

K-44

2-2007-146

На правах рукописи
УДК 539.12

КИСЕЛЕВ
Алексей Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ЛЕГКИХ
СКАЛЯРНЫХ МЕЗОНОВ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2007
Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Института математики СО РАН им. С.Л. Соболева.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Н.Н. Ачасов (ИМ СО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Э.А. Кураев (ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук, профессор

В.Г. Сербо (Новосибирский государственный университет)

Ведущая организация:

Иркутский государственный университет.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2007 г. в 15⁰⁰
на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории
теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного институ-
та ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного
института ядерных исследований.

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета


С.И. Федотов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основе наших сегодняшних пред-
ставлений об адронах лежит стандартная кварковая модель,
успехи которой в описании самых разнообразных адронных ре-
акций хорошо известны. Существенное отклонение от предска-
заний кварковой модели считается первоочередной проблемой,
требующей внимания и скорейшего решения. Впервые кварко-
вая модель столкнулась с такой проблемой при попытке опи-
сать природу легких скалярных $a_0(980)$ и $f_0(980)$ мезонов, у
которых обнаружился целый ряд свойств, необычных с точки
зрения стандартной кварковой модели.

Более того, выяснение природы легких скалярных мезонов
помогло бы понять, какой тип взаимодействия является резуль-
татом конфайнмента в киральном пределе, в частности, экви-
валентна ли квантовая хромодинамика (КХД) линейной или
нелинейной сигма-модели при низких энергиях? Таким обра-
зом, изучение природы легких скалярных мезонов является од-
ной из центральных задач непертурбативной КХД.

В настоящее время предполагается, что существует нонет
легких скалярных мезонов, состоящий из хорошо установлен-
ных $a_0(980)$ и $f_0(980)$ и гипотетических $\sigma(600)$ и $\kappa(700 - 900)$,
существование которых до сих пор остается предметом дискус-
сий.

Обсуждается несколько основных предположений о природе
легких скалярных мезонов, в рамках которых пытаются объяс-
нить их необычные свойства: различные варианты двухкварко-

вой модели, четырехкварковая модель, модель $K\bar{K}$ молекулы для $a_0(980)$ и $f_0(980)$. Кроме того, рассматривались такие варианты, как глюоний для $f_0(980)$ и динамический эффект для $a_0(980)$.

Экспериментально проверить эти модели оказалось непросто. В результате многолетних усилий было показано, что в качестве критерия отбора различных предположений о природе легких скалярных мезонов можно использовать радиационные распады ϕ -мезона $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. Первые измерения этих распадов были проведены в 1998 г. в ИЯФ СО РАН.

В 2002 г. появились более точные данные детектора KLOE (Италия). К сожалению, при анализе данных по обоим распадам группой KLOE был допущен ряд ошибок, которые привели к искажению информации, заложенной в данных.

Другим важным источником сведений о скалярных мезонах $\sigma(600)$ и $f_0(980)$ служат данные по сдвигу фаз S-волнового $\pi\pi$ -рассеяния и реакции $\pi\pi \rightarrow K\bar{K}$. В свое время один из основных аргументов против существования $\sigma(600)$ и $\kappa(700 - 900)$ заключался в том, что фазы $\pi\pi$ -рассеяния и πK -рассеяния не проходили через 90° при предполагаемых массах этих частиц. Ситуация изменилась после того, как было показано, что в линейной сигма-модели присутствует отрицательная фаза кирального фона, который скрывает легкий σ -мезон. Стало ясно, что в киральной динамике экранировка широких скалярных мезонов вполне естественна. Хорошее совместное описание всего комплекса данных в одной из моделей строения легких скалярных

мезонов с включением легкого σ -мезона оказало бы серьезную поддержку как модели, так и существованию $\sigma(600)$.

Основной целью настоящей диссертации является исследование природы легких скалярных мезонов в теории и эксперименте, в частности, в процессах $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$, $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и $\pi\pi$ -рассеяния.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации проведен новый анализ данных детектора KLOE (Италия) по распаду $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$. Показано, что данные предпочитают более высокую массу $a_0(980)$ мезона и заметно более сильную связь $a_0(980)$ мезона с $K\bar{K}$ -каналом, чем было получено в анализе группы KLOE. Данные KLOE подтверждают четырехкварковый механизм перехода $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(980)\gamma \rightarrow \eta\pi^0\gamma$, а соотношение констант взаимодействия $a_0(980)$ -мезона с $K\bar{K}$ и $\eta\pi^0$ каналами не противоречит предсказанию наивной четырехкварковой модели $a_0(980)$ -мезона.

Проведенное описание данных KLOE по распаду $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ совместно с данными о $\pi\pi$ -рассеянии и реакции $\pi\pi \rightarrow K\bar{K}$ впервые учитывает киральную экранировку легкого $\sigma(600)$ мезона и его смешивание с хорошо установленным $f_0(980)$ мезоном. Данные не противоречат существованию $\sigma(600)$, подтверждают K^+K^- -петлевой механизм распада $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow (f_0(980) + \sigma(600))\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и дают новые доводы в пользу четырехкварковой природы $\sigma(600)$ и $f_0(980)$ мезонов. Получено несколько различных вариантов описания данных, предложены эксперименты, критические для этих вариантов.

В диссертации впервые показано, что пропагаторы скалярных мезонов, полученные в однопетлевом приближении, удовлетворяют условию Челлена-Лемана в широкой области констант взаимодействия с двухчастичными псевдоскалярными и скалярными состояниями.

В работе произведен расчет реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$; рассмотрен общий вид калибровочно-инвариантных амплитуд распадов $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$.

Показано, что заключение о большом смешивании $a_0(980)$ и $f_0(980)$, сделанное известным теоретиком Ф. Клоузом (F. Close), является результатом ошибки, связанной с перекрытием этих резонансов.

Кроме того, было показано, что появившееся в литературе утверждение о возможности интенсивных распадов $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(980)\gamma$ и $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow f_0(980)\gamma$ в модели K^+K^- -молекулы является ошибочным, нерелятивистская область каонных импульсов в петле $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(f_0)\gamma$ дает сравнительно небольшой вклад.

Работа дает новые аргументы в пользу четырехкварковой природы легких скалярных мезонов. Сформулированы некоторые перспективы для дальнейших исследований природы лёгких скалярных мезонов.

Результаты диссертации используются коллаборацией KLOE при исследовании реакций $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и коллаборацией CLEO (США) при анализе данных по распаду $D^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$. Конечно, результаты диссертации могут использовать-

ся при анализе других адронных реакций. Из других возможных применений можно отметить необходимость согласования результатов работы с результатами, полученными в киральной теории возмущений Г. Лейтвилером (H. Leutwyler).

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Проведен анализ экспериментальных данных детектора KLOE (Италия) по распаду $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$. Показано, что данные предпочитают более высокую массу $a_0(980)$ -мезона и заметно более сильную связь $a_0(980)$ -мезона с $K\bar{K}$ -каналом, чем было получено в анализе группы KLOE. Данные полностью подтверждают механизм перехода $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(980)\gamma$, результаты анализа согласуются с предсказаниями четырехкварковой модели $a_0(980)$.
2. Проведен совместный анализ данных KLOE по распаду $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и данных по $\pi\pi$ -рассеянию, а также реакции $\pi\pi \rightarrow K\bar{K}$. Описание выполнено с учетом киральной экранировки $\sigma(600)$ -мезона и его смешивания с $f_0(980)$ -мезоном. Данные не противоречат существованию $\sigma(600)$, подтверждают K^+K^- -петлевой механизм распада $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow (f_0(980) + \sigma(600))\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и дают новые доводы в пользу четырехкварковой природы $\sigma(600)$ и $f_0(980)$ мезонов. Получено несколько различных вариантов описания данных, были предложены эксперименты, критические для этих вариантов. Результаты анализа используются коллаборацией KLOE (Италия) при ис-

следовании реакций $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и коллаборацией CLEO (США) при анализе данных по распаду $D^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$.

3. Продемонстрировано, что пропагаторы легких скалярных мезонов удовлетворяют представлению Челлена-Лемана в широкой области констант связи скалярного резонанса с двухчастичными псевдоскалярными (или скалярными) состояниями.
4. Произведен расчет реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. Расчет был использован группой KLOE для анализа данных и опубликован в работе группы KLOE F. Ambrosino et al., Eur. Phys. J. C **49**, 473 (2007) [arXiv:hep-ex/0609009] как частное сообщение.
5. Показано, что заключение о большом смешивании $a_0(980)$ и $f_0(980)$, сделанное Ф. Клоузом и Э. Кирком (F. Close, A. Kirk), является результатом ошибки, связанной с перекрытием этих резонансов.

Апробация работы. Результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики Института математики им. С.Л. Соболева, Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). Полученные в диссертации результаты были доложены на международных конференциях и совещаниях, в том числе на сессиях-конференциях секции ЯФ ОФН РАН

"Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, ИТЭФ, март 2004 г. и декабрь 2005 г.) и на Международной конференции " e^+e^- collisions from ϕ to ψ " (Новосибирск, ИЯФ, февраль 2006 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ в реферируемых отечественных и зарубежных журналах.

Список публикаций.

1. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, Phys. Lett. B **534** (2002), 83 [arXiv:hep-ph/0203042].
2. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, Phys. Rev. D **68**, 014006 (2003) [arXiv:hep-ph/0212153].
3. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, ЯФ **67**, 653 (2004) [Phys. At. Nucl. **67**, 633 (2004)].
4. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, Phys. Rev. D **70**, 111901 (2004). [arXiv:hep-ph/0405128].
5. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, Phys. Rev. D **73**, 054029 (2006) [Erratum-ibid. D **74**, 059902 (2006)][arXiv:hep-ph/0512047].
6. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, and G. N. Shestakov, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **162**, 127 (2006) [arXiv:hep-ph/0605126].
7. N. N. Achasov, A. V. Kiselev, arXiv:hep-ph/0606268 (работа принята в Phys. Rev. D).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения и дополнения, общим

объемом 78 страниц, включая 6 таблиц, 22 рисунка и список цитированной литературы из 103 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность исследования природы легких скалярных мезонов, обсуждается современное состояние проблемы, формулируется цель работы, кратко излагаются содержание диссертации и основные полученные результаты.

В первой главе изложена проблема легких скалярных $a_0(980)$ и $f_0(980)$ с точки зрения стандартной двухкварковой модели, рассмотрены характерные черты и предсказания других моделей строения легких скалярных мезонов. В этой же главе обсуждается современный статус $\sigma(600)$ -мезона.

Во второй главе приводится расчет реакций $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$, $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$, $\pi\pi \rightarrow K\bar{K}$, а также процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. В распадах $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ доминируют механизмы $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0\gamma \rightarrow \eta\pi^0\gamma$, $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow (\sigma\gamma + f_0\gamma) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, небольшой фон в-основном связан с промежуточным $\rho^0\pi^0$ -состоянием, $\phi \rightarrow \rho^0\pi^0 \rightarrow \eta(\pi^0)\pi^0\gamma$. В реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$, расчет которой также будет представлен, кроме сигнального процесса $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ присутствует некогерентный фон $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$. Вклад этого процесса необходимо учитывать в области инвариантных масс $m < 700$ МэВ, в области $m > 700$ МэВ он практически отсутствует.

Здесь же мы докажем, что пропагаторы легких скалярных мезонов удовлетворяют известному соотношению Челлена-Ле-

мана в широкой области констант связи скалярного резонанса с двухчастичными псевдоскалярными или скалярными состояниями. Кроме того, будет показано, что заключение о большом смешивании $a_0(980)$ и $f_0(980)$, сделанное Ф. Клоузом и Э. Кирком (F. Close, A. Kirk), является результатом ошибки, связанной с перекрытием этих резонансов. Также мы покажем, что появившееся в литературе утверждение о возможности интенсивных распадов $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(980)\gamma$ и $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow f_0(980)\gamma$ в модели K^+K^- -молекулы является ошибочным, вклад нерелятивистской области каонных импульсов в петле $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0(f_0)\gamma$ дает сравнительно небольшой вклад.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных данных. Для распада $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ приведены различные варианты описания данных KLOE, результаты мы сравним с предсказаниями различных моделей строения $a_0(980)$ -мезона. Исследование процессов $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и $\pi\pi$ -рассеяния показало, что данные прекрасно согласуются со сценарием, основанным на четырехкварковой модели. Этот сценарий состоит в том, что $\sigma(600)$ относительно слабо связан с $K\bar{K}$ -каналом, а $f_0(980)$ с $\pi\pi$ -каналом, в амплитудах процессов $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ и $\pi\pi$ -рассеяния присутствуют нули Адлера, и при этом масса $\sigma(600)$ находится в интервале 400 – 700 МэВ.

В четвертой главе обсуждаются результаты анализа экспериментальных данных, а также перспективы для дальнейших исследований природы легких скалярных мезонов.

В Заключении формулируются основные результаты дис-

сертации.

В Дополнении выводится общий вид калибровочно-инвариантных амплитуд распадов $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ и $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$.

Получено 4 октября 2007 г.