

УДК 530.145

На правах рукописи

2-84-208

КРЕОПАЛОВ

Дмитрий Владиславович

МОДЕЛЬ КИРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ
С ЧЕТЫРЕХКВАРКОВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ
И РАСПАДА МЕЗОНОВ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований и в Московском
физико-техническом институте.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

М.К. Волков

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук
профессор

Б.А. Арбузов

Доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.П. Павлов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический
институт им. П.Н. Лебедева АН СССР г. Москва.

Автореферат разослан "___" _____ 1984 года

Защита диссертации состоится "___" _____ 1984 г.
на заседании Специализированного Совета К 047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических
наук

В.И. Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Несмотря на очевидные успехи квантовой хро-
модинамики в описании сильных взаимодействий адронов при высоких
энергиях, она пока не может дать хорошее количественное, а в неко-
торых случаях даже качественное объяснение физических процессов в
области низких энергий.

Известно, что в области низких энергий сильные взаимодействия
адронов вполне удовлетворительно описываются феноменологическими
киральными лагранжианами. Привлекательность метода феноменологи-
ческих лагранжианов заключается также в том, что в нем можно работать
непосредственно с физическими полями. Существование в феноменологи-
ческих лагранжианах, описывающих взаимодействия элементарных частиц,
симметрии относительно киральной группы позволяет надеяться на ус-
пешное описание физических процессов, связанных с сильными взаимо-
действиями.

Оказывается, рассмотрение относительно простых четырехфермион-
ных взаимодействий, обладающих киральной симметрией, позволяет ме-
тодом функционального интегрирования получать эффективные лагранжи-
аны, описывающие взаимодействие мезонов с кварками. Из эффективного
лагранжиана с четырехкварковыми взаимодействиями удается получить
значительно более сложные σ -модель, модель типа Янга-Миллса
для векторных и аксиально-векторных мезонов и модель векторной до-
минантности для электромагнитных взаимодействий. Одним из основных
достоинств модели с четырехкварковыми взаимодействиями является воз-
можность выразить многочисленные параметры, встречающиеся в пере-
численных выше моделях, через небольшое число параметров исходного
четырёхкваркового лагранжиана.

Таким образом, представляет интерес дальнейшее развитие и обоб-
щение модели с четырехкварковыми взаимодействиями. Механизм спон-
танного нарушения киральной симметрии приводит к переходу от токо-

ных кварков в исходном четырехкварковом лагранжиане к составляющим кваркам в эффективном мезонном лагранжиане и позволяет получать численные оценки для масс кварков. Эффективные сильные и электромагнитные лагранжианы, полученные в этой модели, с единой точки зрения описывают низкоэнергетическую физику мезонов во вполне удовлетворительном согласии с экспериментом.

Цель работы — построение четырехкварковой модели с глобальной $U(3)$ — симметрией, воспроизводящей динамику скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально-векторных мезонов; получение массовых формул для мезонов основного нонета; вывод уравнений, связывающих массы токовых кварков с массами составляющих кварков; описание сильных и электромагнитных распадов мезонов, вычисление поляризуемости заряженных и нейтральных пионов.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые построена модель с четырехкварковыми взаимодействиями для случая глобальной $U(3)$ — симметрии. При этом в секторе скалярных и псевдоскалярных мезонов эта модель воспроизводит σ — модель. В секторе векторных и аксиально-векторных мезонов получена модель типа Янга-Миллса, в секторе электромагнитных взаимодействий — модель векторной доминантности.

Впервые удалось связать однозначным образом массы составляющих и токовых кварков. При этом исследован механизм спонтанного нарушения киральной симметрии, связанный с переходом от токовых кварков в исходном четырехкварковом лагранжиане к составляющим кваркам в эффективном мезонном лагранжиане.

Утверждение о том, что фиктивные σ — частицы следует рассматривать как экспериментально обнаруженные резонансы, позволяет предсказывать массы некоторых скалярных резонансов, в частности плохо установленную в данное время массу ξ — резонанса.

Впервые показано, что модель с четырехкварковыми взаимодействиями в случае предельного перехода к нелинейной киральной модели дает результаты, совпадающие с ранее полученными с использованием нелинейных киральных лагранжианов. Этот факт свидетельствует о внутренней связи этих моделей и позволяет наглядно на уровне диаграмм показать устранение трудностей, имеющихся в нелинейных моделях с кварковыми петлями.

Впервые на основе построенной модели удалось описать процесс $\psi \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ в хорошем согласии с экспериментом, а также сделать предсказания относительно ряда процессов, не исследованных экспериментально.

Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. На основе четырехкварковых взаимодействий построены эффективные лагранжианы, позволяющие описывать сильные и электромагнитные взаимодействия скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально-векторных нонетов.

2. Получены массовые формулы для 36 сортов мезонов.

3. На основе предложенной модели с единой точки зрения описаны многочисленные распады мезонов, вычислена электромагнитная поляризуемость заряженных и нейтральных пионов.

4. Показано, что возникающие при рассмотрении четырехкварковых взаимодействий σ — частицы необходимо отождествлять с реальными скалярными резонансами ξ , ξ^* , σ и κ .

5. В результате введения спонтанного нарушения симметрии получены уравнения для масс кварков. Эти уравнения позволяют однозначным образом выразить массы составляющих кварков через массы токовых. Оценки на массы кварков согласуются со значениями для масс кварков, полученных из других моделей.

6. Учет разности масс u — и d — кварков позволил описать распады $\psi \rightarrow 3\pi$ и $\psi' \rightarrow 3\pi$.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах ФИАН им. П.Н. Лебедева, МИАН им. В.А. Стеклова, на семинарах ЛТФ ОИЯИ, в ИФВЭ (Протвино), на сессиях Академии наук (1982, 1983 г.г.), были представлены на Всесоюзном семинаре "Кварки-83" (Сухуми 1983 г.), на международной конференции "Структура адронов-83" (Чехословакия 1983 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано пять работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения, содержит 101 страницу машинописного текста, 17 рисунков, 2 таблицы. Список литературы включает 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются общие принципы построения моделей, основанных на четырехфермионном взаимодействии. Сформулирована основная цель диссертации: построение на основе четырехкварковой модели с $U(3)$ — симметрией феноменологических мезонных лагранжианов и описание распадов мезонов основного нонета. Рассмотрена общая структура диссертации.

Первая глава посвящена получению феноменологических лагранжианов, описывающих сильные взаимодействия скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально-векторных мезонных нонетов.

Исходный четырехкварковый лагранжиан берется в виде:

$$\mathcal{L}(q, \bar{q}) = \bar{q} \{ i \not{\partial} - M_0 \} q + \frac{G_1}{2} [(\bar{q} \lambda_\alpha q)^2 + (\bar{q} i \gamma_5 \lambda_\alpha q)^2] - \frac{G_2}{2} [(\bar{q} \gamma_\mu \lambda_\alpha q)^2 + (\bar{q} \gamma_\mu \gamma_5 \lambda_\alpha q)^2]$$

Здесь $\bar{q} = (\bar{u}, \bar{d}, \bar{s})$ - поля кварков;
 λ_α - матрицы Гелл-Манна;
 $M_0 = \begin{pmatrix} m_u & & \\ & m_d & \\ & & m_s \end{pmatrix}$, m_u, m_d, m_s - токовые массы u -, d -, s -кварков.

Вводя мезонные поля, методом функционального интегрирования можно линеаризовать $\mathcal{L}(q, \bar{q})$ и получить эффективный мезонный лагранжиан, не зависящий от кварковых полей.

$$\mathcal{L}'(\sigma, \varphi, V, A) = -\frac{1}{2G_1} (\sigma_\alpha^2 + \varphi_\alpha^2) + \frac{1}{2G_2} (V_\alpha^2 + A_\alpha^2) - i T_2 \ln \left\{ 1 + \frac{1}{i \not{\partial} - m_u} [\sigma' + i \gamma_5 \varphi + V + \gamma_5 A] \right\} \quad (\alpha \equiv \lambda_\alpha a_\alpha)$$

Здесь $\sigma_\alpha, \varphi_\alpha, V_\alpha, A_\alpha$ - поля скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально-векторных мезонов.

σ' связано с σ преобразованием, учитывающим спонтанное нарушение киральной симметрии. В результате массы токовых кварков m_u, m_d, m_s заменяются на массы составляющих кварков m_u, m_d, m_s .

В этом подходе мезоны рассматриваются как составные двухкварковые системы. Взаимодействие мезонов друг с другом происходит через кварковые петли. При построении мезонных лагранжианов рассматривается однопетлевое приближение с петлями расходящегося типа. Расходящиеся интегралы регуляризуются обрезанием на верхнем пределе и затем устраняются из кинетических членов перенормировкой мезонных полей. Эти перенормировки полностью определяют силу взаимодействия мезонов друг с другом. Все феноменологические вершины, описывающие сильные взаимодействия выражаются через одну вершину g_f , описывающую распад $\rho \rightarrow 2\pi$. Получены массовые формулы для мезонных нонетов, которые находятся в качественном согласии с экспериментом.

Окончательный лагранжиан, описывающий σ - модель для скалярных и псевдоскалярных частиц и модель типа Янга-Миллса для векторных и аксиально-векторных частиц, выглядит следующим образом:

$$\mathcal{L}(\sigma, \varphi, V, A) = -\frac{g^2}{4} T_2 \left\{ \left[\left(\sigma - \frac{M}{g} \right)^2 + \varphi^2 \right]^2 - \left[\left(\sigma - \frac{M}{g} \right), \varphi \right]^2 \right\} - \frac{1}{8} T_2 (G_V^{\mu\nu} G_{V\mu\nu}) - \frac{1}{8} T_2 (G_A^{\mu\nu} G_{A\mu\nu}) - \frac{1}{4} T_2 \left[D_\mu \left(\sigma - \frac{M}{g} \right) + \frac{g_f}{2} \{ A_\mu, \varphi \} \right]^2 + \frac{1}{4} T_2 \left[D_\mu \varphi - \frac{g_f}{2} \{ A_\mu, \left(\sigma - \frac{M}{g} \right) \} \right]^2$$

Здесь $M = \begin{pmatrix} m_u & & \\ & m_d & \\ & & m_s \end{pmatrix}$, $g_f = \sqrt{6} g$,

$$G_V^{\mu\nu} = \partial_\mu V^\nu - \partial_\nu V^\mu - i \frac{g_f}{2} ([V^\mu, V^\nu] + [A^\mu, A^\nu]),$$

$$G_A^{\mu\nu} = \partial_\mu A^\nu - \partial_\nu A^\mu - i \frac{g_f}{2} ([A^\mu, V^\nu] + [V^\mu, A^\nu]),$$

$$D_\mu a = \partial_\mu a - i \frac{g_f}{2} [V, a]$$

Вторая глава посвящена исследованию взаимодействий фотонов с мезонами и кварками. Фотоны рассматриваются как частицы, не имеющие внутренней структуры, поэтому для них кинетический член в исходный четырехкварковый лагранжиан вводится независимо, в отличие от мезонов, для которых кинетические члены появляются в результате рассмотрения расходящихся собственно энергетических диаграмм.

Электромагнитное взаимодействие в четырехкварковой модели вводится градиентно-инвариантным способом. В результате получается модель, описывающая векторную доминантность. Взаимодействие фотонов с заряженными мезонами происходит только через ω -, ρ^0 -, φ -мезоны. Лагранжиан электромагнитного взаимодействия имеет вид

$$\mathcal{L}_{em}^{\Delta H} = \frac{e}{g_f} \left[m_\rho^2 \left(\rho_\mu^0 + \frac{\omega_\mu}{3} \right) + \frac{\sqrt{2}}{3} m_\varphi^2 \varphi_\mu \right] A_\mu,$$

где e - электромагнитный заряд;

A_μ - фотонное поле;
 ρ^0, ω, φ - поля ρ^0, ω, φ - мезонов.

Общий лагранжиан остается градиентно-инвариантным.

В третьей главе рассмотрены примеры применения полученных лагранжианов для описания сильных и электромагнитных распадов мезонов, вычисления электрической поляризуемости заряженных и нейтральных пионов. Проводится сравнение с экспериментом. При рассмотрении физических процессов предполагается, что роль фиктивных σ - частиц, возникших в старом варианте σ - модели, играют реальные ϵ^- , ϵ^+ , δ - резонансы. Это предположение позволяет описать распад $\eta \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ в хорошем согласии с экспериментом.

С точки зрения методов вычисления в построенной модели все распады делятся на две категории. К первой категории относятся распады, идущие через сходящиеся кварковые петли. Ширины этих распадов не зависят от величины массы составляющих кварков (таблица I). Ко второй категории относятся распады, идущие через расходящиеся кварковые петли. При вычислении ширины этих распадов используются эффективные вершины полученных феноменологических лагранжианов. Результаты вычислений приведены в таблице II. Для электрической поляризуемости заряженных пионов получены следующие значения при двух возможных значениях массы ϵ - резонанса: модельного $m_\epsilon \approx 500$ МэВ и экспериментального $m_\epsilon \approx 700$ МэВ.

$$\alpha_{\pi^\pm} = 7 \cdot 10^{-3} (\text{фм})^3, \text{ если } \epsilon (500);$$

$$\alpha_{\pi^\pm} = 4 \cdot 10^{-3} (\text{фм})^3, \text{ если } \epsilon (700).$$

Эксперимент: $\alpha_{\pi^\pm} = (8,5 \pm 1,8 \pm 2,0) \cdot 10^{-3} (\text{фм})^3$

Для нейтральных пионов получаются следующие значения:

$$\alpha_{\pi^0} = -0,5 \cdot 10^{-3} (\text{фм})^3, \text{ если } \epsilon (500);$$

$$\alpha_{\pi^0} = -3 \cdot 10^{-3} (\text{фм})^3, \text{ если } \epsilon (700).$$

Таблица I

Распады	Теория (КэВ)	Эксперимент (КэВ)
$\eta \rightarrow \gamma \gamma$	0,38	$0,32 \pm 0,05$
$\eta' \rightarrow \gamma \gamma$	5,8	$5,32 \pm 0,56$
$\eta' \rightarrow \rho \gamma$	97	$83,4 \pm 4,5$
$\eta' \rightarrow \omega \gamma$	9,8	$7,8 \pm 1,4$
$\rho \rightarrow \eta \gamma$	54	55 ± 14
$\varphi \rightarrow \eta \gamma$	45	63 ± 8
$\delta \rightarrow \gamma \gamma$	1,3	Экспериментальных
$\delta^* \rightarrow \gamma \gamma$	0,06	данных нет
$\epsilon \rightarrow \gamma \gamma$	0,47 ϵ (500)	
$\epsilon \rightarrow \gamma \gamma$	1,3 ϵ (700)	

Таблица II

Распады	Теория	Эксперимент
$\epsilon \rightarrow \pi \pi$	300 МэВ ϵ (500)	300-400 МэВ
$\epsilon \rightarrow \pi \pi$	180 МэВ ϵ (700)	
$\delta^* \rightarrow \pi \pi$	26 МэВ	$(25,7 \pm 1)$ МэВ
$\delta \rightarrow \eta \pi$	40 МэВ	(54 ± 7) МэВ
$\eta \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$	0,98 эВ	$(0,81 \pm 0,22)$ эВ
$\eta \rightarrow 3\pi^0$	0,27 КэВ	$(0,25 \pm 0,04)$ КэВ
$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	0,16 КэВ	$(0,20 \pm 0,03)$ КэВ
$\eta' \rightarrow 3\pi^0$	2,6 КэВ	Экспериментальных
$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	1,7 КэВ	данных нет
$\eta' \rightarrow \eta \pi \pi$	360 КэВ	(183 ± 65) КэВ

Четвертая глава посвящена подробному исследованию σ -модели, в которой учтены нарушающие также изотопическую инвариантность массовые члены, соответствующие массам кварков $m_u \neq m_d \neq m_s$. Выведены уравнения, связывающие массы токовых и составляющих кварков. На основе распада $\eta \rightarrow 3\pi^0$ фиксируется разность масс составляющих u - и d -кварков и даются оценки значений как составляющих так и токовых u -, d -, s' -кварков.

$$m_u^c = 3,8 \text{ МэВ}, \quad m_d^c = 5,1 \text{ МэВ}, \quad m_s^c = 160 \text{ МэВ},$$

$$m_u = 237,5 \text{ МэВ}, \quad m_d = 242,5 \text{ МэВ}, \quad m_s = 476 \text{ МэВ}.$$

Обсуждаются массовые формулы, выведенные с учетом $m_u \neq m_d \neq m_s$. Получены формулы, связывающие разность масс заряженных и нейтральных π - и K -мезонов. Рассмотрен случай, когда нарушается соотношение $g_p = \sqrt{6}g$, полученное в I главе, и показано, как это влияет на величины ширин распадов, рассмотренных в предыдущих главах. В частности, при этом улучшается предсказание для ширины распада $\eta' \rightarrow \eta \pi \pi$: $\Gamma_{\eta' \rightarrow \eta \pi \pi} = 240 \text{ КэВ}$.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении приводится вывод формул, необходимых для вычисления ширины распада $\eta \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$.

Основные результаты, полученные в диссертации:

I. Получены мезонные лагранжианы взаимодействия скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиально-векторных полей. В этом подходе все мезоны являются составными двухкварковыми системами. Вначале исследуется случай, когда массы u - и d -кварков считаются равными в отличие от массы s' -кварка. ($m_u = m_d \neq m_s'$). При этом получении в секторе скалярных и псевдоскалярных полей σ -модель и в секторе векторных и аксиально-векторных полей модель типа Янга-Миллса содержат минимальное число произвольных параметров, которые фиксируются по ширине распада $\rho \rightarrow 2\pi$. Выведены также лагранжианы смешанного взаимодействия векторных и аксиально-векторных мезонов со скалярными и псевдоскалярными мезонами.

2. Показано, что введение градиентно-инвариантным образом в исходный четырехкварковый лагранжиан электромагнитного взаимодействия приводит к модели векторной доминантности для случая $U(3)$ -симметрии. Фотоны в построенной модели могут взаимодействовать с

кварками и заряженными мезонами только через ω -, ρ^0 - и γ -мезоны.

3. Вычислены ширины сильных и электромагнитных распадов мезонов, описываемые с помощью полученных лагранжианов. Вычислена электромагнитная поляризуемость пионов. Показано, что в предельном переходе от построенной линейной σ -модели к нелинейной, результаты, полученные при описании рассмотренных процессов в четырехкварковой модели, переходят в результаты нелинейной киральной модели.

4. Построена обобщенная σ -модель, в которой все массы u -, d -, s' -кварков считаются различными ($m_u \neq m_d \neq m_s'$). Получены массовые формулы для 36 сортов мезонов. Получены формулы, связывающие разность масс заряженных и нейтральных π - и K -мезонов. На основе построенных лагранжианов описаны в удвоительном согласии с экспериментом распады $\eta \rightarrow 3\pi$, $\eta' \rightarrow 3\pi$, $\eta' \rightarrow \eta \pi \pi$. Рассмотрен случай $g_p \neq \sqrt{6}g$ и показано, как это влияет на величины ширин распадов, полученных с учетом $g_p = \sqrt{6}g$.

5. Выведены уравнения для масс кварков, позволяющие однозначным образом связать массы токовых кварков с массами составляющих кварков. Получены численные оценки на величины масс токовых и составляющих кварков.

6. Учет вместо фиктивных σ -частиц реальных ϵ -, $\rho^{\prime\prime}$ - и δ -резонансов позволил описать в хорошем согласии с экспериментом процесс $\eta \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$, а также сделать предсказания относительно массы ϵ -резонанса.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Волков М.К., Креопалов Д.В., Кварковые петли в киральных лагранжианах и векторные мезоны. Сообщение ОИЯИ, P4-8I-697. Дубна, 1981.
2. Волков М.К., Креопалов Д.В. Поляризуемость пионов в кварковой модели с учетом скалярных и векторных резонансов. Сообщение ОИЯИ, P2-82-476, Дубна, 1981.

3. Волков М.К., Креопалов Д.В., Распад $\psi \rightarrow \rho^0 \gamma$ в модели мезонов с кварковыми петлями., ЯФ, 1983, т.37, с.1297-1302.
4. Волков М.К., Креопалов Д.В., Мезонные лагранжианы группы $U(3)$ в модели с четырехкварковыми взаимодействиями, ТМФ, 1983, т.57, с.21-34.
5. Волков М.К., Креопалов Д.В., Массы токовых и составляющих кварков в модели с четырехкварковыми взаимодействиями., ЯФ, 1984, т.39, с.924-931.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1984 года.