

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К 59

2-90-150

КОЗЛОВ
Геннадий Алексеевич

УДК 530.145
530.7

**ДИНАМИКА РАСПАДОВ
ПСЕВДОСКАЛЯРНЫХ МЕЗОНОВ
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТЕОРИИ
СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ**

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

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

Дубна 1990

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

В.И. Саврин

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук,
профессор

Р.Н. Фаустов

доктор физико-математических наук

В.Р. Гарсеванишвили

Ведущее научно-исследовательское учреждение:


Институт физики высоких энергий, Протвино

Защита диссертации состоится "4" апреля 1990 года
в 15⁰⁰ часов на заседании Специализированного ученого
совета КО47.О1.О1. в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской
области.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "5" марта 1990 года

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук


А.Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации представлен метод и результаты исследования струк-
туры адронных состояний в одной из форм их взаимодействия с другими
объектами микромира -- в конверсионных и лептонных распадах псевдо-
скалярных мезонов.

Идеи разработанного метода основаны на диаграммной шпурионной
технике, предложенной В.Г. Кадышевским, и возникающей в локальной
ковариантной гамильтоновой формулировке квантовой теории поля (КТП).
Изучение структуры релятивистских связанных состояний кварка и анти-
кварка, кваркониев, опирается на уравнение для полной инвариантной
вершинной функции.

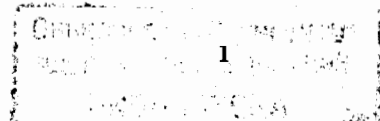
С помощью разработанного аппарата возможно вычисление матричных
элементов физических процессов в составных моделях элементарных час-
тиц.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Актуальной задачей исследования субструктуры материи на уровне
взаимодействий элементарных частиц является изучение динамических
черт поведения сечений физических процессов, основываясь на кванто-
вой теории калибровочных полей. Уравнения КТП имеют существенно не-
линейный характер. Аналогичный характер носят и уравнения Дайсона -
Швингера. Уравнения же типа Бете-Солпитера (БС) для двухчастичной
функции Грина являются линейными.

При решении в диссертации задач по выяснению "механизмов" вза-
имодействия составляющих частиц возникающие трудности, иногда значи-
тельные, приводят к тому, что становится невозможным решение пробле-
мы в общем виде, используя двухвременной формализм БС. Решение ряда
конкретных задач в теории релятивистского описания связанной двух-
частичной системы опирается на известный метод одновременного подхо-
да (квазипотенциальный метод Логунова-Тавхелидзе) в КТП и, в частнос-
ти, в диссертации -- на метод диаграммной шпурионной техники Кадышев-
ского.

Ядро трехмерного уравнения определено в терминах двухвременной
функции Грина для двух частиц



Такой подход в теории является более предпочтительным и позволяет вычислить уровни энергии связанной системы двух частиц.

Если рассматривать адроны как составные объекты, то стоящие перед теорией основные вопросы, связанные с проявлением сложной структуры этих объектов в процессе взаимодействия, не могут быть выяснены без знания вершинных функций, зависящих от импульсных переменных, присущих составляющим частицам и составной системе в целом.

Выполненный в диссертации анализ переходных формфакторов (ПФФ) в распадах кваркониев, вычисление ширин распадов существенно зависят от свойств полных инвариантных вершинных функций.

В диссертации вершинная функция и волновая функция (ВФ) связанного состояния двух кварков рассматриваются как решения соответствующих ковариантных трехмерных уравнений (описывающих составную систему из двух частиц со спином $1/2$). Актуальными являются рассмотренные в диссертации задачи о конверсионных далитц-распадах и лептонных распадах π^0 - и η -мезонов в связи с существующей проблемой вычисления переходных формфакторов и асимптотического поведения упругих формфакторов этих мезонов в квантовой хромодинамике (КХД). Отмеченные распады являются более простыми и, поэтому, поддаются более полной теоретической интерпретации, чем чисто адронные взаимодействия.

Получение решений динамических уравнений для связанных состояний с релятивистскими потенциалами удержания кварков является актуальным в связи с готовящимися экспериментами по изучению сечений конверсионных и лептонных распадов легких и чармованных мезонов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Разработка теоретических представлений о потенциалах удержания частиц в модельных задачах КТП.

2. Воспользовавшись основными методами шпурионной диаграммной техники провести анализ структурной вершинной функции с одномерным параметром в теории связанных состояний.

3. Разработка процедурной схемы выделения КХД-потенциала взаимодействия на малых расстояниях между двумя кварками.

4. Проведение сравнительного анализа возможных способов построения физических амплитуд в рамках стандартной теории на основе S -матрицы и трехмерной теории связанного состояния двух частиц на примере вычисления константы f_π распада $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$ с учетом инвариантной вершинной функции, описывающей структуру π -мезона.

5. Разработка точной релятивистской модели рождения пар лептонов, находящихся в связанном (со спином $S = 1$) состоянии в конверсионных распадах легких мезонов.

6. Разработка теоретического аппарата, позволяющего учитывать влияние ПФФ на спектр эффективных масс пар лептонов в конверсионных далитц-распадах в трехмерной теории связанных состояний.

7. Исследование сечения рождения связанного псевдоскалярного $\bar{c}c$ -состояния на встречных e^+e^- -пучках.

8. Построение динамической модели кваркония с полным спином равным нулю и исследование связи параметров ПФФ с характерными свойствами этой модели.

9. Применение разработанного в диссертации формального аппарата для вычисления вероятностей конверсионных далитц-распадов и лептонных распадов π , η , K_L и η_c -мезонов.

Актуальной является широкая экспериментальная проверка сделанных в диссертации модельно-теоретических предсказаний.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- Сформулирована проблема удержания в двумерных и четырехмерных модельных задачах КТП. Получены феноменологические потенциалы удержания частиц при условии, что обменное поле будет удовлетворять уравнению с производными не ниже четвертого порядка.

- На основе диаграммной шпурионной техники Кадышевского, разработана процедура для вычисления матричных элементов физических переходов с учетом влияния характерной для релятивистской составной системы структуры, математически выделенной в виде полной инвариантной вершинной функции.

- Разработано представление о том, что кварк-мезонная вершинная функция не является элементарной, а ее структура определяется ВФ кваркониия.

- Даны новые предсказания относительно вероятности рождения двух лептонов, находящихся в связанном ортосостоянии в случае конверсионных распадов π^0 и η мезонов.

- Новой качественной чертой развитого в диссертации подхода является вывод о том, что в конверсионных дилитц-распадах псевдоскалярных мезонов, на примере π^0 , η , η_c , в области малых значений квадрата инвариантной массы пары лептон-антिलептон, S , должны наблюдаться значительные отступления в поведении ПФФ от предсказаний модели векторной доминантности и модели кварковых треугольных петель.

Предсказана оригинальная особенность у ПФФ теоретической возможности немоногоного его поведения ("dip" - эффект) при малых значениях S .

- Использование одновременного подхода к КТД в диссертации позволяет при КХД - чармониевой ВФ выполнить численные расчеты вероятностей распадов $\eta_c \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta_c \rightarrow \gamma\bar{e}e$ и рождении η_c -мезона в столкновениях e^+e^- . Основная нормировочная величина - ширина радиационного распада η_c -мезона на два фотона - представлена в виде функции от величины масс конститугентного C -кварка.

- Получены оригинальные модельно-зависимые формулы, по которым возможно вычислить амплитуды распадов псевдоскалярных мезонов высших порядков типа $P \rightarrow \bar{e}e$.

- В рамках полусной модели в релятивистской теории связанных состояний показано, что основной вклад в амплитуду распада $K_L \rightarrow \mu^+\mu^-$ вносит однополюсной η -мезонный член.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

- Вычисленные двухфотонные ПФФ в области малых значений S проявляют специфические черты, присущие модели векторной доминантности. В области же больших значений S асимптотическое выражение для ПФФ является аналогичным как и при вычислении в рамках КХД.

Полученные ограничения для переходных двухфотонных факторов оказываются вполне достаточными для надежных вычислений амплитуд распадов.

- Сравнение полученных в диссертации результатов с экспериментальными данными с одной стороны подтверждают правильность теоретических представлений о существенной роли вершинной функции с массивными и модельными параметрами в амплитуде перехода адрон-фотон, с другой стороны, эти сравнения выявили новые неожиданные эффекты в конверсионных дилитц-распадах, особенно легких мезонов, требующие более детального экспериментального изучения.

- Переходные факторы нейтральных мезонов в их конверсионных (π^0 , η , $\eta_c \rightarrow \gamma\bar{e}e$) и лептонных (π^0 , η , $K_L \rightarrow \bar{e}e$) распадах позволяют почувствовать эффективную массу составляющих мезонных и нестранных кварков.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Работы, являющиеся основой диссертации, докладывались автором на научных семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории ядерных проблем; сессии Отделения ядерной физики АН СССР, Москва, 1984 год; Международной школе по теоретической физике, Закопане, 1983; VIII Международном симпозиуме по калибровочным теориям поля, Аренскооп, 1984; Международной конференции "Структура адронов - 86", Смоленце, 1986; рабочем Советании по сепарабельным взаимодействиям, Будапешт, 1987; Международном симпозиуме по физике элементарных частиц, Пиештяны, 1988; Международной конференции "Структура адронов - 89", Смоленце - 1989.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе в журналах "Zeitschrift für Physik C - Particles and Fields", Теоретическая и математическая физика, Ядерная физика, в сборниках трудов Международных конференций и в препринтах ОИЯИ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения, приложения, содержит 157 страниц машинописного текста, 18 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 169 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы решаемые в диссертации задачи и проводится сравнительное обоснование феноменологических кварковых моделей сильных взаимодействий на основе соответствующей калибровочной теории - КХД. Обладая большей в сравнении с теорией квантованных полей простотой феноменологические кварковые модели позволяют получить большое количество теоретических предсказаний.

Многие проблемы в современной теории элементарных частиц не могут быть решены без знания ВФ адронов как систем связанных кварков.

Волновая функция двух релятивистских частиц, находящихся в связанном состоянии, является основным структурным звеном в вычислениях матричных элементов физических процессов, рассмотренных в диссертации. Волновая функция задает импульсное распределение составляющих частиц и понимается в смысле разложения вектора состояния $\chi(P)$ системы с полным импульсом P по отдельным состояниям частиц (c

точностью до постоянной нормировки) с соответствующими импульсами, "лежащими" на массовой поверхности

$$\mathcal{F}(P) \sim \sum_2 \int f(\vec{k}_1, \vec{k}_2; P) a^+(\vec{k}_1) a^+(\vec{k}_2) |0\rangle \delta^{(3)}(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{P}) d\Omega_{\vec{k}_1} d\Omega_{\vec{k}_2}, \quad (1)$$

$$d\Omega_{\vec{k}_i} = d^3\vec{k}_i (2\pi)^{-3} (2k_i^0)^{-1}, \quad k_i^0 = (\vec{k}_i^2 + m_i^2)^{1/2}$$

коэффициенты $f(\vec{k}_1, \vec{k}_2; \vec{P})$ являются суть фоковскими компонентами, которые и определяют вероятности присутствия в системе двух частиц.

Вычисления вероятностей конверсионных и лептонных распадов мезонов опираются на разработанный В.Г. Кадышевским метод штурмионной диаграммной техники на основе ковариантной гамильтоновой формулировки КТП.

Дано описание структурного построения диссертации и краткое содержание по главам.

Первая глава является вводной и содержит постановку проблемы удержания частиц в модельных задачах КТП.

В разделе I.1 сделаны вводные замечания.

В разделе I.2 рассмотрена двумерная модель в рамках двумерной квантовой электродинамики (КЭД)₂ с произвольными массивными параметрами с целью, используя канонический формализм, корректным образом получить "пропагатор" калибровочного поля без необходимости введения инфракрасной регуляризации.

В разделе I.3 исследована \mathcal{D} -размерная калибровочная модель с механизмом удержания, аналогичным как и в случае (КЭД)₂.

В разделе I.4 получены модельные феноменологические потенциалы удержания типа

$$V(z) = - \frac{g^2}{8\pi^{c/2}} \cdot \frac{1}{(c-1)!} \cdot \Gamma\left(\frac{3}{2}-c\right) \left(\frac{z}{2}\right)^{2c-3}, \quad (2)$$

где $z \equiv |\vec{x}|$. При этом обменное поле $\varrho(x)$, связанное со скалярным полем $\phi(x)$ частиц в модельном лагранжиане взаимодействия

$$\mathcal{L}_{\text{вз}} \sim g: \phi^2(x) \varrho(x):, \quad (3)$$

должно удовлетворять уравнению

$$\square^c \varrho(x) = 0, \quad c = 1, 2, \dots, \quad \square \equiv \frac{\partial}{\partial x_\mu} \frac{\partial}{\partial x^\mu}, \quad (4)$$

Фурье образ волновой функции связанного состояния двух скалярных частиц $\varphi(E, \vec{P})$ в релятивистском P -пространстве удовлетворяет следующему уравнению

$$[E^2 - (2P^0)^2] \varphi(E, \vec{P}) = 2 \int d\Omega_{\vec{k}} (k^0/P^0) V(E; \vec{P}, \vec{k}) \varphi(E, \vec{k}), \quad (5)$$

где $P^0 = (\vec{P}^2 + m^2)^{1/2}$, $k^0 = (\vec{k}^2 + m^2)^{1/2}$, $d\Omega_{\vec{k}} = d^3\vec{k} (2\pi)^{-3} (2k^0)^{-1}$.

Выбрав значение $c = 2$ в \mathcal{D} мерном пространстве, получим:

$$V(z) \sim g^2 z (\pi^{2/2} + \ln \mu z). \quad (6)$$

Входящие в теорию параметры m , g и μ могут быть определены из спектра масс и вероятности распада частиц.

Во второй главе представлена общая трехмерная формулировка теории связанного состояния двух тел.

Полная информация о связанных; например, лептонных (позитроний, мюоний) состояниях с массами m_n содержится в двухчастичном пропагаторе $G(P; p_2, p_1)$, зависящем от полного импульса P и относительных импульсов входящих p_1 и выходящих p_2 пар частиц

$$G(P; p_2, p_1) \Rightarrow \frac{i}{P^0 - \omega_n} \frac{\sum_j \Psi_{nj}(p_2) \bar{\Psi}_{nj}(p_1)}{2\omega_n}, \quad (7)$$

где $\omega_n = (m_n^2 + \vec{P}^2)^{1/2}$, $P = (P^0, \vec{P})$, $\Psi_n(p:)$ ($\bar{\Psi}_n(p:)$) - волновая функция (сопряженная ей) с условием нормировки (в операторной форме)

$$\Psi_{nj} \left\{ i \frac{\partial}{\partial P^0} G^{-1}(P_n) \Big|_{P=P_n} \right\} \Psi_{nj} = 2\omega_n \delta_{ij}. \quad (8)$$

В разделе 2.1 рассматривается один из вариантов "получения" релятивистской ВФ $\Phi_n(p)$ для связанной лептон-антилептонной пары в основном состоянии (с квантовыми числами $n = 1$, $\ell = 0$) в "низшем приближении" в систематическом пертурбативном подходе. При вычислении четырехмерных интегралов по относительным импульсам частиц в физических амплитудах переходов в разделе 3.4 третьей главы дис-

сертации воспользуемся именно аппроксимационной функцией $\Phi_{n=1}(\rho)$.

В разделе 2.2 исследуется вопрос о вычислении для процессов распадов составных систем матричных элементов, в общем случае выражающихся через вершинные функции, которые являются решениями динамических уравнений. Для описания структуры релятивистских связанных систем получено уравнение, которому удовлетворяет полная инвариантная вершинная функция вне массовой поверхности

$$\Gamma_3(\rho^0|\rho^0, \omega\tau) = 8 \int d^4\tilde{\rho}' \left(\frac{2\rho^0}{2\rho^0} \right) \frac{\Gamma_3(\tilde{\rho}'|\rho^0, \omega\tau)}{(2\rho^0)^2 - m_p^2 + i0} \times V_0(q^2, \omega\tau)(2\rho^0\rho^0 - m_q^2), \quad (9)$$

где $V_0(q^2, \omega\tau)$ - потенциал взаимодействия, $\omega\tau$ - дополнительный 4 импульс в вершинной функции Γ , обеспечивающий "сход" с массовой поверхности, m_p и m_q соответственно массы связанного состояния и кварка. Приводится связь между скалярными частями вершинной функции и релятивистской одновременной ВФ.

Третья глава посвящена применению формального аппарата (который обсуждался во второй главе диссертации) к исследованию процессов распада легких π и η - мезонов и выбором в связи с этим массивных параметров.

В разделе 3.1 приводится постановка задачи и описываются особенности проблемы, возникающие при вычислении константы f_π распада $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$, связанные с выбором массивного параметра - массы кварка.

В КХД бегущие (зависящие от q^2) массы, входящие в пропагаторы кварков, удовлетворяют уравнению

$$m^{(k)}(q^2) = m_{\text{ток}}^{(k)}(q^2) + m_{\text{дин}}(q^2) \quad (10)$$

для любого из k - ароматов, а токовые ($m_{\text{ток}}^{(k)}$) и динамические ($m_{\text{дин}}$) массы кварков зависят от бегущей константы $\alpha_s(q^2)$, что приводит к возможности сделать оценки для динамически возникающей массы $m_{\text{дин}}(q^2 = m_{\text{дин}}^2) \cong 0,315$ ГэВ, т.е. к масштабу величины, близкому к значению массы $m \sim (1/3)m_N$ для конституэнтного нестранныго кварка (m_N - масса нуклона).

Сделаны оценки для отношения масс, соответствующих странному и нестранному конституэнтным кваркам

$$(m_s/m) \cong 2 (f_K/f_\pi) - 1 \cong 1,34 \quad (11)$$

и $m_s \cong 0,510$ ГэВ при известном табличном значении $f_K/f_\pi \cong 1,17$ (f_K - константа распада K - мезона). Формально вектор $f_\pi(\rho^2) \cdot \rho_\mu$ (ρ - полный импульс связанного состояния) выражается в виде интеграла по импульсу k кварка

$$f_\pi(\rho^2) \rho_\mu = n_c \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{\tau_2 \{ (k+m_q) \gamma_\mu \gamma_5 (\hat{\rho}-k+m_q) \tilde{g}_{2\pi\bar{q}} \}}{(k^2 - m_q^2 + i0) [(\rho-k)^2 - m_q^2 + i0]}, \quad (12)$$

где n_c - число цветов, $\tilde{g}_{2\pi\bar{q}}$ - вершинная функция перехода кварк- \bar{q} - мезон-антикварк, m_q - масса кварка.

В разделе 3.2 представлен вывод формулы для константы f_π (распада $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$), зависящей от полной инвариантной вершинной функции $\tilde{\Gamma}_3$ связанного состояния

$$f_\pi = \frac{m_q g_A n_c}{2(2\pi)^2} \int_0^\infty dt \frac{(1 - 4m_q^2/t)^{1/2}}{t - m_\pi^2 - i0} \tilde{\Gamma}_3(t), \quad (13)$$

в рамках общего формализма на основе S - матрицы в КТП.

В разделе 3.3 в рамках одновременного подхода к КТП получена точная связь между f_π и ВФ (точнее её скалярной частью) связанного состояния:

$$f_\pi = 2m_q m_\pi^{-1} g_A n_c \int d^4z \tilde{\varphi}(\vec{k}). \quad (14)$$

Приведены результаты вычисления $f_\pi \cong 94,2$ МэВ с ВФ "релятивистского осциллятора" $\varphi(\chi_k) \sim \exp[-m_q^2 \text{ch} \chi_k / (2\omega)]$ (где $\chi_k = \ln[(1+k^0 + k^0)/m_q]$, $|k^0| = m_q \text{sh} \chi_k$, $k^0 = m_q \text{ch} \chi_k$) с учетом "элементарной" природы кварка ($g_A \cong 1$). Проведено сравнение используемых способов построения амплитуд распадов в зависимости от ВФ мезона.

В разделе 3.4 приведены оригинальные вычисления вероятностей образования пар лептонов, находящихся в связанном (со спином $S=1$) состоянии в распадах π^0 и η - мезонов. Связанное лептон-антилептонное состояние описывается релятивистской ВФ. "Источниками" лептонов, находящихся в связанном состоянии (позитроний, мюоний), могут быть лёгкие нейтральные мезоны в их распадах:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + (e^+e^-)_{S=1},$$

$$\eta \rightarrow \gamma + (e^+e^-)_{S=1},$$

$$\eta \rightarrow \gamma + (\mu^+\mu^-)_{S=1}.$$

Вычисления "сильной" части исследуемых процессов распадов осуществлены в рамках модели кварковых треугольных петель с точечным $g\gamma_5$ взаимодействием между мезоном и конституэнтными кварками, входящими в этот мезон.

Оригинальными являются оценки влияния переходного формфактора $F_s(Q^2, P^2; m_q)$ на конечный спектр связанных $(\ell\bar{\ell})_{s=1}$ -состояний. В частности, в случае малых значений масс связанных лептонных состояний $\sqrt{P^2}$ и ненулевом значении квадрата полного импульса распадающегося мезона,

$$F_s(Q^2, P^2; m_q) \cong \frac{-4g m_q}{\pi^2 Q^2} \times \left\{ \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right) \arcsin^2\left(\frac{\sqrt{Q^2}}{2m_q}\right) - \left[\frac{P^2}{(2m_q)^2}\right] \left[1 + P^2\left(\frac{1}{Q^2} + \frac{1}{4m_q^2}\right)\right] \right\} \quad (15)$$

Проводится сравнение $F_s(Q^2, P^2; m_q)$ с формфакторами, полученными а) в безмассовом $Q^2 = 0$ пределе для малых значений $\sqrt{P^2}$ и б) в рамках модели векторной доминантности, согласно которой электромагнитный ток адронов пропорционален полям векторных мезонов $V: \rho, \omega, \varphi$

$$J_\mu(x) = \sum_{V: \rho, \omega, \varphi} (m_V^2 / 2g_{V\gamma}) V_\mu(x) \quad (16)$$

Вычислены относительные вероятности образования связанных пар лептонов

$$\rho[\pi^0, \eta \rightarrow \gamma(e^+e^-)_{s=1}] \cong 0,60 d^4; \quad (17)$$

$$\rho[\eta \rightarrow \gamma(\mu^+\mu^-)_{s=1}] \cong 0,35 d^4, \quad \Theta = \Theta_\rho = -17,6 \pm 3,6^\circ; \quad (18)$$

$$\rho[\eta \rightarrow \gamma(\mu^+\mu^-)_{s=1}] \cong 0,33 d^4, \quad \Theta = 0^\circ. \quad (19)$$

Величина ρ (17) находится в хорошем согласии с единственными опытными данными

$$\rho^{\text{экв}}[\pi^0 \rightarrow \gamma(e^+e^-)_{s=1}] \cong (0,35 \div 0,70) d^4.$$

Результаты вычисления ρ в случае распадов $\eta \rightarrow \gamma(\mu^+\mu^-)_{s=1}$ слабо зависят от выбранного значения угла Θ синглет-октетного смешивания. Учет конституэнтных s -кварков приводит к увеличению значения ρ на 11% в сравнении с наивной кварковой моделью.

В четвертой главе приведены результаты исследований конверсионных и лептонных распадов псевдоскалярных мезонов. Вычислены ширины распадов.

В разделе 4.1 исследуются конверсионные дилитц-распады. Вероятность рождения дилитц-пар обусловлена динамической кварк-адронной (с учетом кварковой петли с вершинной функцией) и электромагнитной структурами, возникающими в блоке перехода мезон \rightarrow виртуальный фотон (γ^*). Эти структуры характеризуются переходными формфакторами $\tilde{F}(s)$. Необходимые данные о структуре переходной области мезон $\rightarrow \gamma^*\gamma$ могут быть получены в результате изучения зависимости ширины $\Gamma_{P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell}(s)$ распада $P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell$ от величины квадрата инвариантной массы лептон-антилептонной пары $s = (p_\ell + p_{\bar{\ell}})^2$, где p_ℓ и $p_{\bar{\ell}}$ - импульсы лептона и антилептона

$$\frac{1}{\Gamma_{P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell}} \frac{d\Gamma(s)}{ds} = \frac{2\alpha}{3\pi} \frac{1}{s} \left(1 - \frac{s}{m_P^2}\right)^3 \left(1 + \frac{2m_\ell^2}{s}\right) \left(1 - \frac{4m_\ell^2}{s}\right)^{1/2} |\tilde{F}(s)|^2 \quad (20)$$

Выполнены расчеты $\tilde{F}(s)$ с использованием одновременных волновых функций $\Phi(\gamma_k)$ кваркониев в случаях а) потенциала КХД одноглюонного обмена и б) релятивистского запирающего потенциала:

$$\tilde{F}_{P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell}(x) = \frac{1}{1-x} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \frac{\int_0^\infty d\gamma_k \Phi(\gamma_k) \ln |X(x, \gamma_k)|}{\int_0^\infty d\gamma_k \Phi(\gamma_k) \gamma_k} \right\} \quad (21)$$

где

$$X(x, \gamma_k) = \frac{1 - x e^{-\gamma_k} (\sqrt{P^2}/m_q - e^{-\gamma_k})}{1 - x e^{\gamma_k} (\sqrt{P^2}/m_q - e^{\gamma_k})}$$

γ_k - быстрота кварка, $x = s/P^2$.

Предсказана оригинальная особенность теоретической возможности немонотонного поведения $\tilde{F}(s)$ ("dip"-эффект) в распаде $\Sigma^+ \rightarrow \gamma e^+ e^-$ в области малых значений $s < 0,40 \cdot P^2$. Величина этого эффекта определяется видом ВФ $\phi(\gamma_k)$ кваркония.

В разделе 4.2 в рамках формализма, использованного при вычислениях конверсионных далитц - распадов мезонов, исследованы основные черты формфактора распада электродинамической связанной системы на примере распада парамоония $(\mu^+ \mu^-)_{s=0} \rightarrow \gamma e^+ e^-$. Связанное состояние - парамооний - аппроксимируется релятивистской ВФ вида

$$\phi(\gamma_k) \propto \frac{\sinh \gamma_k}{[c k \gamma_k - m_{(\mu^+ \mu^-)} / (2m_\mu)]^2} \quad (22)$$

Показано, что существует теоретическая возможность "dip"-эффекта, но его величина крайне мала ($\sim 0,5\%$) в области $s \leq 0,15 P^2$.

Вычислены ширины распадов $(\mu^+ \mu^-)_{s=0} \rightarrow \gamma \gamma$, $(e^+ e^-)_{s=0} \rightarrow \gamma \gamma$:

$$\Gamma_{(\mu^+ \mu^-)_{s=0} \rightarrow \gamma \gamma} = 1,648 \times 10^{12} \text{ сек}^{-1}, \quad (23)$$

$$\Gamma_{(e^+ e^-)_{s=0} \rightarrow \gamma \gamma} = 0,797 \times 10^{10} \text{ сек}^{-1} \quad (24)$$

Последняя находится в хорошем согласии с опытной

$$\Gamma_{(e^+ e^-)_{s=0} \rightarrow \gamma \gamma}^{\text{эксп}} = (0,797 \pm 0,011) \times 10^{10} \text{ сек}^{-1} \quad (25)$$

В разделе 4.3 развит аппарат (на основе изложенного в разделе (4.1)) с учетом спин-унитарной части ВФ η -мезона, рассматриваемого как кварконий с "включением" конституэнтных Δ -кварков.

Вычислены ширина распада $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ и относительные вероятности распадов $\eta \rightarrow \gamma e^+ e^-$ и $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$. Проведено сравнение КФФ $\tilde{F}_{\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-}(x)$ с отмеченным "dip"-эффектом при $x \cong 0,15$) с опытными данными.

Выполнены расчеты по предсказанию ширины радиационного распада $\eta_c \rightarrow \gamma \gamma$ и рождения η_c -мезона в столкновениях $e^+ e^-$ с использованием одновременной КХД - волновой функции для связанного $\bar{c}c$ -чармованного состояния при различных значениях конституэнтных масс c - кварков.

В разделе 4.4 получены точные формулы, позволяющие вычислить амплитуды распадов псевдоскалярных мезонов в два лептона типа $P \rightarrow \bar{\ell} \ell$. Вычисления основаны на точной КХД мотивированной формулировке теории связанного состояния для удерживающего потенциала (осцилляторного типа в виде обобщенной функции):

$$V_0(\vec{p}-\vec{p}') = -\frac{1}{4} (2\pi)^3 v_{qq}^2 \frac{\epsilon(\vec{p}) \epsilon(\vec{p}') \vec{\nabla}_{\vec{p}}^2 \delta^{(3)}(\vec{p}-\vec{p}')}{[\epsilon(\vec{p}) + m_q][2\epsilon(\vec{p})\epsilon(\vec{p}') - m_q^2]} \quad (26)$$

где $\epsilon(\vec{p}) = (\vec{p}^2 + m_q^2)^{1/2}$, $\epsilon(\vec{p}') = (\vec{p}'^2 + m_q^2)^{1/2}$

Анзац $v_{qq}^2 = m_q^2 \alpha_s \tilde{v}^2$ предполагает учет КХД свойств в ядре взаимодействия, отвечающего конфайнменту, при этом \tilde{v} принимает одинаковые значения для "легких" u -, d -, s -кварков, α_s - бегущая константа, зависящая от квадрата суммы масс, m , конституэнтных кварков:

$$\alpha_s [(m_i + m_j)^2] = \frac{12\pi}{33 - 2n_f} \left\{ \ln \left[\frac{(m_i + m_j)^2}{\Lambda_{\text{кхд}}^2} \right] \right\}^{-1} \quad (27)$$

Исследуется отношение вещественной части амплитуды распада к мнимой, $\text{Re } \tilde{R}(t) / \text{Im } \tilde{R}(t)$ (t - квадрат суммы импульсов конечных лептонов), характеризующее степень отклонения величины брэнчинга, β_L , распада $P \rightarrow \bar{\ell} \ell$ от его "унитарного" предела. Отметим, что из трех слагаемых, определяющих величину $\text{Re } \tilde{R}(t)$, первый модельнонезависимый член ответственен за кварк-адронную часть амплитуды, зависящую от одновременной ВФ мезона. Величина $\text{Re } \tilde{R}(t)$ вносит существенный вклад, сравнимый по абсолютной величине с "унитарной" частью, определяемой величиной

$$\text{Im } \tilde{R}(t) = -\frac{\pi}{2\beta_L^{(\ell)}} \ln \frac{1 + \beta_L^{(\ell)}}{1 - \beta_L^{(\ell)}}, \quad \beta_L^{(\ell)} = (1 - 4m_\ell^2/t)^{1/2} \quad (28)$$

в полную амплитуду в распадах $\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$, $\eta \rightarrow e^+ e^-$, $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Присутствуя для амплитуды распада, например, $\eta \rightarrow \bar{\ell} \ell$, логарифмическую зависимость от параметра обрезания Λ удается устранить при вычислениях, лишь рассмотрев разность между дисперсионными частями распадов $\eta \rightarrow e^+ e^-$ и $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

Проведен анализ и вычислены вероятности распадов K_L -мезонов в два лептона в рамках полюсной составной модели. В частности, двухфотонный полюсной $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ -распад определяется стандартным образом

$$\langle 0 | T [j_\mu^{\text{em}}(x) j_\nu^{\text{em}}(y)] | P \rangle \langle P | \mathcal{H}_w | K_L \rangle, \quad (29)$$

где $j_{\mu}^{em}(x)$ - электромагнитный ток, \mathcal{H}_w - феноменологический ток-токовый гамильтониан (хорошо известный при вычислениях диаграмм с K -мезонами). Вследствие полюсной доминантности амплитуда $F_{K_L}(q_0)$ перехода $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ аппроксимируется следующим образом

$$F_{K_L}(0,0) = \sum_{M: \pi^0, \eta, \eta'} \frac{\langle M | \mathcal{H}_w | K_L \rangle}{\Delta m_{K_L M}^2} F_M(0,0), \quad (30)$$

где $\Delta m_{K_L M}^2 = m_{K_L}^2 - m_M^2$, $M: \pi^0, \eta, \eta'$. $\langle M | \mathcal{H}_w | K_L \rangle$ - амплитуда перехода K_L -мезона в псевдоскалярные состояния M , $F_M(0,0)$ - двухфотонная амплитуда, соответствующая распаду $M \rightarrow \gamma\gamma$. Основной вклад в амплитуду распада $K_L \rightarrow \mu^+\mu^-$ вносит однополюсный член, соответствующий η -мезону. Проведенные вычисления хорошо согласуются с опытными данными.

В Заключении сформулированы основные результаты работ:

1. Получены модельные феноменологические потенциалы удержания частиц при условии интерпретации обменного поля как удовлетворяющего уравнению с производными не ниже четвертого порядка.

2. На основе диаграммной техники Кадышевского разработана в теории связанного состояния процедура выделения инвариантной вершинной функции, зависящей от относительного импульса двух частиц, находящихся в состояниях как с положительной, так и с отрицательной значениями энергии. Впервые последовательным способом получена связь между константой f_{π} распада $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$ и вершинной функцией.

3. Проведено сравнение трех возможных способов построения амплитуды распада $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$ в зависимости от двухчастичной амплитуды - волновой функции связанного состояния. Показана эффективность метода, основанного на одновременном подходе к КТП. При этом численная оценка постоянной распада f_{π} хорошо согласуется с имеющимися данными.

4. Впервые проведены численные оценки рождения лептон-антилептонных связанных ортосостояний, описываемых релятивистской волновой функцией, в распадах π^0 и η -мезонов на основе модели кварковых треугольных петель. Продемонстрировано хорошее согласие вычисленной вероятности распада $\pi^0 \rightarrow \gamma^*(e^+e^-)_{s=0}$ с опытными данными.

5. Впервые на основе одновременного подхода проведены исследования конверсионных далитц-распадов π^0 , η , η_c -мезонов и электродинамической связанной системы на примере пармония $(\mu^+\mu^-)_{s=0}$. Предсказана оригинальная особенность у соответствующих переходных формфакторов немоного поведения последних ("dip"-эффект) в области малых значений квадрата инвариантной массы пары лептон-антилептон.

6. В процессах конверсионных и лептонных распадов псевдоскалярных мезонов, а также при образовании (в результате распадов) ортопозитрония (или ортомония) устанавливается связь между формализмом КТП (диаграммы Фейнмана), одновременным подходом и диаграммной шпуррионной техникой.

7. Выполнены расчеты по предсказанию:

- ширины радиационного распада η_c -мезона на два γ -кванта и
- рождения η_c -мезона в e^+e^- -столкновениях в зависимости от величины массы конститuentного C -кварка, входящей в качестве параметра в КХД - волновую функцию для связанного $\bar{C}C$ -чармония.

8. Впервые получены точные модельно-зависимые формулы, позволяющие вычислять амплитуды распадов псевдоскалярных мезонов высших порядков типа $\rho \rightarrow \ell\ell$. Показано, что вещественная часть амплитуды распада вносит существенный вклад (наряду с "унитарной" частью) в полную амплитуду в случае распадов $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$, $\eta \rightarrow e^+e^-$, $\eta \rightarrow \mu^+\mu^-$.

9. Проведен анализ и вычислены вероятности лептонных распадов K_L -мезона на основе составной полюсной модели. Показано, что основной вклад в амплитуду $K_L \rightarrow \mu^+\mu^-$ распада вносит однополюсный η -мезонный член.

В Приложении приведены формальные соотношения между динамическими величинами, характеризующими кварконий как связанное состояние кварка и антикварка в четырехмерном и трехмерном релятивистском пространствах импульсов.

Работы, положенные в основу диссертации:

- G.A. Kozlov, S.P. Kuleshov, R.P. Zaikov. On linear quasipotential in the framework of quantum field theory. Preprint JINR E2-80-352 Dubna (1980).
- G.A. Kozlov. К вопросу о рождении связанных релятивистских лептонных состояний в распадах легких мезонов. ЯФ, 48 (1988) 265-271.
- G.A. Kozlov. О распаде $\pi \rightarrow \mu \bar{\nu}$ в релятивистской теории связанных состояний. Препринт ОИЯИ, P2-86-500 (1986).

4. G.A. Kozlov, S.P. Kuleshov, V.V. Sanadze, V.I. Savrin, N.B. Skachkov. On behaviour of the form factor of decay of the π^0 -meson into the dalitz-pair in the region of small invariant masses, *Z. Phys. C -Particles and Fields* 21 (1983) 63-68.
5. Г.А. Козлов, С.П. Кулешов, В.В. Санадзе, Н.Б. Скачков, В.И. Саврин О поведении фактора распада π^0 -мезона на далитц-пару в области малых инвариантных масс, Труды Международного семинара по проблемам физики высоких энергий и квантовой теории поля. Протвино, т. II (1983) III-126.
6. Г.А. Козлов, С.П. Кулешов, В.И. Саврин, В.В. Санадзе, Н.Б.Скачков О распаде связанного состояния J^+J^- -пары в e^+e^- -далитц-пару и γ - квант. ТМФ, 60 (1984) 24-36.
7. G.A. Kozlov, S.P. Kuleshov, V.I. Savrin, V.V. Sanadze, N.B. Skachkov. On the behaviour of form factors of decays of pseudoscalar systems $P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell$ in the region of small invariant masses of a lepton $\bar{\ell} \ell$ - pair. Preprint JINR, E2-84-256 (1984).
8. G.A. Kozlov, S.P. Kuleshov, V.V. Sanadze, V.I. Savrin, N.B. Skachkov. On special features in the behaviour of decay form factors of pseudoscalar systems $P \rightarrow \gamma \bar{\ell} \ell$ in the relativistic bound-state theory. Proceedings of the XVIII International Symposium, Ahrenshoop (1984) 68-76.
9. G.A. Kozlov, Yu. I. Ivanshin. Decay of a pseudoscalar meson into a lepton pair in a three-dimensional version of the bound state theory. Preprint JINR, E2-88-168 (1988).
- Ю.Г.А. Козлов. Распады η - и K_L -мезонов в лептонную пару: 3-мерная теория и феноменология. Препринт ОИЯИ, P2-89-86 (1989).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 1990 года.