

Ч-596

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.12.01

539.142.2

2-85-501

ЧИЖОВ

Алексей Владимирович

МОДЕЛИ КВАРКОВЫХ МЕШКОВ  
И ОПИСАНИЕ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ  
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:  
доктор физико-математических наук,  
профессор

В.А. МАТВЕЕВ

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

А.С. ШУМОВСКИЙ

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Р.Н. ФАУСТОВ

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

А.И. ТИТОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Математический институт АН СССР им. В.А. Стеклова

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1985 года.  
Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1985 года  
на заседании Специализированного совета КО47.01.01 Лаборатории  
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-  
ний, г. Дубна, Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

В.И. КУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

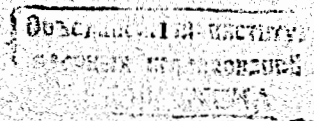
Проблема построения составных моделей частиц занимает важное место в современной физике микромира. Обусловлено это прежде всего тем, что стремительное развитие ускорительной техники за последние десятилетия привело к открытию весьма большого числа элементарных частиц. Естественно было предположить, что не все вновь открываемые частицы могут претендовать на роль фундаментальных. Именно в связи с этим и возникла необходимость в разработке классификационных схем и на их основе теоретических моделей составных частиц.

Важнейшим является вопрос о динамическом описании составных систем. Существенный вклад в это направление внесли работы Н.Н. Боголюбова и его учеников Б.В. Струминского, А.Н. Тавхелидзе и других, в которых были заложены основы описания адронов как связанных состояний кварков.

Особое место в развитии динамических кварковых моделей занимает модели мешков, основные принципы которых были сформулированы П.Н. Боголюбовым в подходе квазинезависимых кварков. В модели мешков конформизм (невыветание цветных объектов) вводится граничными условиями для кварковых и глюонных полей на поверхности мешка. Это обстоятельство позволяет обойти ряд трудностей, имеющихся в квантовой хромодинамике, и, в частности, описать спектроскопию адронов.

В вычислениях формфакторов и других характеристик адронов обычно пользуются приближением статической полости (неподвижного мешка). Конечно, в таком приближении не учитываются эффекты отдачи, что приводит к несохранению импульса (нарушению трансляционной инвариантности решения), и поэтому актуальной является задача об учете движения центра масс. Кроме того, целесообразно рассмотреть различные возбуждения, связанные с изменением объема и формы кваркового мешка.

Хотя существующие опытные данные об элементарных частицах не дают прямых свидетельств о составной природе кварков и лептонов, тем не менее, рассмотрение внутренней структуры фундаментальных частиц представляется неизбежным, если принять во внимание тенденцию развития объединенных калибровочных теорий, которые претендуют на описание процессов, происходящих на расстояниях вплоть до планковс-



кой длины ( $\sim 10^{-33}$  см.). В связи с этим построение моделей составных кварков и лептонов вызывает определенный интерес. Пробразом этих моделей могут служить составные кварковые модели элементарных частиц и, в частности, модель кваркового мешка.

В настоящее время в релятивистской ядерной физике и квантовой теории поля значительное внимание уделяется исследованию проблемы существования новых состояний кварк-глюонной материи и условий перехода из нуклонной фазы в такие состояния. Начало этой деятельности было положено в Дубне экспериментальным обнаружением кумулятивного рождения мезонов, которое подтвердило предсказание А.М. Балдина о наличии в ядрах мультикварковых примесей. Существованием в ядрах состояний с шестью и, возможно, с девятью кварками, локализованными в компактные объекты, пытаются объяснить эксперименты ЕМС и SLAC. Очевидно, что ядра, содержащие мультикварковые примеси, уже не могут рассматриваться как однородные по фазе системы, иначе говоря, они находятся в гетерофазном состоянии. Поэтому исследование модели существующих мультикварковых кластеров, которые могут быть описаны в терминах кварковых мешков, представляется весьма актуальным.

Цель работы состоит в развитии формализма модели кварковых мешков и применении его к описанию свойств адронов, построению составных моделей кварков и лептонов, а также к описанию гетерофазных состояний в ядерной материи.

#### Научная новизна и практическая ценность работы

Предложен новый способ выделения движения центра масс кваркового мешка на основе метода канонических преобразований Н.Н. Боголюбова.

С помощью релятивистски-ковариантных решений солитонной модели мешков рассчитаны различные характеристики протона. Изучается роль эффекта отдачи в процессах электромагнитного рассеяния.

Впервые указано на возможное изменение объема и формы адронов под действием магнитного поля — магнитострикцию. В терминах модели мешков оценен вклад этого эффекта в магнитную поляризуемость адронов.

Для описания составных кварков и лептонов предложена динамическая модель преонного мешка. Сформулировано условие компенсации больших флуктуаций энергии мешка в пределе малых его размеров.

Построена статистическая модель для описания мультибарионных состояний в ядерной материи. В рамках этой модели впервые исследованы гетерофазные смеси таких состояний. Практически важным результатом является вывод о том, что гетерофазные состояния термодинамически выгодны при определенных значениях температур и плотностей.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. На основе решения солитонной модели мешка Фридберга — Ли, полученного в рамках ковариантной теории возмущений, вычислены электрический, магнитный и аксиальный формфакторы и связанные с ними статические характеристики протона. Выделены вклады, обусловленные эффектом отдачи. В частности, возникающая большая положительная поправка к значению магнитного момента протона существенно улучшает результат MIT — модели мешков и приводит к хорошему согласию с экспериментом.

2. Указан возможный механизм генерации магнитной поляризуемости адронов — магнитострикция, — связанный с непертурбативными эффектами в квантовой хромодинамике. С помощью модели кваркового мешка MIT сделаны оценки вкладов в магнитную поляризуемость протона, нейтрона и заряженного пиона вследствие явления магнитострикции.

3. Предложена динамическая модель преонного мешка малых размеров для составных кварков и лептонов. Сформулировано условие компенсации, обеспечивающее малость киральных нарушений и осуществляющее квантование размеров и энергетических уровней составной системы. Получены выражения для магнитных моментов составных фермионов.

4. Сформулирована статистическая модель мультикварковых кластеров для описания ядерной материи и фазовых переходов в ней. Показана существенная роль гетерофазного состояния "нуклоны + мультикварки" в двух- и четырехфазной системе в широком интервале температур и плотностей.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, во Всесоюзном научно-исследовательском центре поверхности и вакуума, а также на УП Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1984 г.) и на III Международном симпозиуме по избранным проблемам статистической механики (Дубна, 1984 г.).

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 работ.

#### Объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 105 страниц машинописного текста, 17 рисунков. Библиографический список включает 130 ссылок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обзор литературы, посвященной составным моделям адронов, а также кварков и лептонов. Обсуждаются проблемы, существующие в этих моделях. Подчеркивается важность учета гетерофазных смесей в ядрах при их релятивистском рассеянии. Сформулирована цель работы и изложено ее краткое содержание.

В первой главе, в § I, на основе релятивистски-ковариантных решений солитонной модели мешка Фридберга - Ли вычислены электрический, магнитный и аксиальный формфакторы протона и связанные с ними статические характеристики. Проведено сравнение результатов, полученных в релятивистски-ковариантном подходе и в приближении статической полости. Показано, что большая положительная поправка к магнитному моменту протона, вычисленному в статическом приближении,

$$\Delta \mu_p = \frac{e}{2M} \int dx \cdot x^2 \left[ j_0^2(x) - \frac{1}{3} j_1^2(x) \right] \approx 0,65 \frac{e}{2M}, \quad (1)$$

приводит к значительно лучшему согласию с экспериментом:

$\mu_{\text{эксп}} = 2,79 \mu_N$ ; при фитировании параметров по электромагнитному радиусу протона  $\mu = 2,79 \mu_N$ , по центроидной массе нуклона и  $\Delta$  - изобары -  $\mu = 2,62 \mu_N$ , где  $\mu_N = e/2M_p$  ядерный магнетон.

В § 2 сделаны оценки вкладов в магнитную поляризуемость нуклонов и заряженного пиона, связанные с эффектом магнитоэлектрики адронов. Этот эффект продемонстрирован в терминах модели кваркового мешка MIT в присутствии слабого однородного магнитного поля  $\vec{H}$ . В случае нуклонной системы, описываемой статической сферически-симметричной полостью, заполненной кварковыми и глюонными полями, объем кваркового мешка испытывает следующее относительное изменение:

$$\frac{\delta V}{V} \approx -\frac{1}{M} (\vec{H} \vec{\mu}) \quad (2)$$

Вследствие подобной реакции объема на внешнее магнитное поле получен дополнительный вклад в магнитную поляризуемость нуклона

$$\Delta \beta_H \approx \frac{\alpha (\mu/\mu_N)^2}{12 M^3}, \quad (3)$$

где  $\alpha \approx 1/137$  - постоянная тонкой структуры. Для бесспиновых частиц учитывалась деформация поверхности кваркового мешка, определяющая спектр возбуждений при отличном от нуля орбитальном моменте. Для

пиона соответствующий вклад определяется выражением

$$\Delta \beta_H \approx \frac{3\alpha}{64\pi B x_1^2} \left( \frac{16\pi B}{3m_{A_1}} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

в котором  $x_1 \approx 3,84$ , что отвечает  $1\rho_{1/2}$  состоянию кварка в мешке,  $B^{1/4} = 145 \text{ МэВ}$  - константа кваркового мешка, а  $m_{A_1} \approx 1100 \text{ МэВ}$  - масса  $A_1$ -мезона. Получаемые вклады примерно на порядок меньше экспериментальных значений поляризуемостей, и, таким образом, явление магнитоэлектрики не исключается экспериментом.

Во второй главе предложена модель мешка для описания составных кварков и лептонов.

В § 3 рассмотрена составная система, выражение для массы которой в зависимости от ее радиуса в общем случае имеет вид

$$M(R) = \frac{1}{R} I[\alpha(R)] + a \Lambda e^{-c/\alpha(R)} \quad (5)$$

Здесь безразмерная функция  $I[\alpha(R)]$  представима некоторым (асимптотическим) рядом по степеням перенормированной константы взаимодействия  $\alpha(R)$ , а второй член описывает вклад непертурбативных эффектов. Чтобы исключить большие флуктуации энергии в пределе малых размеров системы, предлагается следующее условие компенсации:

$$I[\alpha(R)] = 0 \quad (6)$$

Уравнение (6) относительно  $R$ , с одной стороны, приводит к малым отклонениям от точной киральной симметрии ( $M \rightarrow 0$  при  $R \rightarrow 0$ ), а с другой - к своеобразному квантованию допустимых значений радиуса составной системы и спектра ее масс.

В § 4 продемонстрировано решение проблемы выделения коллективного движения в модели кваркового мешка ( $MR > 1$ ). Показано, что в этом случае решение сводится к переопределению константы  $Z_0$ , учитывающей эффект нулевых колебаний в вакууме.

В § 5 разработана модель мешка малых размеров ( $R \ll M^{-1}$ ) для преонов-элементарных составляющих кварков и лептонов. Масса составного фермиона определена выражением

$$M^2 = \left[ \frac{4\pi R^3}{3} B_{\text{HC}} + \frac{A[\alpha(R)]}{R} \right]^2 - \frac{C[\alpha(R)]}{R^2}, \quad (7)$$

где  $A[\alpha(R)]$ ,  $C[\alpha(R)]$  - некоторые безразмерные функции перенормированной константы гиперцветового взаимодействия, а  $B_{\text{HC}}$  - константа преонного мешка. С помощью условия компенсации, в этом случае имеющего вид

$$I[\alpha(R)] = |A^2[\alpha(R)] - C[\alpha(R)]|^{1/2} = 0, \quad (8)$$

найден спектр масс составных фермионов

$$M \approx R \left( \frac{16\pi A[\alpha] B_{НС}}{3} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Исследована устойчивость системы в окрестностях решений условия компенсации (8).

В § 6 благодаря корректному учету коллективного движения системы в пределе малых ее размеров получено выражение для оператора магнитного момента составного фермиона

$$\mu = A[\alpha] \sum_i \frac{e_i}{\omega_i} (\sigma_z + \ell_z)_i - Q L_z, \quad (10)$$

где  $\omega_i$  - собственная частота преонного поля в мешке,  $e_i$  - заряд преона,  $\sigma_z$  и  $\ell_z$  - операторы спина и орбитального момента преона, а  $Q$  и  $L_z$  - заряд и оператор орбитального момента составного фермиона; сумма берется по всем преонам в системе.

В § 7 для модели ризионов Харари построены волновые функции фермионов первого поколения и с помощью оператора магнитного момента (10) рассчитаны величины их магнитных моментов. Показано, что в модели Харари не удастся получить требуемых значений магнитных моментов одновременно для всех составных фермионов.

В третьей главе исследовалась проблема фазового перехода из нуклонного состояния в мультикварковые. Обсуждена также возможность возникновения гетерофазной смеси "нуклоны + мультикварки" в ядерной материи.

В § 8 изложены основные положения теории гетерофазных состояний. Приведен способ описания мультикварковых состояний в модели кварковых мешков. Сформулирована статистическая модель сосуществующих мультикварковых кластеров для описания свойств ядерной материи.

В § 9 исследовано основное состояние ( $\theta = 0$ ) в двухфазной модели "нуклоны + шестикварки" с изменением плотности системы. Вычислены удельные свободные энергии различных фаз и фазовые концентрации. Показана термодинамическая выгодность гетерофазного состояния на большом интервале плотностей системы.

В § 10 рассмотрена та же двухфазная модель на всей плоскости температура - плотность. Получены уравнения для расчета фазовых концентраций. Найдена асимптотика решений этих уравнений для нуклонной концентрации

$$W \approx 1 - \frac{\pi^2}{8} \frac{1}{v - v_3} \frac{1}{\theta^3}, \quad (11)$$

при  $\theta \rightarrow \infty$  (здесь  $\frac{1}{3} v$  - удельный объем системы, а  $v_3$  - объем ядра нуклонов). Определена также температура минимума нуклонной концентрации

$$\theta = \frac{2}{3} (M_6 - 2M_3) = 190 \text{ МэВ.}$$

Отмечается сильная зависимость результатов модели от параметризации масс кластеров. В системе с нулевой температурой и нормальной ядерной плотностью (0,17 нуклон/Фм<sup>3</sup>) сделаны оценки масс шестикварков, при которых получаются заданные значения концентрации шестикварковой компоненты.

В § 11 изучалась четырехфазная модель на всем интервале температур и плотностей. Рассмотрено поведение концентраций девяти - и двенадцатикварков в ядерной материи. Показано, что учет девятикварковой компоненты в гетерофазной смеси является необходимым.

В заключении дано краткое обсуждение основных результатов работы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Матвеев В.А., Чижов А.В. О магнитоэлектрици кваркового мешка и поляризуемости адронов. - Сообщение ОИЯИ, Р2-83-83, Дубна, 1983.
2. Назмитдинов Р.Г., Чижов А.В., Шумовский А.С. О сосуществовании адронной и мультикварковых фаз в ядерной материи. - В кн.: Тезисы докладов XXXIV совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алма-Ата, 17-20 апреля 1984 г. "Наука", Л., 1984, с. 193.
3. Балдин А.М., Назмитдинов Р.Г., Чижов А.В., Шумовский А.С., Юкалов В.И. О гетерогенных состояниях в ядерной материи. - В кн.: Труды УП Международного семинара по проблемам физики высоких энергий (19-23 июня 1984 г., Дубна). ОИЯИ, Д1,2-84-599, Дубна, 1984, сс.531-543.
4. Назмитдинов Р.Г., Чижов А.В. О нуклон-шестикварковом состоянии в ядерной материи. - В кн.: III Международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 22-26 августа 1984 года. Сборник аннотаций. ОИЯИ, Д17-84-407, Дубна, 1984, с. 91.

5. Балдин А.М., Назмитдинов Р.Г., Чижов А.В., Шумовский А.С., Юкалов В.И. О сосуществовании адронного и шестикваркового фазовых состояний в ядерной материи.- ДАН СССР, 1984, Т. 279, № 3, сс. 602-606.
6. Chizhov A.V., Dorokhov A.E. On the role of a recoil effect in the bag model.  
(О роли эффекта отдачи в модели мешков).- Препринт ОИЯИ, E2-84-835, Дубна, 1984.
7. Матвеев В.А., Чижов А.В. Модель мешка для преонов.- Препринт ОИЯИ, P2-85-152, Дубна, 1985.
8. Chizhov A.V., Nazmitdinov R.G., Shumovsky A.S., Yukalov V.I. Behaviour of nucleon-sixquark system on temperature-density plane.  
(Поведение нуклон-шестикварковой системы на плоскости температура-плотность).- Краткие сообщения ОИЯИ, № 7-85, Дубна, 1985, сс.45-50.
9. Назмитдинов Р.Г., Чижов А.В., Шумовский А.С., Юкалов В.И. Статистическая модель сосуществующих мультикварковых кластеров.- Препринт ОИЯИ, P2-85-294, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июля 1985 года.