

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д-695

2-82-746

ДОРОХОВ

Александр Евгеньевич

**СВОЙСТВА АДРОНОВ
В ПОДХОДЕ КВАЗИНЕЗАВИСИМЫХ КВАРКОВ**

**Специальность: 01.04.02 – теоретическая
и математическая физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1982

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник П.Н. Боголюбов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Б.В. Струминский

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник С.Щ. Мавродиев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий, г. Серпухов.

Автореферат разослан " " _____ 1982 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1982 года
на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук В.И. Журавлев

Актуальность темы

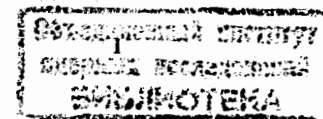
Задача построения моделей элементарных частиц является актуальной для понимания природы фундаментальных взаимодействий. В этом направлении наиболее плодотворным оказался путь, определенный в работах Н.Н.Боголюбова и его учеников, где были сформулированы динамические принципы построения составных моделей адронов.

Существенное влияние на развитие кварковых моделей оказала модель квазинезависимых кварков, разработанная П.Н.Боголюбовым. Эта модель содержит все основные положения предложенной позднее модели мешков.

Составные модели элементарных частиц, предполагая существование конфайнмента, позволяют обойти трудности, связанные с учетом влияния эффектов процессов, происходящих на больших расстояниях, и решить задачу о нахождении спектра адронов. Квантовая хромодинамика, на основе которой было достигнуто определенное понимание адронных процессов на малых расстояниях, при решении этой проблемы сталкивается с непреодоленными пока трудностями.

Среди составных моделей адронов большое развитие получила модель мешков. В ней составляющими объектами являются цветные кварки, движущиеся внутри мешка квазинезависимым образом. Требование удержания кварков внутри адронов обеспечивается выполнением граничных условий на поверхности мешка. Остаточное кварк-глюонное взаимодействие учитывается методами теории возмущений.

В последние годы в связи с изучением процессов глубоконеупругого рассеяния лептонов на адронах и необходимостью учета степенных поправок к выражениям, полученным в рамках теории возмущений КХД, приобрела особую важность задача о вычислении структурных функций в модели мешков. Однако, как известно, вычисление структурных функций в этой модели встречается с проблемой расходимости ряда, учитывающего вклад морских кварков. Причем, как было показано, эта трудность свя-



зана с выбором граничных условий на поверхности мешка в том же виде, что и в случае бесконечного потенциального барьера.

В этой связи несомненный интерес представляет изучение моделей мешков с другими формами граничных условий, которые могут быть связаны с выбором потенциалов запираания кварков внутри адронов в виде, отличающемся от прямоугольной потенциальной ямы.

Следует также отметить, что наибольшего успеха модель мешков добилась при объяснении свойств легких адронов. Для описания адронных состояний с большой массой может оказаться полезным исследование в квантовой хромодинамике взаимодействия кварков с помощью методов квазиклассического разложения, в котором в качестве нулевого приближения используется классическое решение уравнений Янга-Миллса с источниками. Однако для этой цели может быть выбрано не всякое решение. Неустойчивые классические решения не могут аппроксимировать квантовое решение, поэтому одним из принципов отбора решений, пригодных для квантования, является критерий устойчивости.

Цель работы состоит в разработке модели мешков с граничными условиями, которые связаны с выбором потенциалов удержания кварков в виде, отличающемся от прямоугольной ямы; в нахождении решений этой модели в частном случае линейного запирающего потенциала; в применении полученных результатов для исследования энергетического спектра адронов, их статических свойств и характера зависимости структурных функций глубокоэластичных процессов; в исследовании решений классических уравнений Янга-Миллса с источниками.

Научная новизна и практическая ценность

Впервые предложена модель мешков, в которой граничные условия удержания кварков связаны с выбором запирающего потенциала общего вида. Сформулированы уравнения и граничные условия такой модели.

С помощью теории размерностей исследована модель мешков со степенными запирающими потенциалами. В частности, получены массовые формулы для радиальных возбуждений легких адронов. На основе этих формул вычислен спектр масс радиальных возбуждений ρ -мезона.

В модели мешков с линейным запирающим потенциалом в статическом приближении вычислены в двумерном случае структурные функции в глубокоэластичном пределе. Получен спектр квантовых флуктуаций около статического решения модели. В четырехмерном случае вычислен спектр масс легких адронов.

Спектр масс возбужденных состояний ρ -мезона и тяжелых Ψ - и Υ -мезонов вычислен в релятивистской модели квазинезависимых кварков с использованием предположения о независимости сил, удерживающих кварки, от типа кварков. На основе этого предположения вычислен также спектр масс мезонов с открытыми квантовыми числами чарма и прелести.

На основе метода коллективных координат Н.Н.Боголюбова в диссертации предложен новый способ исследования в пределе сильной связи проблемы устойчивости произвольных решений классических уравнений Янга-Миллса с источником. Изложенный метод позволяет при построении квазиклассического разложения в окрестности этих решений гарантировать выполнение законов симметрии, связанных с калибровочной группой.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. В модели квазинезависимых кварков с помощью решения уравнения Дирака найден спектр масс векторных мезонов (ρ -, Ψ - и Υ -мезонов) с использованием предположения о независимости потенциала от типа (аромата) кварков.

2. Получен в тех же предположениях спектр масс мезонов с открытыми квантовыми числами чарма и прелести, т.е. являющихся связанными состояниями кварков с различными ароматами и массами. Получен ряд предсказаний значений масс возбужденных состояний таких мезонов. Вычислены магнитные моменты барионов.

3. Сформулированы граничные условия модели мешков, обеспечивающие невылетание кварков, в случае запирающего скалярного потенциала про-

извольной формы. В статическом приближении получено решение для частного случая линейного запирающего потенциала. С использованием найденного решения вычислены в двумерной модели структурные функции частиц. Показано наличие свойства скейлинга в глубоконеупругом пределе и выявлены особенности поведения функций распределения кварков, характерные для случая линейного потенциала. Изучено влияние учета трансляционной симметрии на вид вычисленных в модели структурных функций.

4. В рамках модели мезонов с запирающим потенциалом степенного роста на основе размерных соотношений получены массовые формулы для радиальных возбуждений легких адронов, которые затем используются для нахождения спектра масс радиальных возбуждений ρ -мезона. Получен спектр масс легких адронов.

5. Метод коллективных координат Н.Н.Боголюбова применен для исследования устойчивости классических решений уравнений Янга-Миллса с источником. Установлено, что в случае, когда вектор цветового заряда источника ориентирован в определенном направлении в пространстве цветов, решения, не обладающие свойством полной экранировки цветового заряда источника, неустойчивы. Показано, что применение этого критерия устойчивости важно для отбора решений классических уравнений Янга-Миллса, пригодных для использования в составных моделях элементарных частиц.

Апробация диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований и Математического института имени В.А. Стеклова АН СССР, на конференции молодых ученых МИАН (1981 г.), на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР (1980, 1981 гг.).

Публикация

По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения, содержит 94 страницы машинописного текста, 2 рисунка и библиографический список из 120 наименований.

Содержание работы

Во введении приведен обзор работ, посвященных составным моделям элементарных частиц, и результатов, полученных в них. Подчеркивается важность принципов релятивистской и калибровочной инвариантности, квазинезависимого характера движения составляющих частиц. Дано краткое содержание диссертации.

В первой главе, в § 1, изложена формулировка модели мезонов, приведены уравнения и граничные условия этой модели. Обсуждается роль инвариантности модели относительно калибровочных преобразований и преобразований группы Пуанкаре.

В §§ 2-4 обсуждаются свойства решений двумерной модели мезонов, использующей приближение, когда кварк-глюонное взаимодействие отсутствует, и свойства четырехмерной модели в статическом приближении. Приведена формулировка теории возмущений для учета взаимодействия кварков с глюонами. Обсуждается также область применимости указанных решений.

В § 5 построено обобщение модели мезонов на случай произвольных запирающих потенциалов. Лагранжиан модели задан в форме

$$\mathcal{L} = \frac{i}{2} \bar{\Psi} \gamma^m \partial_m \Psi - U(\{g_a(t, \vec{z})\}) \bar{\Psi} \Psi - B \theta_{\text{Bag}}(\vec{z}), \quad \text{а}$$

уравнения движения и граничные условия имеют вид

$$[i \gamma^m \partial_m - U(\{g_a(t, \vec{z})\})] \Psi(\vec{z}, t) = 0, \\ \Psi(\vec{z}, t) \xrightarrow{|\vec{z}| \rightarrow \infty} 0,$$

$$\sum_{\alpha} \int d\vec{z} \frac{\partial U}{\partial g_{\alpha}} \frac{\delta g_{\alpha}}{\delta V} \bar{\psi} \psi = -B.$$

Динамическими переменными в данной модели являются поле кварков ψ и набор параметров $\{g_{\alpha}(t)\}$ потенциала $U(\{g_{\alpha}(t)\}, \vec{z})$, где последние величины определяют динамику поверхности мешка. Показано, что эта модель соответствует представлению о существовании переходного слоя между средами внутри и вне мешка.

Вторая глава посвящена исследованию двумерной модели мешков с линейным запирающим потенциалом.

В § 6 построено решение модели в статическом случае ($g(t) = g_0$):

$$\Psi(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n e^{-i\omega_n \sqrt{g_0} t} \begin{pmatrix} C_n(\sqrt{g_0} z) \\ -S_n(\sqrt{g_0} z) \end{pmatrix} + d_n^* e^{i\omega_n \sqrt{g_0} t} \begin{pmatrix} C_n^*(\sqrt{g_0} z) \\ -S_n^*(\sqrt{g_0} z) \end{pmatrix},$$

где $\omega_n = \sqrt{2n}$ и введены обозначения:

$$C_n(z) = \frac{\Phi_n(z) + i\Phi_{n-1}(z)}{2}; \quad S_n(z) = \frac{\Phi_n(z) - i\Phi_{n-1}(z)}{2i};$$

$$\Phi_n(z) = \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \frac{H_n(z)}{\|H_n\|} \quad - \text{ функция параболического цилиндра, } H_n \quad - \text{ полином Чебышева-Эрмита.}$$

С использованием полученного решения вычислены структурные функции неупругого лептон-адронного рассеяния. Вывод формул приводится в приложении. Показано, что в глубоконеупругом пределе модель мешков с линейным запирающим потенциалом обладает свойством масштабной инвариантности. Построены функции распределения валентных кварков внутри адрона:

$$f_v(x) = \frac{M}{8\pi} \left\{ |\Phi_1(y_1^+) - \Phi_0(y_1^+)|^2 - |\Phi_1(y_1^-) - \Phi_0(y_1^-)|^2 \right\} \frac{\theta(1-x)}{1-x},$$

и морских кварков:

$$f_s(x) = \frac{M}{8\pi} \left\{ |\Phi_1(y_1^-) - \Phi_0(y_1^-)|^2 + 2 \sum_{n=2}^{\infty} \exp[-(\bar{z}_n - z_1)^2 M x] |\Phi_n(y_n^-) - \Phi_{n-1}(y_n^-)|^2 \right\} \frac{\theta(1-x)}{1-x},$$

$$\text{где } y_n^{\pm} = \omega_n \pm M \ln(1-x); \quad \bar{z}_n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(n+1 - \frac{1}{4n} \right)}.$$

Показано, что учет трансляционной инвариантности ведет к замене в выражениях для функций распределения величины x на $-\ln(1-x)$, где $x = -Q^2/2PQ$ - скейлинговая переменная.

В § 7 приведено доказательство этого факта, которое опирается лишь на инвариантность исходной модели относительно преобразований группы Пуанкаре и не зависит от конкретного вида найденного в статическом приближении решения.

В § 8 для выбранного вида гамильтониана модели построена теория возмущений и получен спектр флуктуаций поля около решения нулевого приближения. Особое внимание уделено точному учету свойств симметрий исходного лагранжиана модели.

В третьей главе в четырехмерных составных моделях получены результаты, которые применяются для описания свойств адронов.

В § 9 с использованием теории размерностей проведено сравнение различных моделей мешков с запирающими потенциалами степенного роста и установлены массовые формулы, соответствующие этим типам потенциалов, для спектра масс радиальных возбуждений легких адронов. Вычислен спектр радиальных возбуждений ρ -мезона. Получены следующие значения масс: $M_{\rho^+} = (1,6)$, $M_{\rho^0} = (2,25)$. Вычислен спектр масс легких адронов в модели мешков с линейным запирающим потенциалом.

Известно, что сферическое статическое приближение модели мешков не является согласованным при наличии у кварков ненулевой массы. В § 10 рассматривается релятивистская потенциальная модель квазинезависимых кварков, которая позволяет обойти эту трудность. В этой модели одночастичная волновая функция кварка удовлетворяет уравнению Дирака:

$$\{\gamma_0 E + i(\vec{\gamma} \vec{V}) - M - V(\vec{z})\} \psi = 0.$$

Потенциал выбран в виде суммы кулоновского члена и скалярного линейно растущего с расстоянием слагаемого $V(r) = -\frac{\alpha_s}{r} + \beta r$. Предположение о независимости взаимодействия, удерживающего кварки внутри адрона, от сорта кварка и выбор константы сильного взаимодействия, меняющейся с энергией, как предписывается квантовой хромодинамикой, позволяют описать спектр масс векторных ρ -, ψ - и χ -мезонов. В частности, как и в § 9, получается значение $M_{\rho} = (1,6)$ для энергии первого радиального возбужденного уровня ρ -мезона.

При тех же предположениях и тех же значениях параметров потенциала с помощью введения понятия "усредненного" кварка вычислены спектры масс D -, (ψ_u) -, (ψ_c) -мезонов, составленных из кварков различной массы. Предсказываются для основных состояний этих частиц значения энергий: D (1,9 ГэВ); ψ_u (5,03 ГэВ); ψ_c (6,26 ГэВ).

Используемая модель квазинезависимых кварков позволяет исследовать статические свойства барионов. В этом же параграфе приведены результаты вычислений магнитных моментов и электромагнитных радиусов октета барионов.

В четвертой главе предложен новый метод исследования устойчивости решений, удовлетворяющих классическим уравнениям Янга-Миллса с источниками:

$$\partial_\nu F_{\mu\nu} - ig[A_\nu, F_{\mu\nu}] = -g\delta_{\mu 0} J(\vec{x}).$$

Показано, что в пределе сильной связи устойчивыми классическими решениями указанной задачи являются лишь решения, обеспечивающие полную экранировку цветового заряда источника. Приведен пример использования полученного критерия.

В заключении кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в работах

1. А.Е. Дорохов. Расчет спектра мезонов в кварковой модели. Сообщение ОИЯИ, P2-12159, Дубна, 1979.
2. А.Е. Dorokhov, A.V. Sidorov. Bag Model with Linear Confining Potential /Модель мешков с линейным запирающим потенциалом/. Препринт ОИЯИ, E2-80-525, Дубна, 1980.
3. А.Е. Dorokhov. The Hadron Properties within the Model of Quasi-Independent Quarks /Свойства адронов в модели квазинезависимых кварков/. Препринт ОИЯИ, E2-80-710, Дубна, 1980.
4. А.Е. Дорохов. Вычисление радиуса нейтрона в модели мешков с линейным запирающим потенциалом. Сообщение ОИЯИ, P2-81-501, Дубна, 1981.
5. П.Н. Боголюбов, А.Е. Дорохов. Модель мешков со степенным запирающим потенциалом. Препринт ОИЯИ, P2-81-833, Дубна, 1981; ЯЭ, 1982, т. 36, вып. 4(10), стр. 957-964.
6. П.Н. Боголюбов, А.Е. Дорохов. Об устойчивости классических решений уравнений Янга-Миллса с источником. ТМФ, 1982, т. 51, № 2, стр. 224-233.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 октября 1982 года.