

530.1  
А-18

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПО ИЗУЧЕНИЮ  
СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ И ВАКУУМА

На правах рукописи

УДК 530.145

АВАКЯН Сергей Леонович

РОЛЬ ПСЕВДОВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В ФИЗИКЕ АДРОНОВ  
НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая и  
математическая физика

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва - 1989

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** На сегодняшний день никто не сомневается в том, что адроны состоят из кварков. Однако при изучении конкретных процессов, протекающих на расстояниях  $\sim 0.5-1.0$  фм, необходимо привлекать различные модели, так как вопросы о механизме конфайнмента и адронизации кварков и глюонов остаются открытыми.

Развиваемая в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ модель конфайнмированных кварков (МКК) позволяет с единой точки зрения описать электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия мезонов и барионов. Кроме того, МКК позволяет получить не только ширины распадов, но и исследовать их более детально, вычисляя тонкие характеристики процессов, связанные с внутренней структурой адронов. К ним относятся всевозможные формфакторы, параметры наклона, электромагнитные радиусы.

Известна роль векторных мезонов в низкоэнергетических адронных процессах. Без учета промежуточных векторных состояний невозможно описание электромагнитных взаимодействий (например  $\langle r^2 \rangle_{\pi, K}$  длины  $\pi\pi$ -рассеяния).

Что касается псевдовекторных мезонов, то вопрос о роли их в низкоэнергетической физике адронов остается открытым.

Однако, следует отметить, что имеется ряд работ, в которых содержится указание на необходимость учета аксиальных мезонов при описании низкоэнергетических адронных процессов.

Исследование электрослабых распадов мезонов представляет большой интерес для понимания структуры адронной материи. Среди многих электрослабых процессов особый интерес представляют лептонные и полулептонные распады, поскольку лептоны являются "идеальными зондами" адронной структуры. Примерами таких распадов являются  $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ ,  $K \rightarrow e\nu\gamma$ ,  $\pi \rightarrow 3e\nu$ . Распад  $\pi \rightarrow e\nu\gamma$  является своеобразным вызовом кварковым моделям. Дело в том, что отношение аксиально-векторного и векторного формфакторов  $\chi = f_A(0)/f_V(0)$  в структурно-зависимой части амплитуды этого распада оказывается равным 1, в то время как экспериментальное значение  $\chi$  находится между 0 и 1. Та же проблема имеется в распаде  $K \rightarrow e\nu\gamma$ , однако в данном случае необходимо вычислить еще и роль  $SU(3)$  нарушения.

Изучение физики  $\alpha_1$ -мезона представляется интересным в связи с перечисленными выше проблемами.

Цель работы. Целью работы является выяснение роли псевдовекторных мезонов в низкоэнергетических адронных процессах и проведение теоретического исследования распадов  $\alpha_1$ -мезона.

Ставится задача:

1. Получение параметров модели, характеризующих нестранные  $u$ ,  $d$ -кварки и странный  $s$ -кварк, без учета и с учетом  $A$ - $P$  переходов.
2. Получение ширины основных распадов  $\alpha_1$ -мезона.
3. Вычисление параметра  $\chi$  для распадов  $\pi \rightarrow e\nu\gamma$  и  $K \rightarrow e\nu\gamma$  с учетом  $\alpha_1$ - $\pi$  и  $K_1$ - $K$  переходов.
4. Вычисление формфакторов распада  $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$ .
5. Вычисление параметров наклона распада  $K \rightarrow \pi e\nu$ , электромагнитных радиусов  $K^{\pm}$  и  $K^0$ -мезонов.

Научная новизна и практическая ценность

Научная новизна заключается в последовательном учете вкладов псевдовекторных мезонов в низкоэнергетические адронные процессы. Полученные в диссертации результаты подтверждают важную роль вкладов аксиально-векторных состояний во взаимодействия легких мезонов.

Предсказано экспериментальное значение параметра  $\chi$  в распадах  $\pi \rightarrow e\nu\gamma$  и  $K \rightarrow e\nu\gamma$  а также параметра  $\xi$  в распаде  $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\nu_e e^+$ .

Полученные в работе параметры ХКК, характеризующие нестранные и странный кварки, могут быть использованы для проведения расчетов в рамках данной модели.

Предсказаны ширины радиационных распадов  $\alpha_1$ -мезона.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 работы.

Апробация. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах в Лаборатории теоретической физики, Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, на 8 Международном совещании по проблемам квантовой теории поля (Алушта 1987 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения; содержит 11 таблиц, 16 рисунков, список литературы содержит 90 ссылок. Текст диссертации изложен на 80 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор основных подходов к описанию низко-энергетической физики адронов, сформулирована цель диссертации, поставлена задача, а также приведены структура и краткое содержание работы.

### I глава "Основные положения модели конфайнированных кварков"

В § I изложены основные положения МКК, а также приведены лагранжианы взаимодействия мезонов с кварками.

В § 2 для определения параметров модели, описывающих нестранные  $u, d$ -кварки, вычислены основные константы низкоэнергетической физики:

1.  $f_\pi$  - константа слабого распада  $\pi$ -мезона
2.  $g_{\pi\bar{q}q}$  - константа электромагнитного распада  $\pi$ -мезона
3.  $g_{\omega\pi\pi}$  - константа радиационного распада  $\omega$ -мезона
4.  $g_{\rho\pi\pi}$  - константа сильного распада  $\rho$ -мезона
5.  $1/f_\rho$  - константа перехода  $\rho \rightarrow \gamma$ .

Для изучения квантовой физики необходимо зафиксировать параметры странного кварка, которые определяются фитированием по основным низкоэнергетическим распадам странных мезонов.

1.  $f_K$  - константа слабого распада  $K$ -мезона
2.  $g_{K^*K\pi}$  - константа сильного распада  $K^*(892)$ -мезона
3.  $g_{K^*K\gamma}$  - константа радиационного распада  $K^*(892)$ -мезона
4.  $g_{\psi K K}$  - константа сильного распада  $\psi$ -мезона
5.  $1/f_\psi$  - константа перехода  $\psi \rightarrow \gamma$ .

### II глава "Роль $a_1$ -мезона в низкоэнергетической физике адронов"

В § I приведен экспериментальный статус  $a_1$ -мезона.

В § 2 показано, что учет  $a_1$ - $\pi$  перехода, происходящий через кварковую петлю, ведет лишь к незначительному перераспределению параметров модели.

В таблице I приведены диаграммы процессов, по которым проводилось фитирование, численные значения констант распадов, полученные как с учетом, так и без учета  $a_1$ - $\pi$  перехода и относительный вклад от диаграммы с  $a_1$ - $\pi$  переходом.

Таблица I

№	Процесс и наблюдаемая величина	Диаграммы	Экспериментальное значение	Значение без учета $\alpha_1$ - $\pi$ перехода	Учет $\alpha_1$ - $\pi$ перехода	
					Абсолютное значение	Относительный вклад от $\alpha_1$ - $\pi$ перехода
1	$\pi \rightarrow \mu \nu$ $\frac{5}{3}\pi$		$131,68 \pm 0,004$ МэВ	135 МэВ	138 МэВ	0,38
2	$\pi \rightarrow \rho \rho$ $g_{\pi\rho\rho}$		$0,270 \pm 0,019$ ГэВ <sup>-1</sup>	0,269 ГэВ <sup>-1</sup>	0,289 ГэВ <sup>-1</sup>	0
3	$\rho \rightarrow \pi \pi$ $g_{\rho\pi\pi}$		$6,10 \pm 0,49$	5,53	5,4	0,1
4	$\omega \rightarrow \pi \rho$ $g_{\omega\pi\rho}$		$2,53 \pm 0,75$ ГэВ <sup>-1</sup>	2,24 ГэВ <sup>-1</sup>	2,34 ГэВ <sup>-1</sup>	0
5	$\rho \rightarrow \gamma + e^+e^-$ $\frac{1}{5v}$		$0,200 \pm 0,048$	0,213	0,196	0

В § 3 изучены основные распады псевдовекторного  $\alpha_1$ -мезона. Рассмотрен сильный распад  $\alpha_1 \rightarrow \rho \pi$  (основной канал распада) и радиационные  $\alpha_1 \rightarrow \pi \rho$ ,  $\rho \rho$ ,  $\omega \rho$  распады  $\alpha_1$ -мезона. Радиационные распады могут служить хорошим источником информации об экзотично-векторных мезонах, но пока, к сожалению, экспериментальные данные о ширине этих распадов весьма неудовлетворительны. Ширина распада  $\alpha_1 \rightarrow \pi \rho$  измерена с очень большой ошибкой, а экспериментальные данные о ширине распадов  $\alpha_1 \rightarrow \rho \rho$ ,  $\omega \rho$  пока отсутствуют.

В таблице 2 приведены значения ширины основных распадов  $\alpha$  - мезона с учетом и без учета  $\alpha_1$  -  $\pi$  переходов.

Таблица 2

Процесс	Значения ширины		
	Эксперимент	С учетом $\alpha_1$ - $\pi$ переходов	Без учета $\alpha_1$ - $\pi$ переходов
1 $\alpha_1 \rightarrow \rho\pi$	$315 \pm 45$ МэВ	271 МэВ	414 МэВ
2 $\alpha_1 \rightarrow \pi\eta$	$640 \pm 246$ кэВ	875 кэВ	985 кэВ
3 $\alpha_1 \rightarrow \rho\eta$	—	51 кэВ	34 кэВ
4 $\alpha_1 \rightarrow \omega\eta$	—	451 кэВ	297 кэВ
5 $\tau \rightarrow \alpha_1 \nu_\tau$	$(3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$ эВ	$1,1 \cdot 10^{-4}$ эВ	$23,4 \cdot 10^{-4}$ эВ

### Глава III. Электрослабые формфакторы распадов

$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma \quad \text{и} \quad \pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$$

посвящена исследованию электрослабых распадов пиона. Изучение редких распадов важно тем, что оно позволяет получить информацию о структуре частиц путем анализа импульсной зависимости соответствующих формфакторов в области распадов.

В § 1 обосновывается актуальность проблемы распадов

$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma \quad \text{и} \quad \pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$$

§ 2 посвящен экспериментальной ситуации связанной с проблемой указанных распадов.

В § 3 приведен обзор теоретических методов описания распадов  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$  и  $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$ .

§ 4 посвящен вычислению параметра  $\gamma = f_A(0)/f_V(0)$  равного отношению аксиально-векторного формфактора к векторному в структурно зависимой части амплитуды распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ . Амплитуде процесса без учета взаимодействия с промежуточным  $\alpha_1$  - мезоном определяется диаграммами изображенными на рисунке 1а. При этом  $f_A(0) = f_V(0)$  то есть  $\gamma = 1$ , что совпадает с результатом, полученным в обычных кварковых моделях.

Учет промежуточного  $\alpha_1$  - мезона приводит к появлению дополнительных диаграмм, представленных на рис. 1б. Эти диаграммы вносят вклад в аксиально-векторный формфактор  $f_A(t)$ .

Технически образцы, с учетом всех диаграмм, приведенных на рис. 1,

Таким образом, оказалось, что влияние  $\alpha_1$  мезона существенно проявляется в слабом радиационном распаде  $\pi$ -мезона. Учет диаграмм с виртуальным  $\alpha_1$ -мезоном привел к изменению величины  $\gamma$  почти в 2 раза. При этом значение  $\gamma$  оказалось близким к экспериментальному значению, полученному позже группой SIN :

$$\gamma = 0,522 \pm 0,059.$$

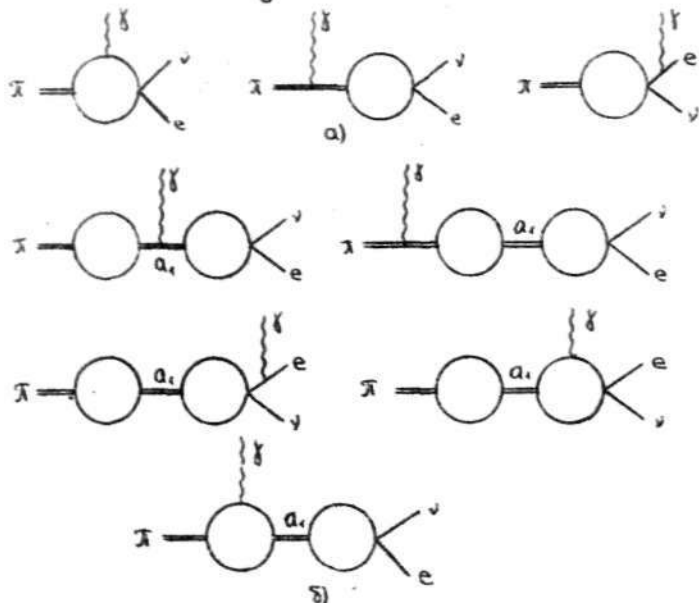


Рис. I

В § 5 вычислены формфакторы  $f_V$ ,  $f_A$  и  $R$  (скалярно-векторный формфактор  $R$  связан с рождением электрон-позитронной пары) распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$  и получено значение параметра  $\xi = R(0)/f_V(0)$ . Сделаны предсказания для параметров наклона  $\lambda_V$  и  $\lambda_A$  в указанном распаде. Параметры  $\lambda_V$  и  $\lambda_A$  определены следующим образом:

$$f\left(\frac{k^2}{m_\pi^2}, \frac{Q^2}{m_\pi^2}\right) = f(0) \left(1 + \lambda_V \frac{k^2}{m_\pi^2} + \lambda_A \frac{Q^2}{m_\pi^2}\right),$$

где  $k$  - импульс электрон-позитронной пары,  $Q$  - суммарный

импульс позитрона и нейтрино, испускающейся из вершины. Следует отметить, что вклад диаграмм с промежуточным  $\phi$ -мезоном является существенным при вычислении параметра  $\xi$  и позволяет получить хорошее согласие с экспериментальными данными:

$$\xi_{\text{МКК}} = 2,1; \quad \xi_{\text{КСМ}} = 2,5 \pm 0,6$$

В таблице 3 приведены полученные значения формфакторов распада  $\bar{K} \rightarrow 3e\nu$ , экспериментальные значения, опубликованные группой SINDRUM, а также предсказанные значения для параметров наклона.

Таблица 3

Форм-факторы	Эксперимент	МКК	$\lambda_V$	$\lambda_A$
$f_V$	$0,029^{+0,019}_{-0,014}$	0,041	-0,04	0,03
$f_A$	$0,018^{+0,015}_{-0,012}$	0,022	0,01	0,06
$R$	$0,063^{+0,026}_{-0,016}$	0,087	0,02	0,02

Экспериментальные данные о наклоне векторных и аксиально-векторных формфакторов пока не получены. Из таблицы 3 видно, что вычисленные значения параметров наклона значительно меньше единицы, поэтому импульсная зависимость векторных и аксиально-векторных формфакторов незначительна.

В IV главе "Лептонные и полулептонные распады K-мезонов" рассматриваются лептонные и полулептонные распады K-мезонов. С точки зрения кварковых моделей, изучение этих распадов позволяет определить параметры странного кварка и уточнить значение таких величин как параметры наклона  $K_{13}$ -распада, электромагнитные радиусы  $K^+$  и  $K^0$ -мезонов, формфакторы распада  $K^+ \rightarrow e^+\nu_e\gamma$  характеризующих внутреннюю структуру мезона.

Эти величины являются более тонкими и детальными характеристиками процессов, чем, например, ширины распадов, поэтому их вычисление является хорошей проверкой модели.

В § I дан краткий обзор теоретических работ, посвященных этим процессам.



В § 2 вычислены электромагнитные радиусы  $K^{\pm}$  и  $K^0$ -мезонов, формфакторы и параметры наклона распада  $K^{\pm} \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ , ширины распадов  $\tau^- \rightarrow K^0 \nu_{\tau}$ ,  $\tau^- \rightarrow K^{*0} \nu_{\tau}$ .

Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Процесс	Неследующая величина	Эксперимент	МКМ
$K^{\pm} \rightarrow K^{\pm} \gamma$	$\langle r^2 \rangle_K \Phi_{\omega}^2$	$0,28 \pm 0,05$	0,31
$K^0 \rightarrow K^0 \gamma$	$\langle r^2 \rangle_{K^0} \Phi_{\omega}^2$	$-0,052 \pm 0,026$	-0,029
$K^{\pm} \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	$\bar{F}(0)$	$-0,32 \pm 0,15$	-0,22
	$\lambda_+$	$0,027 \pm 0,0072$	0,022
$\tau^- \rightarrow K^0 \nu_{\tau}$	$\Gamma, \text{ эВ}$	$(1,34 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
$\tau^- \rightarrow K^{*0} \nu_{\tau}$	$\Gamma, \text{ эВ}$	$(3,39 \pm 1,81) \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$

§ 3 посвящен вычислению формфакторов распада  $K \rightarrow e \nu \gamma$ . Этот распад представляет особый интерес, он аналогично распаду  $\pi \rightarrow e \nu \gamma$  является своеобразным вызовом кварковой модели. Проблема обостряется еще и тем, что на сегодняшний день есть только грубая экспериментальная оценка для параметра

$$\chi_e = \bar{f}_+(0) / \bar{f}_0(0) \text{ в распаде } K \rightarrow e \nu \gamma$$

$$0,05 < \chi_e < 0,6$$

Значение  $\chi_e$  без учета диаграмм с промежуточным псевдовекторным мезоном оказалось равным 1. Учет диаграмм с промежуточным псевдовекторным  $K_4$ -мезоном приводит к

$$\chi_e = 0,21$$

Таким образом, оказалось, что учет аксиально-векторного  $K_4$ -мезона существенно проявляется в распаде  $K \rightarrow e \nu \gamma$  и приводит к значению  $\chi_e$ , не противоречащему экспериментальным данным.

Следует отметить, что различные значения  $\chi$  для распада  $\pi^{\pm} \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$  ( $\chi = 0,53$ ) и  $\chi_e$  для распада  $K^{\pm} \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$  происходят в основном из-за различия параметров, входящих в формулы

этой области конфайнмента  $u$  и  $s$ -кварков, и слабо зависит от масс кварков.

Итак, из проведенного выше рассмотрения видно, что низкоэнергетические характеристики каонов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, что позволяет надеяться и на успешное описание нечетных распадов  $K$ -мезонов и переходов с  $\Delta S=2$ .

Техника расчета однопетлевых кварковых диаграмм приведена в Приложении. В качестве примера, подробно вычисляются амплитуда перехода  $P \rightarrow P$  и амплитуды процессов  $V \rightarrow PP$ ,  $P \rightarrow \mu\nu$ .

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. В модели конфайнированных кварков получены параметры, характеризующие нестранные  $u$  и  $d$  кварки и странный  $s$ -кварк.
2. Выяснена роль  $a_1$ -мезона в низкоэнергетических адронных процессах.
3. Получены численные значения ширины основных распадов  $a_1$ -мезона. Сделаны предсказательные расчеты ширины радиационных распадов  $a_1 \rightarrow \rho\gamma$  и  $a_1 \rightarrow \omega\gamma$ .
4. Вычислен параметр  $\gamma$ , равный отношению аксиально-векторного формфактора к векторному в структурно-зависящей части амплитуды распада  $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ , также получены формфакторы и параметры наклона формфакторов распада  $\pi^+ \rightarrow e^+e^-\gamma$ . В диссертации указано, что учет псевдовекторного  $a_1$ -мезона приводит к согласию с экспериментальными данными.
5. В диссертации получены тонкие и детальные характеристики каонов, такие как  $\langle r^2 \rangle_{K^\pm}$ ,  $\langle r^2 \rangle_{K^0}$  - электромагнитные радиусы  $K^\pm$  и  $K^0$ -мезонов,  $\lambda_+$ ,  $\xi(0)$  - параметры наклона распада  $K \rightarrow \pi e\nu$ .
6. На примере распада  $K \rightarrow e\nu\gamma$  показана роль псевдовекторного мезона  $K_1$  в электрослабых распадах каона.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Роль  $\alpha_1$ -мезона в низкоэнергетической физике адронов//ЯФ.- 1987.- Т. 46, вып. 2(8).- С. 576-584.
2. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. О распаде  $K \rightarrow e \nu \gamma$  .- Дубна: ОИЯИ, 1986.- P2-86-441.- 6 с.
3. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ганболд Г., Динейхан М., Электро-слабые формфакторы распада  $\pi^+ \rightarrow e^+ e^- \nu_e e^+$  .- Дубна: ОИЯИ, 1987.- P2-87-485.- 6 с.