

530.1
А-18

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПО ИЗУЧЕНИЮ
СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ И ВАКУУМА

На правах рукописи

УДК 530.145

АВАКИН Елена Зиновьевна

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЗОНОВ С УЧЕТОМ
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СКАЛЯРНЫХ СОСТОЯНИЙ В МОДЕЛИ КОНФАЙН-
МИРОВАННЫХ КВАРКОВ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая и
математическая физика

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1989

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

I. Актуальность темы

Проблема описания низкоэнергетических взаимодействий адронов остается одной из актуальных проблем физики элементарных частиц. В настоящее время прилагаются значительные усилия для того, чтобы получить описание низкоэнергетической адронной физики, исходя из фундаментальных представлений КХД. Основная трудность при этом заключается в том, что теория возмущений КХД, основанная на асимптотической свободе, оказывается неприменимой при низких энергиях. Наряду с этим, неясным остаются два вопроса: адронизация, т.е. возникновение бесцветных адронов в результате кварк-глюонного взаимодействия и конфайнмент, т.е. отсутствие кварков и глюонов в наблюдаемом спектре.

В настоящее время существует целый ряд феноменологических и полупеноменологических подходов к описанию взаимодействия адронов в области конфайнмента (на расстояниях $0,3-1$ фм), значительное развитие получили кварковые модели.

Модель конфайнированных кварков, предложенная Г.В.Ефимовым и М.А.Ивановым, основана на определенных предположениях о механизме адронизации и конфайнмента. Адроны рассматриваются как коллективные возбуждения, возникающие в результате кварк-глюонного взаимодействия. Предполагается, что вакуум глюонных полей КХД обеспечивает конфайнмент кварков и глюонов. Для математической реализации этой картины на языке матрицы рассеяния адронов в МКК сделаны определенные предположения о механизме конфайнмента, как усреднении кварковых диаграмм по глюонному вакууму, и о механизме адронизации кварков, как переходе к коллективным переменным в лагранжиане КХД. Модель позволяет описать проявление кварковой структуры адронов в низкоэнергетических процессах. Существенно, что в МКК возможно вычислить не только структурные константы, характеризующие адронные взаимодействия (ширины расщепов, магнитные моменты), но и предсказать импульсную зависимость матричных элементов (радиусы, электромагнитные и сильные формфакторы).

Интересным является вопрос о роли промежуточных состояний в низкоэнергетической физике. Ярким примером того, насколько плодотворным оказывается учет промежуточных состояний, является модель

векторной доминантности, известен вклад аксиальных мезонов в низкоэнергетическую физику адронов. Феноменологический анализ и модельное рассмотрение $\pi\pi$, πN , NN - рассеяний, $K \rightarrow \pi\pi$, $K \rightarrow \gamma\gamma$ распадов указывает на важность учета промежуточных скалярных состояний.

Изучение взаимодействия адронов с электромагнитным полем позволяет получить дополнительную информацию о внутренней структуре адронов. К указанным процессам относится комптоновское рассеяние γ -квантов π -мезонами. Связанные с этим процессом коэффициенты электрической и магнитной поляризуемости весьма чувствительны к выбору модели сильных взаимодействий.

Изучение слабого взаимодействия процессов с участием странных кварков является интересной задачей, поскольку мир странных мезонов чрезвычайно богат нетривиальными физическими эффектами. Наибольший интерес среди них представляет нелептонное взаимодействие кеонов, которое ставит перед стандартной моделью ряд проблем, среди которых выделим следующие:

1. Вычисление амплитуд распадов $K \rightarrow 2\pi$. Эмпирическое правило $\Delta I = 1/2$, состоящее в том, что амплитуды распадов, в которых изоспин I изменяется на $1/2 \approx$ в 20 раз больше, чем амплитуды распадов с $\Delta I = 3/2$, до сих пор не имеет полного теоретического объяснения.

2. Вычисление разности масс $K_1^0 - K_2^0$ мезонов. Экспериментальное значение $\Delta m_{K_1,2}$ оказывается несколько большим, чем предсказывается стандартной моделью.

Однако, нельзя с уверенностью утверждать, что указанные проблемы свидетельствуют в пользу "новой физики", выходящей за рамки стандартной модели, поскольку существует ряд неопределенностей, связанных с вычислением адронных матричных элементов. Кроме того, возможно, что существенную роль в указанных процессах играют промежуточные состояния, хотя по этому поводу нет единого мнения. Таким образом, представляется интересным рассмотреть всю совокупность нелептонных процессов в рамках единой теоретической схемы, описывающей поведение кварков в области конфайнмента.

В модели конфайнированных кварков изучаются низкоэнергетические взаимодействия. Известно, что в 60-70 гг на основе использования алгебры токов, МВД, гипотезы ЧСАТ был получен ряд соотношений между константами адронных процессов. В МКК, являющейся, по сути, низкоэнергетическим пределом КХД, должны выполняться упомянутые соотношения.

2. Цель работы

Целью данной работы является изучение роли промежуточных 0^{++} состояний в пионных и каонных процессах в МКК.

Ставится задача:

1. Изучение основных распадов скалярных мезонов
2. Получение длин $\pi\pi$ -взаимодействия и времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома
3. Изучение комптон-эффекта на π^- -мезоне (вычисление поляризуемостей пионов)
4. Изучение нелептонных и электромагнитных распадов каонов
5. $K^0 - \bar{K}^0$ переход и вычисление разности масс $K_1^0 - K_2^0$ мезонов.

3. Научная новизна работы

В рамках МКК построен лагранжиан взаимодействия скалярных мезонов с кварками. В рамках построенного лагранжиана предсказываются массы и ширины сильных и электромагнитных распадов \mathcal{E} -мезона. Рассмотрен процесс $\pi\gamma \rightarrow \pi\gamma$ с учетом промежуточных 0^{++} мезонов и сделан предсказательный расчет электрической и магнитной поляризуемостей π^0 -мезонов; показано, что учет промежуточного $\mathcal{E}(600)$ является решающим при объяснении правила $\Delta I=1/2$. Выяснен существенный вклад промежуточных состояний в матричный элемент $K^0 - \bar{K}^0$ перехода. Расчеты, проведенные в рамках МКК свидетельствуют в пользу того, что по-видимому, скалярные мезоны не являются обычными двухкварковыми состояниями.

4. Апробация результатов. Результаты работы докладывались на УШ Международном совещании в Алуште (октябрь 1987 г.), на совещании "Инфракрасное поведение КХД" в Тбилиси (май 1988 г.) на семинарах в ЛТФ ОИЯИ, кафедры теоретической физики ТамГУ.

5. Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 работы.

6. Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и двух приложений. Текст работы изложен на 116 страницах. В диссертации содержится 19 таблиц, 18 рисунков. Список литературы составляет 129 наименований.

П. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сделан краткий обзор основных подходов к описанию взаимодействий адронов, сформулированы цель и основные задачи диссертации, а также приведены структура и краткое содержание работы.

I глава "Модель конфайнмированных кварков и низкоэнергетические соотношения"

В § I изложены основные положения МКК, приведены лагранжианы взаимодействия псевдоскалярных, векторных и аксиально векторных мезонов с кварками, которые выбраны в простейшем виде без производных.

В § 2 показано, что Ansatz конфайнмента, принятый в МКК, дает калибровочно-инвариантные выражения на каждом этапе вычислений, но приводит к нарушению киральной симметрии, мерой нарушения которой служит размерный параметр модели Λ_f , характеризующий область конфайнмента кварков с ароматом f . Оказалось, что требование выполнения феноменологических тождеств Уорда накладывает дополнительные ограничения на параметры модели, характеризующие форму функций конфайнмента.

§ 3 посвящен фиту параметров модели, характеризующих форму функций конфайнмента, а также размерных параметров, характеризующих область конфайнмента нестранных и странных кварков. Фит указанных параметров проведен по экспериментальным значениям констант основных низкоэнергетических процессов с учетом соотношений, необходимых для выполнения феноменологических тождеств Уорда. Для фита параметров использовались экспериментальные значения констант распадов: $\pi \rightarrow \mu\nu$, $\pi \rightarrow \gamma\gamma$, $\omega \rightarrow \pi\gamma$, $\rho \rightarrow \pi\pi$, $\rho \rightarrow \gamma$ - перехода. Фит параметра, характеризующего область конфайнмента S -кварка, проведен по экспериментальным значениям констант следующих распадов: $K \rightarrow \mu\nu$, $K^* \rightarrow \mu\gamma$, $K^* \rightarrow K\pi$, $\varphi \rightarrow K\bar{K}$, $\varphi \rightarrow \gamma$ - перехода. В данном параграфе также показано, что при нулевых массах адронов $m_b = 0$ в МКК с 5-10% точностью воспроизводится ряд соотношений, лежащих в основе феноменологических подходов к низкоэнергетическим адронным процессам: соотношения Голдбергера-Треймана, Кавараями-Сузуки-Риззуддине-Фаязуддине, ρ - универсальность, соотношение между f_π и $g_{\pi\gamma\gamma}$, следующие из ЧСАТ.

В § 4 вычислены электромагнитные распады кеонов.

В § 5 рассмотрен распад K_{e_3} . Показано, что в МКК с 10% точностью выполняется известное соотношение Кэллена-Треймана-Матюра-Окубо-Пендита для формфакторов указанного распада.

Глава II. "Роль скалярных мезонов в $\pi\pi$ -взаимодействии"

Глава посвящена изучению роли скалярных мезонов в пионных процессах.

В § 1 проведен краткий обзор работ, посвященных статусу скалярных мезонов. Приведены экспериментальные данные об известных скалярных мезонах.

В § 2 построен лагранжиан взаимодействия скалярных мезонов с кварками в МКК. Проблема состоит в том, что простейшая двух кварковая схема без производных в случае 0^{++} мезонов приводит к нефизическому поведению матричного элемента распада $S \rightarrow PP$. В данной работе указанная трудность преодолена введением дополнительного члена с производной в лагранжиан взаимодействия.

Дополнительные параметры, характеризующие скалярные мезоны в МКК зафиксированы в § 3. Параметр H , входящий в лагранжиан, угол смешивания скалярных мезонов δ_s и масса ϵ -мезона определены из условия согласованности Адлера и экспериментального значения ширины распада $f_0(980) \rightarrow \pi\pi$. Параметры, характеризующие скалярные мезоны в МКК зафиксированы следующим образом: $H=0,55$; $\delta_s=17^\circ$; $m_\epsilon=600$ МэВ.

§ 4 посвящен изучению сильных и электромагнитных распадов скалярных мезонов. Ширины указанных процессов, вычисленные в МКК при использовании зафиксированных в предыдущем параграфе значений, приведены в таблице I. Из таблицы I видно, что для измеренных распадов имеется неплохое согласие с экспериментальными данными.

Таблица I

Распад	$f_0(980) \rightarrow \pi\pi$	$G_0(975) \rightarrow \pi\eta$	$\epsilon(600) \rightarrow \pi\pi$	$f_0(980) \rightarrow \gamma\gamma$	$G_0(975) \rightarrow \gamma\gamma$	$\epsilon(600) \rightarrow \gamma\gamma$
Эксперимент	26 ± 5 МэВ	54 ± 7 МэВ	-	0,8 КэВ	$0,19 \pm 0,07$	$^{+0,1}_{-0,07}$
МКК	22 МэВ	56 МэВ	356 МэВ	0,37 КэВ	0,43 КэВ	0,33 КэВ

В § 5 изучен комптон-эффект на π -мезоне, а именно, вычислены электрическая (α_{π}) и магнитная (β_{π}) поляризуемости π^{\pm} и π^0 -мезонов. Учен вклад промежуточных скалярных, векторных и аксиально-векторных мезонов в α_{π} и β_{π} . Оказалось, что основную роль в изученном процессе играют промежуточные скалярные состояния. Полученные значения

$$\begin{aligned} \alpha_{\pi^{\pm}} &= 5,77 \cdot 10^{-43} \text{ см}^3 & \beta_{\pi^{\pm}} &= -5,56 \cdot 10^{-43} \text{ см}^3 \\ \alpha_{\pi^0} &= -1,06 \cdot 10^{-43} \text{ см}^3 & \beta_{\pi^0} &= 2,8 \cdot 10^{-43} \text{ см}^3 \end{aligned}$$

хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными и не противоречат результатам других подходов.

§ 6 представляет собой сводку результатов, полученных в данной главе и содержит вывод о существенной роли скалярных мезонов в $\pi\pi$ -взаимодействии.

Глава III. "Нелептонные распады K-мезонов"

Главе посвящена изучению нелептонных взаимодействий кеонов с использованием эффективных гамильтонианов слабого взаимодействия.

В § 1 обоснована актуальность изучения нелептонных распадов.

В § 2 подробно рассмотрены эффективные гамильтонианы слабого взаимодействия. Указанные гамильтонианы, полученные в модели Вайнберга-Саламе с учетом глюонных поправок, представляют собой линейную комбинацию четырех-кварковых операторов. Числовые коэффициенты при операторах не определены однозначно. Они зависят от КХД параметров α_s , μ , Λ_{QCD} и масс тяжелых кварков. Выбор конкретного набора коэффициентов составляет одну из задач главы. Вторая проблема, решаемая в III главе диссертации - проблема вычисления матричных элементов от четырехкварковых операторов.

§ 3 представляет собой обзор основных подходов таких как метод вакуумного прокладывания, модель мешков и другие кварковые модели, дисперсионные методы, $1/N_c$ - разложение и т.д., к вычислению матричных элементов от упомянутых выше четырехкварковых операторов. Следует подчеркнуть, что для получения результатов, в рамках того или иного подхода, обычно привлекаются дополнительные предположения и вводятся дополнительные феноменологические параметры.

Матричные элементы распадов $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ вычислены в § 4. В данном параграфе приведены диаграммы перечисленных процессов и вычислены соответствующие мат-

ричные элементы. Матричный элемент распада $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, в котором изоспин I изменяется на $I/2$, вычислен с учетом диаграмм с промежуточными скалярными мезонами. При вычислении матричного элемента электромагнитного распада $K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma$ учтены диаграммы с промежуточными псевдоскалярными мезонами.

В § 5 проводится фитирование набора коэффициентов C_i , входящих в эффективный гамильтониан слабого взаимодействия, по экспериментальным значениям ширин распадов $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$. Зафиксированный таким образом набор коэффициентов приведен в таблице 2.

Таблица 2

Параметры		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
μ	α_s					
0,25 ГэВ	$\alpha_s = 0,45$	-1,97	0,12	0,093	0,47	-0,036

Полученные при этом значения ширин указанных распадов приведены в таблице 3.

Таблица 3

	$\Gamma(K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ $10^{-15}, \text{ГэВ}$	$\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0)$ $10^{-17}, \text{ГэВ}$	$\Gamma(K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma)$ $10^{-21}, \text{ГэВ}$	$\Gamma(K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma)$ $10^{-20}, \text{ГэВ}$	$\Delta m_{1,2}$ $10^{-15}, \text{ГэВ}$
Эксперимент	$5,06 \pm 0,03$	$1,13 \pm 0,01$	$7,68 \pm 0,21$	$1,84 \pm 0,92$	$3,52 \pm 0,014$
МКК	5,38	1,24	7,18	1,53	3,25

Оказалось, что экспериментально наблюдаемое усиление амплитуд с $\Delta I=1/2$ по сравнению с амплитудами с $\Delta I=3/2$ в МКК может быть объяснено вкладом промежуточных скалярных мезонов, который составляет $\approx 75\%$ в случае распада $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

В § 6 рассматривается распад $K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma$. В данном параграфе проведен краткий обзор подходов к описанию указанного процесса. В МКК амплитуде распада $K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma$ целиком определяется диаграммами с промежуточными скалярными состояниями. Значение $\Gamma(K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma)$ приведенное в таблице 3, получено при использовании зафиксированных в предыдущем параграфе значений параметров μ , α_s и C_i (см. таблицу 2). Значение $\Gamma(K_s^0 \rightarrow \gamma \gamma)$ хорошо согласуется с недавно полученными экспериментальными данными.

В § 7 изучается переход $K^0 - \bar{K}^0$ с $\Delta S = 2$ и вычислена связанная с ним разность масс $K_L^0 - K_S^0$ мезонов. При изучении указанного перехода необходимо ответить на два вопроса:

а) О величине матричного элемента от четырехкваркового оператора с $\Delta S = 2$. Обычно, полученное значение $\langle \bar{K}^0 | O^{\Delta S=2} | K^0 \rangle$ сравнивают со значением данного матричного элемента, полученным методом вакуумного прокладывания с помощью параметра

$$B = \langle \bar{K}^0 | O^{\Delta S=2} | K^0 \rangle / \langle \bar{K}^0 | O^{\Delta S=2} | K^0 \rangle_{vac}$$

В МКК $B=1$. Оказалось, что вклад эффективного гамильтониана слабого взаимодействия с $\Delta S = 2$ в разность масс $K_L^0 - K_S^0$ мезонов составляет $\approx 58\%$.

б) Второй вопрос - вопрос о вкладе промежуточных состояний в амплитуду $K^0 - \bar{K}^0$ переходе. В данной работе учтен вклад псевдоскалярных, скалярных, аксиальных векторных промежуточных состояний в упомянутую амплитуду. Оказалось, что основной вклад дает псевдоскалярные и скалярные мезоны. Полученное значение разности масс $K_L^0 - K_S^0$ мезонов с учетом вклада как "малых", так и "больших" расстояний приведено в таблице 3.

В § 8 приведены результаты и сформулированы выводы, полученные в главе III.

В приложении А приведена техника вычисления двух- и трехчастичных кварковых диаграмм.

Приложение Б содержит формулы, связывающие коэффициенты, входящие в эффективный гамильтониан с $\Delta S = 1$, $\Delta S = 2$ с параметрами КХД μ и α_s . Здесь же приведен набор операторов Q_i , используемых в ряде подходов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. В рамках МКК построен лагранжиан взаимодействия скалярных мезонов с кварками. Оказалось, что для адекватного описания 0^{++} состояний в двухкварковой схеме в МКК необходимо ввести в лагранжиан дополнительное взаимодействие с производной. Зафиксированы дополнительные параметры, характеризующие скалярные мезоны.

2. Изучены основные распады скалярных мезонов. Значения ширины электромагнитных и сильных распадов $a_0(975)$ и $f_0(980)$ мезонов, вычисленные в МКК, не противоречат экспериментальным данным. Проведены предсказательные расчеты ширины сильных и электромагнитных распадов $\phi(600)$ -мезона.

3. Рассмотрен комптон-эффект на \mathcal{K} -мезоне. Выяснена решающая роль промежуточного скалярного $\mathcal{E}(600)$ -мезона в описании данного процесса. Полученное с учетом вклада $\mathcal{E}(600)$ -мезона значение электрической поляризуемости заряженного пиона достаточно близко к экспериментальному. Вычислены электрическая и магнитная поляризуемости нейтрального \mathcal{K}^0 -мезона.

4. Нелептонные и электромагнитные распады K -мезонов рассмотрены в рамках МКК с использованием эффективного гамильтониана слабого взаимодействия кварков с $\Delta S=1$. Показано, что экспериментально наблюдаемое усиление амплитуд с $\Delta I=1/2$ может быть объяснено вкладом промежуточного скалярного $\mathcal{E}(600)$ -мезона. Вклад промежуточных скалярных состояний геликом определяет амплитуду распада $K_S^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Полученные значения ширины распадов $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$, $K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $K_S^0 \rightarrow \gamma\gamma$ находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

5. Разность масс $K_L^0 - K_S^0$ мезонов получена в МКК с использованием эффективного гамильтониана слабого взаимодействия с $\Delta S=2$ и с учетом вклада промежуточных состояний. Оказалось, что скалярные и псевдоскалярные промежуточные мезоны вносят 40% вклад в Δm_{12} . Численное значение разности масс $K_L^0 - K_S^0$ мезонов достаточно близко к экспериментальному.

6. Показано, что в пределе нулевых масс адронов в модели конфайнмированных кварков с 5-10% точностью воспроизводятся основные низкоэнергетические соотношения: Голдбергера-Треймана, Кавараяши-Сузуки-Риззудина-Фаязудина, Калана-Треймана-Маттура-Окубо-Пандита, ρ -универсальности.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в следующих работах:

1. Avakyan E.Z., Avakyan S.L., Efimov G.V., Ivanov M.A. Nonleptonic Decays of K -mesons.-Dubna:JINR, 1987.- E2-87-630.- 24 p.
2. Avakyan E.Z., Avakyan S.L., Efimov G.V., Ivanov M.A. Polarizability of \mathcal{K} -mesons in the Quark Confinement model.- Dubna: JINR, 1988.- E2-88-549.- 16 p. (ЯФ, т. 49. 1989 г.)
3. Avakyan E.Z., Avakyan S.L., Efimov G.V., Ivanov M.A. The $K_L^0 - K_S^0$ meson mass Difference.- Dubna: JINR, 1988.- E2-88-548.- 6 p.
4. Авакян Е.З., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Низкоэнергетические соотношения в модели конфайнмированных кварков. Труды совещания "Инфракрасное поведение КХД", Тбилиси, 1988 г.