

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2004-92

На правах рукописи
УДК 539.12.01

РАДЖАБОВ
Андрей Евгеньевич

**ЛЕГКИЕ МЕЗОНЫ В НЕЛОКАЛЬНОЙ КИРАЛЬНОЙ
КВАРКОВОЙ МОДЕЛИ С КОНФАЙНМЕНТОМ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2004

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор
доктор физико-математических наук

М.К. Волков
А.Е. Дорохов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
доктор физико-математических наук,
профессор

Б.А. Арбузов (НИИЯФ МГУ, г. Москва)
Э.А. Кураев (ОИЯИ, ЛТФ)

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий, г. Протвино .

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2004 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.И. Федотов

Общая характеристика диссертации.

Актуальность темы. Квантовая хромодинамика (КХД) является теоретическим фундаментом сильных взаимодействий элементарных частиц. Асимптотическая свобода на малых расстояниях обеспечивает существование малого параметра α_s , что позволяет успешно применять хорошо разработанные методы теории возмущений. Однако значительно более сложная ситуация имеет место при средних и низких энергиях, где уже не существует малого параметра для построения теории возмущений и в этом случае приходится использовать непертурбативные методы квантовой теории поля. Поэтому в этой области энергий является оправданным применение различных эффективных моделей. В отсутствие строгой динамической теории основным принципом построения эффективных моделей является киральная симметрия сильных взаимодействий. Одной из наиболее известных моделей, приводящих к хорошим результатам, является модель Намбу–Иона–Лазинио (НИЛ), которая базируется на локальном четырехкварковом взаимодействии. В этой модели в силу спонтанного нарушения киральной симметрии происходит перестройка вакуума, возникает кварковый конденсат и появляются безмассовые голдстоуновские частицы (пионы). Явление конденсации почти безмассовых токовых кварков приводит к тому, что новыми эффективными степенями свободы являются массивные составляющие кварки. В рамках НИЛ модели возможно построить спектр масс псевдоскалярных, скалярных, векторных и аксиально-векторных мезонных нонетов, и объяснить их внутренние свойства и взаимодействия друг с другом. Модель НИЛ также успешно применяется для рассмотрения радиальных возбуждений мезонов и поведения мезонов в горячей и плотной среде.

Однако локальная модель НИЛ имеет недостатки, которые существенно сужают область ее применения. Поскольку модель НИЛ является неперенормируемой теорией, для устранения ультрафиолетовых расходимостей необходимо введение феноменологического параметра обрезания по импульсам $\Lambda \approx 1$ ГэВ

кварковых петлевых интегралах. Физический смысл этого параметра связан с выделением области энергии-импульса, где происходит спонтанное нарушение киральной симметрии. Несмотря на то, что такая процедура неоднозначна, различные схемы регуляризации обычно приводят к похожим результатам. Неперенормируемость модели НИЛ приводит к трудностям и при рассмотрении следующих порядков разложения по обратной величине числа цветов кварков, $1/N_c$, которая является естественным малым параметром в калибровочных теориях. В каждом следующем порядке $1/N_c$ возникают новые параметры обрезания мезонных петель. Модель НИЛ не обеспечивает также конфайнмент кварков.

Для устранения указанных выше недостатков локальной модели НИЛ, предлагались различные нелокальные эффективные модели. Такого рода модели позволяют решать целый ряд задач, которые невозможно решить без привлечения дополнительных феноменологических предположений в рамках локальных теорий: корректное описание длин рассеяния, форм-факторов частиц, радиусов, поляризуемостей, параметров наклона и т.д. Одной из проблем является выбор нелокального взаимодействия, поскольку не существует однозначных методов вывода эффективного нелокального лагранжиана из КХД.

Широко известным способом построения нелокальной теории является использование модели вакуума КХД как жидкости инстантонов, которая основывается на феноменологических соображениях, о том что в ансамбле инстантонов доминируют инстантоны определенного размера. Среднее расстояние между инстантонами гораздо больше размера инстантонов, то есть инстантонная жидкость является разреженной. В результате инстантонное взаимодействие ведет к появлению эффективного нелокального взаимодействия N_f кварков. В инстантонном вакууме происходит спонтанное нарушение симметрии и генерируется динамическая масса кварка, зависящая от его виртуальности. В инстантонной модели происходит регуляризация петлевых интегралов за счет учета нелокальной структуры непертурбативного вакуума КХД. Параметры модели, средний размер инстантона и плотность инстантонов в вакууме, име-

ют наглядный физический смысл, а все величины низкоэнергетической физики выражаются через них. В то же время, инстантонная модель не обеспечивает конфайнмент.

Целью диссертационной работы является формулировка $SU(2) \times SU(2)$ нелокальной кварковой модели с конфайнментом и определение на ее основе внутренних свойств мезонов и их взаимодействий при низких и промежуточных энергиях.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации сформулирована нелокальная киральная кварковая модель типа Намбу–Иона-Лазинио. В модели реализуется механизм спонтанного нарушения киральной симметрии, приводящий к появлению динамической массы кварка и безмассовому, в киральном пределе, пиону. Показано выполнение в рамках данной модели основных низкоэнергетических теорем: соотношений Голдбергера–Треймана и Гелл-Манна–Окса–Реннера. Ядро нелокального взаимодействия имеет сепарабельный тип, мотивированный инстантонными взаимодействиями. Нелокальность предложена в форме обеспечивающей конфайнмент кварков. В модели вычислен ряд сильных и электромагнитных процессов с участием легких мезонов и отмечено согласие результатов с экспериментом. Найдены электромагнитные и переходные радиусы пионов с учетом поправок от векторных мезонов и показано, что в нелокальных моделях устраняется известное противоречие локальной модели, приводящее к завышенным значениям радиусов.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, доклады-вались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, на семинаре в г. Болонья (Италия), а также представлялись на XII Международной конференции “Избранные проблемы современной физики” (Дубна, 2003), на семинаре “Современные методы релятивистской ядерной физики” (Дубна, 2003).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из пяти глав и одного приложения, общий объем 75 страниц, включая 7 таблиц, 20 рисунков и список цитированной литературы из 85 наименований.

Содержание работы

В первой главе – введении, обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, а также приводится краткое содержание диссертации.

Во второй главе приводится формулировка кварковой модели с нелокальным сепарабельным четырехкварковым взаимодействием. С помощью процедуры бозонизации осуществляется переход от исходного действия к действию, содержащему физические мезонные поля. При этом спонтанное нарушение киральной симметрии приводит к возникновению динамической, зависящей от импульса, массы кварка $m(p)$. Пропагатор кварка имеет вид

$$S(p) = (\hat{p} - m(p))^{-1}.$$

Уравнение щели выражает динамическую массу кварка через нелокальность.

Введение внешних (электрослабых) полей осуществляется при помощи швингеровских фазовых факторов и приводит к появлению нелокальных вершин взаимодействия кварков и мезонов с внешними полями.

Показывается выполнение низкоэнергетических теорем: соотношений Голдбергера–Треймана и Гелл-Манна–Окса–Реннера.

Построены пропагаторы и вершинные функции мезонов. Учтен эффект смешивания псевдоскалярного (π) и продольной компоненты аксиально-векторного (a_1) полей.

В третьей главе рассматривается проблема выбора вида нелокального взаимодействия. Основными требованиями при этом является сходимость петле-

вых интегралов, а также отсутствие порогов рождения свободных кварков в амплитудах различных процессов.

В работе рассмотрены два варианта выбора массовой функции кварка. Первый вариант основывается на связи нелокального кваркового конденсата и скалярной части кваркового пропагатора. Для обеспечения конфайнмента кварков нелокальный кварковый конденсат выбран в виде целой функции, а именно гауссовской экспоненты

$$\frac{m(p^2)}{m^2(p^2) + p^2} = \frac{1}{m(0)} \exp\left(-\frac{p^2}{\Lambda^2}\right).$$

Представление кваркового пропагатора в виде целой функции широко используется в литературе для обеспечения конфайнмента кварков. Однако численные расчеты с массовой функцией кварка такого вида для ряда процессов при промежуточных импульсах затруднены. В качестве решения нами был предложен второй вариант, в котором векторная часть кваркового пропагатора имеет вид

$$\frac{1}{m^2(p) + p^2} = \frac{1 - \exp(-p^2/\Lambda^2)}{p^2}.$$

Модельные параметры, массовая функция кварка при нулевой виртуальности $m(0)$, константа связи в векторном-аксиально-векторном секторе G_2 , токсовая масса кварка m_c , фиксируются по экспериментальным значениям слабой константы распада пиона F_π , массы ρ -мезона M_ρ и массы пиона M_π , соответственно.

В четвертой главе исследуются электромагнитные процессы. Ширина радиационного распада ρ -мезона $\rho \rightarrow e^+e^-$ оказывается в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Далее рассматриваются электромагнитный и переходный радиусы пионов, а также электромагнитный формфактор пиона в области $-1 \text{ ГэВ}^2 < q^2 < 1.6 \text{ ГэВ}^2$. Известно, что в локальной модели НИЛ вклад диаграмм с промежуточными векторными мезонами в радиусы пионов имеет тот же порядок, что и вклад контактных диаграмм. В результате суммарное значение радиуса плохо согласуется с экспериментом. В

нелокальной модели вклад векторных мезонов в радиусы оказывается сильно подавлен, что приводит к удовлетворительному согласию вычисленных радиусов с наблюдаемыми. Показано, что учет вклада промежуточного ρ -мезона позволяет также описать электромагнитный форм-фактор пиона во времени-пространственно-подобных областях, смотри рисунки 1, 2. При этом в пространственноподобной области данный вклад подавлен, тогда как во времениподобной области происходит компенсация контактного вклада и вклада с промежуточным векторным мезоном. В результате электромагнитный форм-фактор пиона находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Оценки поляризуемости заряженного пиона показывают, что в данной модели поляризуемость по сравнению с локальной моделью имеет меньшую величину. Причиной сильного уменьшения поляризуемости в нелокальной модели является подавление амплитуды двухфотонного распада скалярного мезона $\sigma \rightarrow \gamma\gamma$. Показано, что поляризуемость чувствительна к деталям модели и при наличии хороших экспериментальных данных может использоваться для фиксации модельных параметров.

В пятой главе приведены основные результаты диссертации и сформулированы главные выводы.

В приложении приводятся выражения для нелокальных вершин и способ вычислений амплитуд различных процессов.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Сформулирована $SU(2) \times SU(2)$ кварковая модель с нелокальным взаимодействием сепарабельного типа для описания легких мезонов при малых и промежуточных энергиях. Нелокальность взаимодействия мотивируется инстантонной моделью вакуума КХД. В модель включены векторные и аксиально-векторные мезоны.

2. Показано выполнение в модели основных низкоэнергетических теорем: соотношений Голдбергера–Треймана и Гелл-Манна–Окса–Реннера.
3. Предложен вид нелокального взаимодействия в форме, обеспечивающей отсутствие нефизических кварк-антикварковых порогов в описании процессов. Такой выбор нелокальности приводит к представлению скалярной или векторной части кваркового пропагатора в виде целой функции.
4. Рассмотрены сильные распады легких мезонов $\rho \rightarrow \pi\pi$, $\sigma \rightarrow \pi\pi$, $a_1 \rightarrow \rho\pi$, а также отношение D , S парциальных волн в распаде $a_1 \rightarrow \rho\pi$.
5. Изучен электромагнитный форм-фактор пиона во времени- и пространственно-подобных областях, а также электромагнитный и переходный радиусы и поляризуемость пионов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. А. Е. Калошин и А. Е. Раджабов, “Унитарное смешивание скаляр–вектор в R_ξ калибровке,” ЯФ **66**, 1416 (2003).
2. М.К. Volkov, А.Е. Radzhabov, V.L. Yudichev, “Process $\gamma^*\gamma - \sigma$ at large virtuality of γ^* ,” ЯФ **66**, 2193 (2003), hep-ph/0210306.
3. А.Е. Dorokhov, А.Е. Radzhabov, М.К. Volkov, “ $SU(2) \times SU(2)$ chiral quark model with nonlocal interaction,” ЯФ **67**, 1042 (2004).
4. А.Е. Radzhabov and М.К. Volkov, “Nonlocal chiral quark model with confinement,” Письма в ЭЧАЯ **118**, 5 (2004).
5. А.Е. Radzhabov and М.К. Volkov, “ $SU(2) \times SU(2)$ nonlocal quark model with confinement,” Eur. Phys. J. A **19**, 139 (2004), hep-ph/0305272.
6. А.Е. Dorokhov, А.Е. Radzhabov, М.К. Volkov, “Pion radii in nonlocal chiral quark model,” Eur. Phys. J. A (2004), in press, hep-ph/0311359.

7. A.E. Radzhabov, M.K. Volkov, "Charged pion polarizability in the nonlocal quark model of Nambu–Jona-Lasinio type," послано в журнал Письма в ЭЧАЯ, hep-ph/0403131.
8. A.E. Radzhabov, M.K. Volkov, "Meson model with nonlocal four-quark interaction," Proceedings of XII International Conference on Selected Problems of Modern Physics, D1,2-2003-219, Dubna, p.291.
9. A.E. Radzhabov and M.K. Volkov, " $SU(2) \times SU(2)$ model with confinement and pion radius," Proceedings of Miniworkshop Modern Methods in Relativistic Nuclear Physics.

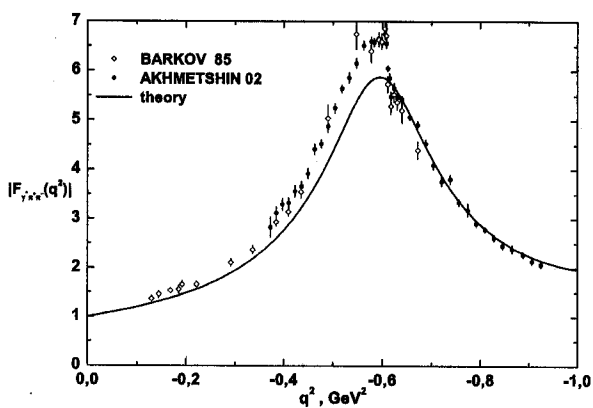


Рис. 1: Электромагнитный форм-фактор пиона во времениподобной области.

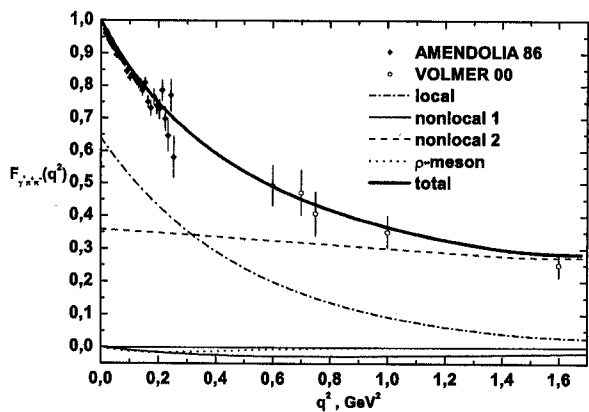


Рис. 2: Электромагнитный форм-фактор пиона в пространственноподобной области.

Получено 18 июня 2004 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 18.06.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,66. Тираж 100 экз. Заказ № 54482.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/