векторных
мезонов, КХД пока предсказаний не дает. Это все свидетельствует о
том, что пока еще отсутствует единая динамическая картина описания
ЭМ структуры сильно-взаимодействующих частиц. В такой ситуации важ-
ную роль играют различные полупеноменологические подходы и модели,
одному из которых и посвящена предлагаемая диссертация. Он основан
на строгих аналитических свойствах ЭМ ФФ и стимулом для его развития
послужило накопление большого объема экспериментальной информации

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

об ЭЛМ $\Phi\Phi$ адронов и атомных ядер, требующей систематизации и физической интерпретации. Такая ситуация с экспериментальными данными возникла вследствие бурного развития новой экспериментальной техники, позволяющей все время повышать энергии ускоряемых частиц и измерять характеристики различных процессов с более высокой точностью. Однако не менее важным стимулом для измерения этих новых данных о ЭЛМ $\Phi\Phi$ в более широкой области квадрата переданного импульса явились и новые предсказания теоретических моделей, которые требуют экспериментальной проверки. Имеется в виду, главным образом, предсказание кварковой модели асимптотического поведения ЭЛМ $\Phi\Phi$ адронов и атомных ядер в пространственноподобной области, а также вычисленные в рамках различных квантово-полевых подходов значения эффективных радиусов адронов и параметров предсказываемого спектра возможных резонансных состояний векторных мезонов, проявляющихся во времениподобной области $\Phi\Phi$, которые в настоящее время интерпретируются как связанные состояния кварка и антикварка.

Хотя все эти вышеупомянутые свойства ЭЛМ $\Phi\Phi$ адронов кажутся независимыми, в сущности они очень тесно связаны. Небольшое изменение значения ЭЛМ радиуса адрона приводит к наблюдаемому изменению поведения $\Phi\Phi$, или небольшое изменение параметров резонансов может привести к существенному изменению среднеквадратичного радиуса рассматриваемого адрона. Это значит, что проверке одного свойства $\Phi\Phi$ можно доверять только при учете других его свойств, и этого можно добиться только в рамках глобальной модели, учитывающей все известные свойства и одновременно описывающей все существующие данные.

Построение глобального подхода для описания ЭЛМ $\Phi\Phi$ инициировано и рядом других, пока ни теоретически, ни экспериментально не решенных проблем. Такой является, например, времениподобное поведение ядерных ЭЛМ $\Phi\Phi$ и предсказание на его основе поведения сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции в ядро-антиядро.

Важным кажется и получение оценки надежных значений констант вакуумных конденсатов при помощи правил сумм КХД, а также точная оценка адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона и другие проблемы, которые непосредственно связаны с поведением ЭЛМ $\Phi\Phi$.

Это все указывает на то, что построение глобальной и достоверной модели ЭЛМ структуры сильновзаимодействующих частиц является весьма актуальным и важным как с точки зрения общей теории сильных взаимодействий, так и для практических целей интерпретации существующих экспериментальных данных.

Цель работы

Целью диссертации является развитие единого глобального подхода при построении реалистических моделей ЭЛМ структуры адронов, отражающих известный экспериментальный факт образования резонансных состояний векторных мезонов в процессах электрон-позитронной аннигиляции в адрон-антиадронную пару и одновременно обладающих асимптотическим поведением, предсказываемым кварковой моделью.

Выполнено также последовательное обобщение этого подхода на случай атомных ядер с целью восстановления существующих данных в пространственноподобной области и предсказания поведения соответствующих ЭЛМ $\Phi\Phi$ во времениподобной области, которое, в принципе, предоставляет возможность оценки сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции в ядро-антиядро.

Научная новизна и практическая ценность

Новым достижением является создание единого подхода к глобальному описанию ЭЛМ структуры сильновзаимодействующих частиц, который основан на учете правильных аналитических свойств ЭЛМ $\Phi\Phi$ в рамках модели доминантности векторных мезонов (ВМД) и обобщении асимптотического поведения в согласии с предсказанием кварковой модели адронов. Предложенная модифицированная ВМД модель удобна, кроме других преимуществ, для изучения спектра векторных мезонов и определения отношения констант связей векторных мезонов с фотоном и адронами из данных по соответствующим ЭЛМ $\Phi\Phi$. Практически она была применена к описанию ЭЛМ структуры пиона, каонов, нуклонов и атомных ядер He^4 , He^3 , H^3 .

Полученные теоретические результаты существенно расширили представление об ЭЛМ структуре адронов и легких атомных ядер. Теоретические схемы, предложенные в диссертации, используются другими авторами в расчетах и при анализе экспериментальных данных. Результаты некоторых предсказаний и расчетов используются экспериментальными группами при планировании и подготовке экспериментов.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

I. Предложен метод выделения экспериментальных данных по мнимой части пионного $\Phi\Phi$ в упругой области из данных по сечению электрон-позитронной аннигиляции на два пиона. Далее они использованы при проверке надежности данных по пионному $\Phi\Phi$ в пространственноподобной области, которые получены модельно-зависимым способом из процесса электророжения пионов на нуклонах.

2. В подходе к описанию ЭЛМ структуры пиона, основанном на аналитических свойствах, была обнаружена важность вклада от левого разреза на втором листе римановой поверхности, который появляется как следствие присутствия амплитуды пион-пионного рассеяния в упругом условии унитарности $\Phi\Phi$ пиона.

3. Разработана простая аналитическая модель пионного $\Phi\Phi$, действующая в упругой области, при помощи которой показано, что из трех независимых наборов данных по пионному $\Phi\Phi$, полученных в рамках совместных советско-американских экспериментов по рассеянию пионов на атомных электронах водородной мишени, данные из последнего эксперимента являются самыми надежными. Такое заключение анализа независимо подтверждается и результатами нового NA7 эксперимента в ЦЕРНе.

4. Определен интервал согласия с экспериментальными данными поведения пионного $\Phi\Phi$, предсказанного моделью конституентных кварков в окрестности точки $t = 0$; при этом волновая функция пиона в вершине пион-кварк-антикварк выбирается в виде бозонного пропагатора с одним свободным параметром размерности массы.

5. Разработана унитаризованная аналитическая модель доминантности векторных мезонов для ЭЛМ $\Phi\Phi$ пиона, учитывая эффективным способом вклады неупругих каналов, при помощи которой подтверждается наличие в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ обсуждаемого сейчас $\rho^0(1450)$ -резонанса. Построен усовершенствованный вариант модели, учитывающий пороговые условия, в рамках которого на основе глобального анализа всех существующих данных определены самым надежным способом параметры всех учитываемых резонансов.

6. На основе развитой модели пионного $\Phi\Phi$ предложен метод вычисления фазы и неупругости парциальной амплитуды пион-пионного рассеяния во всей экспериментально измеримой области.

7. В рамках унитаризованной аналитической модели доминантности векторных мезонов выполнен глобальный анализ всех существующих данных по каонным ЭЛМ $\Phi\Phi$ и определены параметры учитываемых в модели резонансов. В результате подтверждается наличие $\rho^0(1450)$ в процессе $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$. Кроме того, оказывается, что $\rho^0(1700)$ дает незначительный вклад в $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ и вместо него очень четко проявляется вклад $\rho^0(2150)$ -резонанса, правда, с массой немного ниже значения, полученного из других процессов.

8. Построена унитаризованная аналитическая ВМД модель электрических и магнитных нуклонных $\Phi\Phi$ с асимптотическим поведением, согласующимся с предсказанием кварковой модели для барионов. Определяя свободные физические параметры модели из наилучшего воспроизведе-

дения существующих данных по протонным $\Phi\Phi$ и данных по нейтронным $\Phi\Phi$ в пространственноподобной области, модель предсказывает поведение сечений $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, которое в окрестности нуклон-антинуклонного порога существенно превосходит сечение процесса $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$.

9. Подход, основанный на унитаризованной аналитической модели доминантности векторных мезонов, распространен также на случай описания ЭЛМ структуры атомных ядер. Применение этой модели к ядрам He^4 , He^3 и H^3 привело не только к воспроизведению существующих данных по соответствующим ЭЛМ $\Phi\Phi$ в пространственноподобной области, для которых характерны типичные дифракционные минимумы, но также позволило предсказать поведение $\Phi\Phi$ во времениподобной области и, как следствие, оценить значения полных сечений процессов $e^+e^- \rightarrow He^4\bar{He}^4$, $e^+e^- \rightarrow He^3\bar{He}^3$ и $e^+e^- \rightarrow H^3\bar{H}^3$.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ в Дубне, Физического института САН в Братиславе, Международного центра теоретической физики в Триесте, Института теоретической физики в Киеве, Фотомезонной лаборатории ФИАН СССР им. П.Н. Лебедева в Москве, ИЯФ и МИ СО АН СССР в Новосибирске, Института теоретической физики Университета в Вене, Научно-исследовательского института теоретической физики в Хельсинки, Научного центра Франции в Орсе, Лаборатории физики элементарных частиц в Анси (Франция), Национального института ядерной физики во Фраскати и на заседании Ученого совета по теоретической физике в Дубне. Кроме того, они докладывались на многочисленных международных конференциях и симпозиумах, в том числе: на семинарах по проблемам физики высоких энергий и квантовой теории поля (Протвино, 1979, 1987), на Варшавских симпозиумах по физике элементарных частиц (Казимierz, 1979, 1983, 1984, 1986), на конференциях чехословацких физиков (Кошице, 1977; Братислава, 1985), на международной зимней школе по сильным взаимодействиям (Шладминг, 1985), на международных симпозиумах "Структура адронов" (Штрабске Плесо, 1977; Смоленице, 1983), на III Адриатической встрече по физике частиц (Дубровник, 1980), на Симпозиуме по актуальным проблемам физики элементарных частиц (Мариллева, 1978), на Семинаре по новейшим достижениям физики элементарных частиц (Будапешт, 1984), на Ренконтр де Морион (Лес Аркс, 1986) и на "Кварках-88" (Тбилиси, 1988), на XX и XXII международных конференциях по физике высоких энергий (Мадисон, 1980 и Лейпциг, 1984).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 29 работ.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, восьми глав основного содержания и заключения, она содержит 229 страниц машинописного текста, 53 рисунка, 6 таблиц и библиографический список литературы из 187 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая постановка изучаемых проблем, обосновывается их важность и кратко излагается материал диссертации.

В первой главе определяется понятие ЭЛМ ФФ и последовательно излагается метод определения необходимого числа ФФ для описания ЭЛМ структуры рассматриваемой сильно взаимодействующей частицы. Продемонстрирована общая схема нахождения ближайших особенностей (точек ветвления) ЭЛМ ФФ на основе изучения аналитических свойств формального ряда диаграмм Фейнмана, получаемого для ФФ в рамках теории возмущений лагранжевой квантовой теории поля.

Так как при построении глобальной аналитической модели ЭЛМ структуры сильно взаимодействующих частиц в диссертации используются также известные свойства проявления кварковой структуры адронов, то вторая глава посвящена краткому изложению предсказания асимптотического поведения ЭЛМ ФФ сильно взаимодействующих частиц правилами кваркового счета и подтверждению этого результата с точностью до логарифмической поправки в случае пиона в рамках квантовой хромодинамики.

Третья глава имеет также вспомогательный характер и посвящена изложению основной идеи модели доминантности векторных мезонов (ВМД), являющейся исходным пунктом в диссертации при построении глобальной аналитической модели ЭЛМ структуры сильно взаимодействующих частиц.

Четвертая глава диссертации содержит общую схему строения унитаризованной аналитической ВМД модели для ЭЛМ ФФ, которая является объединением хорошо обоснованной ВМД модели с приближением нулевых ширин векторных мезонов, правильных аналитических свойств ФФ на физическом листе римановой поверхности и асимптотического поведения, предсказываемого кварковой моделью адронов.

Исходным пунктом при этом является ВМД модель

$$F_k^{(VMD)}(t) = \sum_V \frac{m_V^2 (f_{V\pi\pi}/f_V)}{m_V^2 - t} \quad (I)$$

с асимптотическим поведением $F_k^{(VMD)}(t) \sim t^{-1} |_{t \rightarrow \infty}$, одинаковым для всех сильно взаимодействующих частиц, что явно находится в проти-

воречии с предсказанием кварковой модели для барионов и атомных ядер. Включение в (I) аналитических свойств ЭЛМ ФФ проведено в приближении двух разрезов, генерированных точками ветвления t_0 и t_{in} типа квадратного корня, что осуществлено с помощью последовательных конформных отображений

$$Q = [(t-t_0)/t_0]^{1/2} \quad \text{и} \quad W(t) = i \frac{[Q_{in} + Q]^{1/2} - [Q_{in} - Q]^{1/2}}{[Q_{in} + Q]^{1/2} + [Q_{in} - Q]^{1/2}} \quad (2)$$

Эта процедура позволяет обобщить асимптотическое поведение в согласии с предсказанием кварковой модели адронов. Введение ненулевых ширин векторных мезонов ($\Gamma_V \neq 0$) приводит также к ряду других замечательных свойств $F_k(t)$ по сравнению со свойствами в формуле (I).

В конечном результате получается модель ЭЛМ ФФ в виде

$$F_k[W(t)] = \left[\frac{t-W^2}{t-W^2} \right]^{n_q-1} \left\{ \sum_i \frac{(w_N - w_i)(w_N - w_i^*)(w_N - 1/w_i)(w_N - 1/w_i^*)}{(w - w_i)(w - w_i^*)(w - 1/w_i)(w - 1/w_i^*)} (f_{i,h\bar{k}}/f_i) + \sum_j \frac{(w_N - w_j)(w_N - w_j^*)(w_N + w_j)(w_N + w_j^*)}{(w - w_j)(w - w_j^*)(w + w_j)(w + w_j^*)} (f_{j,h\bar{k}}/f_j) \right\}, \quad (3)$$

которая действительна на вещественной оси при $t < t_0$, имеет разрез, начиная с $t \geq t_0$, сохраняет условие нормировки исходной ВМД модели (I) и имеет асимптотическое поведение

$$F_k(t) \sim t^{-n_q} |_{t \rightarrow \infty}, \quad (4)$$

где n_q - число составляющих кварков рассматриваемой сильно взаимодействующей частицы. Она определена на четырехлистной поверхности Римана, где i, j - полюса на ее нефизических листах, и зависит только от параметров с ясной физической интерпретацией ($m_V, \Gamma_V, f_{i,h\bar{k}}/f_i, t_{in}$). В следующих главах диссертации эта модель применяется к анализу данных по ЭЛМ ФФ пиона, каонов, нуклонов, ядер He^4, He^3 и H^3 .

Содержанием пятой главы является решение проблем, связанных с ЭЛМ структурой пиона. Глава состоит из семи параграфов (§ 5.1 - § 5.7).

В § 5.1 резюмируется имеющаяся экспериментальная информация о ЭЛМ ФФ пиона и обсуждаются методы получения данных из различных

процессов. Подчеркивается исключительное место ЭЛМ $\Phi\Phi$ пиона среди всех $\Phi\Phi$ других адронов вследствие отсутствия нефизической области и его измеримости всюду на действительной оси t .

Параграф 5.2 посвящен известным свойствам ЭЛМ $\Phi\Phi$ пиона. Более детально доказывается, что самая нижняя точка ветвления $t_c = 4m_\pi^2$ - типа квадратного корня, $\Phi\Phi$ пиона на Π листе римановой поверхности, кроме правого унитарного разреза, имеет и левый разрез при $-\infty < t < 0$, и тождество фазы $\Phi\Phi$ с P -волновой изовекторной фазой $\pi\pi$ -рассеяния в упругой области.

В § 5.3 двумя разными подходами демонстрируется влияние левого разреза на втором листе римановой поверхности на поведение пионного $\Phi\Phi$ в упругой области и тем самым демонстрируется важность его явного учета при конструкции моделей ЭЛМ $\Phi\Phi$ пиона, основанных на аналитичности.

В § 5.4 рассматривается вопрос надежности отдельных наборов экспериментальных данных по ЭЛМ $\Phi\Phi$ пиона. Был предложен метод проверки совместимости пространственноподобных данных, полученных модельно-зависимым способом из процессов электророжения с данными, полученными непосредственно из сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Идея состоит в перенесении надежной экспериментальной информации о пионном $\Phi\Phi$ из $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в область проверяемых данных при помощи интегрального соотношения

$$F_\pi(Q^2) = \frac{1}{\pi} \int_{4m_\pi^2}^{t_{\pi^+\pi^-}} \frac{J_m^E F_\pi(t)}{t+Q^2} dt + \frac{1}{\pi} \int_{t_{\pi^+\pi^-}}^{\infty} \frac{J_m^A F_\pi(t)}{t+Q^2} dt \quad (5)$$

и вычислении парциальных χ_p^2 в каждой проверяемой точке. В то время, как экспериментальная информация о поведении $J_m^E F_\pi(t)$ для $4m_\pi^2 < t < t_{\pi^+\pi^-}$ получается непосредственно из сечения $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-}(t)$, поведение $J_m^A F_\pi(t)$ для $t > t_{\pi^+\pi^-}$ аппроксимируется с помощью параметризации, удовлетворяющей общим ограничениям, вытекающим из КХД и аналитичности.

В § 5.5 вычисляется поведение пионного $\Phi\Phi$ в рамках модифицированной модели кварковых петель, причем в мезон-кварк-антикварковые вершины подставляется аднопараметрическая волновая функция типа бозонного пропагатора

$$\phi(\ell) = -\frac{M^2}{\ell^2 - M^2}, \quad (6)$$

зависящая от относительного импульса ℓ кварк-антикварковой пары и параметра эффективной массы M . Эта функция играет двойную роль. Она, в определенном смысле, имитирует связанное состояние кварк-антикварка в виде пиона, а также обеспечивает сходимость соответствующих интегралов Фейнмана.

В конечном результате получается поведение пионного $\Phi\Phi$, которое совпадает с существующими данными в интервале значений квадрата переданного импульса $-0,08 \text{ ГэВ}^2 \leq t \leq 4m_\pi^2$.

В § 5.6 обсуждается проблема строения глобальных аналитических моделей ЭЛМ структуры пиона, которые описывали бы всю имеющуюся в настоящее время экспериментальную информацию. Приводятся попытки различных обобщений самой цитируемой модели Гунариса-Сакурая, основанной на силе обобщенного приближения эффективного радиуса для P -волновой изовекторной фазы $\pi\pi$ -рассеяния, и их недостатки. Предложена модель пионного $\Phi\Phi$

$$F_\pi(t) = \frac{(Q-Q_x)(Q-Q_p)}{(Q-Q_p)(Q-Q_x)} \sum_{\nu=\rho, \rho', \rho''} \frac{(Q-Q_\nu)(Q-Q_\nu^*)}{(Q-Q_\nu)(Q-Q_\nu^*)} (f_{\nu\pi\pi}/f_\nu) \quad (7)$$

с $Q = [(t-4)/4]^{1/2}$, $Q_\nu = [\{(m_\nu - i\Gamma_\nu/2)^2 - 4\}/4]^{1/2} \equiv -Q_\nu^*$, $Q_x = i$, которая обладает упругим разрезом, как и все модели типа Гунариса-Сакурая, и вклады высших резонансов $\rho'(1450)$ и $\rho''(1700)$ учтены единым способом. Более того, она учитывает вклад левого разреза на Π листе римановой поверхности, который представлен в (7) в виде нуля Q_x и полюса Q_p .

Из требования наилучшего описания существующих данных с помощью (7) удалось определить значения всех свободных параметров модели ($\chi^2/n_{df} = 531/282$):

$$\begin{aligned} m_\rho &= 763 \pm 2 \text{ МэВ}, & \Gamma_\rho &= 145 \pm 3 \text{ МэВ}, & f_{\rho\pi\pi}/f_\rho &= 1,089 \pm 0,006, \\ m_{\rho'} &= 1350 \pm 25 \text{ МэВ}, & \Gamma_{\rho'} &= 379 \pm 33 \text{ МэВ}, & f_{\rho'\pi\pi}/f_{\rho'} &= -0,179 \pm 0,013, \\ m_{\rho''} &= 1740 \pm 51 \text{ МэВ}, & \Gamma_{\rho''} &= 290 \pm 50 \text{ МэВ}, & f_{\rho''\pi\pi}/f_{\rho''} &= 0,090 \pm 0,011, \end{aligned} \quad (8)$$

которые подтверждают присутствие соответствующих резонансов в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Однако модель (7) пренебрегает вкладами неупругих каналов, которые на языке аналитических свойств учитываются появлением точек ветвления в соответствующих порогах. Показывается, что это приводит к противоречию с экспериментальными данными о P -волновой изовекторной амплитуде $\pi\pi$ -рассеяния.

Решением вопроса является глобальная аналитическая модель (3) и ее усовершенствование, состоящее в явном учете так называемых пороговых условий.

В последнем параграфе главы У разработан метод вычисления фазы и неупругости парциальной амплитуды пион-пионного рассеяния из предложенных моделей пионного $\Phi\Phi$, обладающих эффективным неупругим разрезом. Он является хорошим примером нетривиального действия аналитичности в физике. Оказывается, что только требование выполнения пороговых условий моделью пионного $\Phi\Phi$ с явной неупругостью приводит к согласию предсказанного поведения неупругости амплитуды $\pi\pi$ -рассеяния с существующими данными.

В шестой главе рассматривается использование унитаризованной аналитической ВМД модели при изучении ЭЛМ структуры каонов. Модель (3) явно применяется к изоскалярному $F_K^s(t)$ и к изовекторному $F_K^v(t)$ $\Phi\Phi$ каонов, которые связываются с $\Phi\Phi$ заряженного и нейтрального каона следующим образом:

$$F_{K^+}(t) = F_K^s(t) + F_K^v(t), \quad (9)$$

$$F_{K^0}(t) = F_K^s(t) - F_K^v(t).$$

В случае изоскалярного $\Phi\Phi$ суммы в (3) насыщаются изоскалярными векторными мезонами ω , φ , φ' и пренебрегается вкладом J/ψ (3097) и ψ' (3685), поскольку они находятся далеко от области существования экспериментальных данных по каонным $\Phi\Phi$. В случае изовекторного $\Phi\Phi$ учитываются вклады трех изовекторных векторных мезонов: ρ (770), ρ' (1450) и ρ'' (1700).

Так как ω (783) и φ (770) расположены в нефизической области, где нет ни одной экспериментальной точки и эти резонансы определены с хорошей точностью, в анализе данных их параметры фиксируются при табличных значениях.

Из требования наилучшего описания существующих данных получались следующие массы остальных резонансов:

$$m_{\varphi} = 1019,4 \pm 0,6 \text{ МэВ}, \quad m_{\rho'} = 1421,1 \pm 74,7 \text{ МэВ}, \quad (10)$$

$$m_{\rho''} = 1641,2 \pm 16,5 \text{ МэВ}, \quad m_{\rho^*} = 1947,1 \pm 67,2 \text{ МэВ},$$

которые подтверждают присутствие ρ' (1450) в процессе $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ и указывают на то, что данные по каонным $\Phi\Phi$ предпочитают вклад ρ'' (2150) вкладу ρ^* (1700)-резонанса.

Интересный результат получается при применении унитаризованной аналитической ВМД модели к анализу данных по нуклонным $\Phi\Phi$, которому посвящена седьмая глава диссертации. Соотношение (3) подставляется вместо изоскалярного и изовекторных дираковских и паулиевских $\Phi\Phi$ в выражениях

$$G_E^p(t) = [F_1^s(t) + F_1^v(t)] + \frac{t}{4m_p^2} [F_1^s(t) + F_1^v(t)], \quad (11)$$

$$G_M^p(t) = [F_1^s(t) + F_1^v(t)] + [F_2^s(t) + F_2^v(t)]$$

и

$$G_E^n(t) = [F_1^s(t) - F_1^v(t)] + \frac{t}{4m_n^2} [F_2^s(t) - F_2^v(t)], \quad (12)$$

$$G_M^n(t) = [F_1^s(t) - F_1^v(t)] + [F_2^s(t) - F_2^v(t)],$$

причем проводится коррекция асимптотического поведения изоскалярной и изовекторной части паулиевского $\Phi\Phi$ так, чтобы добиться согласия асимптотических поведений нуклонных электрических и магнитных $\Phi\Phi$ с предсказанием кварковой модели. Построенная так модель через соотношения (11) и (12) применяется к анализу существующих данных. Отмечаем, что по нейтронным $\Phi\Phi$ данные во времениподобной области пока отсутствуют. Однако, фиксируя параметры модели с помощью данных по протонным $\Phi\Phi$ и нейтронным $\Phi\Phi$ в пространственноподобной области, можно предсказать поведение электрического $|G_E^n|$ и магнитного $|G_M^n|$ нейтронного $\Phi\Phi$ и во времениподобной области, значения которых в области выше нуклон-антинуклонного порога сравниваются со значениями протонных $\Phi\Phi$ в таблице.

Таблица

t [ГэВ ²]	$ G_E^p $	$ G_E^n $	$ G_M^p $	$ G_M^n $
3.6	0.462	2.374	0.460	2.343
3.8	0.364	1.965	0.361	1.870
4.0	0.295	1.653	0.294	1.518
4.2	0.244	1.410	0.245	1.252
4.4	0.205	1.217	0.209	1.046
4.6	0.175	1.061	0.180	0.884
4.8	0.152	0.933	0.156	0.755
5.0	0.132	0.827	0.137	0.651

Оттуда видно, что в среднем нейтронные ФФ в пять раз больше протонных ФФ, и в результате предсказывается следующее соотношение между полными сечениями электрон-позитронной аннигиляции на нуклон-антинуклонную пару:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow n\bar{n}) = 25 \times \sigma(e^+e^- \rightarrow p\bar{p}), \quad (I3)$$

которое представляет интерес в связи с подготовкой нового эксперимента на ускорителе ADONE во Фраскати для измерения нейтронных ФФ во времениподобной области.

Восьмая глава посвящена обобщению унитаризованной аналитической ВМД модели для описания ЭМ структуры легких атомных ядер, конкретно для He^4 , He^3 и H^3 . Эта модель не только воспроизводит существующие данные по ЭМ ФФ в пространственноподобной области, но и предсказывает поведение ФФ во времениподобной области, из которых получились следующие оценки для соответствующих полных сечений электрон-позитронной аннигиляции на ядро-антиядро:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow He^4\bar{He}^4) \approx 10^{-35} \text{ мд} \quad (I4)$$

и

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow H^3\bar{H}^3) \approx \sigma(e^+e^- \rightarrow He^3\bar{He}^3) \approx 10^{-28} \text{ мд}.$$

В заключении дано краткое обсуждение основных результатов работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. S.Dubnička, O.Dumbrajs: Analyticity in hadron-nuclei binary reactions. (Аналитичность в адрон-ядерных бинарных реакциях). Phys. Reports, 19C (1975), 141.
2. S.Dubnička: Refined VMD model of electromagnetic form factors of hadrons and nuclei with correct analyticity and proper asymptotic behaviour. (Переработанная ВМД модель электромагнитных формфакторов адронов и ядер со строгой аналитичностью и правильным асимптотическим поведением), Frascati report LNF-87/72(RT), Frascati (Roma), (1987).
3. S.Dubnička, V.A.Meshcheryakov: Tail, zeros and space-like region behaviour of electromagnetic pion form factor. (Хвост, нули и поведение электромагнитного формфактора пиона в пространственноподобной области). Preprint JINR, E2-7982, Dubna (1974); Nucl. Phys., B83 (1974), 285.

4. S.Dubnička, I.Furdik, V.A.Meshcheryakov: An analytic formula describing all data on the pion form factor. (Аналитическая формула, описывающая все данные по пионному формфактору). Preprint ICTP, IC/76/102, Trieste (1976).
5. S.Dubnička, D.Krupa, L.Martinovič: Can the left-hand cut contribution of the second Riemann sheet to the pion form factor behaviour be neglected? (Можно пренебрегать вкладом левого разреза из второго листа Римана в поведение пионного формфактора?) Acta Phys. Slovaca, 29 (1979), 201.
6. S.Dubnička, L.Martinovič: Are the data on the electromagnetic pion form factor and P-wave isovector $\pi\pi$ phase shift really inconsistent? (Являются ли данные по электромагнитному формфактору пиона и P-волновой изовекторной $\pi\pi$ - фазы действительно несовместимыми?) Preprint JINR, E2-11773, Dubna (1978), J.Phys. G: Nucl. Phys., 4 (1978), L275.
7. S.Dubnička, A.Z.Dubničková, V.A.Meshcheryakov: Pion form factor and its asymptotic behaviour. (Формфактор пиона и его асимптотическое поведение). Preprint ICTP, IC/77/155, Trieste (1977), Czech. J. Phys., B29 (1979), 142.
8. S.Dubnička, L.Martinovič: Experimental behaviour of the P-wave isovector $\pi\pi$ phase shift and the pion form factor left-hand cut contribution. (Экспериментальное поведение P-волновой и изовекторной $\pi\pi$ - фазы и вклад левого разреза пионного формфактора). Czech. J. Phys., B29 (1979), 1384.
9. S.Dubnička, V.A.Meshcheryakov, J.Milko: The data on the electromagnetic pion form factor and P-wave isovector $\pi\pi$ phase shift are definitely consistent. (Данные о электромагнитном формфакторе пиона и P-волновой изовекторной $\pi\pi$ - фазе непременно совместимы). J.Phys. G: Nucl. Phys., 7 (1981), 605.
10. S.Dubnička, V.A.Meshcheryakov, M.Săraru: Weakly model dependent pion form factor with physically interpretable parameters. (Незначительно модельно-зависимый формфактор пиона с физически интерпретируемыми параметрами). Czech. J.Phys., B34 (1984), 1282.

11. S.Dubnička, L.Martinovič: A global analytic model of the pion electromagnetic structure and its utilization for other physical problems. (Глобальная аналитическая модель электромагнитной структуры пиона и ее использование для других физических проблем). Proc. IX Warsaw Symp. on Elementary Particle Physics in Kazimierz, Warszawa (1986), p. 241.
12. S.Dubnička, L.Martinovič: A direct compatibility check of the CEA and Cornell electroproduction pion form factor data with e^+e^- ones. (Прямая проверка совместности ЦЭА и корнельских данных по пионному формфактору из электропродукции с данными из электрон-позитронной аннигиляции). Communication JINR, E4-88-240, Dubna (1988).
13. S.Dubnička, M.Mojžiš: Analyticity and QCD pion form factor. (Аналитичность и пионный формфактор в КХД). Proc. VI Warsaw Symp. on Elementary Particle Physics in Kazimierz, Warszawa (1983), p. 243.
14. S.Dubnička, A.Z.Dubničková, Š.Dubnička: The root-mean-square pion charge radii from the first two Soviet-American experiments are unreliable. (Среднеквадратичные радиусы пиона из первых двух советско-американских экспериментов ненадежны). Z.Phys. C - Particles and Fields, 15 (1982), 149.
15. A.Z.Dubničková, S.Dubnička: Comments on the pion form factor and its asymptotic behaviour. (Замечания к формфактору пиона и его асимптотическому поведению). Czech. J.Phys., B31 (1981), 241.
16. S.Dubnička: An analysis of the third Soviet-American pion form factor data gives no support for the existence of $\rho'(1250)$. (Анализ данных по пионному формфактору из третьего советско-американского эксперимента не показывает на существование $\rho'(1250)$). Lett. Nuovo Cimento, 37 (1983), 236.
17. S.Dubnička, G.Georgios, V.A.Meshcheryakov: To what extent a modified quark-loop approximation and the naive VMD model are dual in the pion form factor behaviour. (До какой степени модифицированное приближение кварковых петель и наивная ВМД модель дуальны в поведении формфактора пиона). Proc. Hadron Structure '83 Conference in Smolenice, Bratislava, VEDA (1985), p. 367.

18. S.Dubnička, G.Georgios, V.A.Meshcheryakov: Pion form factor behaviour in a modified quark loop model. (Поведение формфактора пиона в приближении модифицированной модели кварковых петель). Canadian J. Phys., 63 (1985), 1357.
19. S.Dubnička, I.Furdik, V.A.Meshcheryakov: Electromagnetic structure of pion in the framework of adjusted VMD model with elastic cut. (Электромагнитная структура пиона в рамках приспособленной ВМД модели с упругим разрезом). Communication JINR, E2-87-432, Dubna (1987).
20. S.Dubnička, L.Martinovič: Higher rho states from $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ (Высшие состояния ρ -мезона из $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$). Proc. XXI Rencontre de Moriond, Les Arcs, Ed. Frontières (1986).
21. S.Dubnička, I.Furdik, V.A.Meshcheryakov: Modified three-pole VMD model with two-branch-point analytic structure and approved asymptotic behaviour for the pion electromagnetic form factor. (Модифицированная трехполюсная ВМД модель с аналитической структурой, состоящей из двух точек ветвления и согласовательной асимптотикой для электромагнитного формфактора пиона). Communication JINR, E2-87-433, Dubna (1987).
22. S.Dubnička, L.Martinovič: Compatibility of higher rho resonances with the pion form factor data. (Совместимость высших ρ -резонансов с данными по пионному формфактору). Czech. J. Phys., B36 (1986), 1311.
23. A.Z.Dubničková, S.Dubnička, B.I.Khasin, P.Másiar: There is no equivalence between $\rho'(1250)$ and inelastic effects in $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ (Не существует заменимости между $\rho'(1250)$ и неупругими вкладами в $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$). Preprint ICTP, IC/85/52, Trieste (1985). Czech J. Phys., B37 (1987), 815.
24. С.Дубничка: Использование аналитичности при анализе данных по электромагнитным формфакторам адронов. Сообщение ОИИИ P2-85-869, Дубна (1985).
25. S.Dubnička, L.Martinovič: Analytic pion form factor with higher rho resonances. (Аналитический формфактор пиона с высшими ρ -резонансами). Proc. VII Warsaw Symp. on Elementary Particle Physics in Kazimierz, Warszawa (1984), p. 511.

26. S.Dubnička, L.Martinovič: Inelastic $I = J = 1$ $\pi\pi$ scattering amplitude from data on $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. (Неупругая $I = J = 1$ пи-пи амплитуда рассеяния из данных по $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$).
Preprint ICTP, IC/85/85, Trieste (1985).
Lett. Nuovo Cimento, 44 (1985), 462.
27. D.Krupa, S.Dubnička, V.Kundrát, V.A.Meshcheryakov: Vector-meson contributions to the isovector electric nucleon form factor. (Вклады векторных мезонов в изовекторный электрический формфактор нуклона).
Preprint JINR, P2-83-508, Dubna (1983).
J. Phys. G: Nucl. Phys., 10 (1984), 455.
28. S.Dubnička, O.Dumbrajs: Electromagnetic structure of spin-zero light nuclei from point of view of analyticity. (Электромагнитная структура легких ядер с нулевым спином с точки зрения аналитичности).
Preprint JINR, E2-9247, Dubna (1975).
29. S.Dubnička: Analysis of nucleon form factor data reveals the $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ cross section to be remarkably larger than the $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ one. (Анализ данных по нуклонным формфакторам показывает, что сечение процесса $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ намного больше сечения процесса $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$).
Frascati report, LNF-87/105 (R), Frascati (Roma), (1987).
Nuovo Cimento, 100A (1988), I.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июня 1989 года.