



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И 20

2-89-78

УДК 539.126.3

ИВАНОВ

Михаил Алексеевич

**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ
С КОНФАЙНМЕНТОМ
И НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА АДРОНОВ**

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

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

Дубна, 1989

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

НОВОЖИЛОВ
Юрий Викторович

доктор физико-математических наук
профессор

АРБУЗОВ
Борис Андреевич

доктор физико-математических наук
профессор

ФАУСТОВ
Рудольф Николаевич

Ведущая организация - Физический институт АН СССР
им. П.Н.Лебедева, Москва

Защита диссертации состоится "___" _____ 1989 г. на заседании
специализированного совета Д047.01.01 Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Москов-
ской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

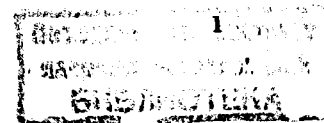
Автореферат разослан "___" _____ 1989 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук


В.И. ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы определяется проблемой описания низкоэнергетической физики адронов на основе фундаментальных представлений квантовой хромодинамики. В области высоких энергий можно использовать теорию возмущений квантовой хромодинамики благодаря свойству асимптотической свободы. В области низких энергий эффективная кварк-глюонная константа связи растет, что делает невозможным применение теории возмущений. Кроме того, в этой области квантовая хромодинамика испытывает существенные модификации по сравнению с первоначальным содержанием: ее фундаментальные составляющие, кварки и глюоны, не наблюдаются на эксперименте. Данное свойство получило название цветного конфайнмента. Вместо них имеется огромное количество бесцветных адронов, взаимные превращения которых являются предметом теоретического и экспериментального изучения. Трудности, связанные с применением квантовой хромодинамики к описанию физики низких энергий, привели к развитию различных моделей и подходов, которые, основываясь на фундаментальных представлениях КХД, позволяют вычислять наблюдаемые характеристики адронных процессов при низких энергиях. Как правило, существующие подходы проблему конфайнмента вообще никак не рассматривают. Исключение составляют модели мешков, которые имеют довольно ограниченную область применимости. Успех развиваемых подходов при описании экспериментальных данных создал впечатление о том, что конфайнмент не является существенным в низкоэнергетической физике. По-видимому, такое наблюдение справедливо при рассмотрении статических адронных характеристик, таких, как массы, радиусы, ширины распадов и т.п. Описание данных эффектов не зависит от представления о внутренней структуре адрона. Именно по этой причине большое применение нашли киральные теории, в которых адроны описываются локальными полями, а их взаимодействие определяется динамической симметрией. Однако описание более тонких свойств адронов, таких, как формфакторы, фазы рассеяния и т.п., требует знания о поведении кварков, составляющих адрон, в области больших расстояний. На наш взгляд, поведение кварков в этой области должно определяться динамическим механизмом их конфайнмента. Поэтому актуальной задачей в изучении внутренней структуры адронов является учет свойств кваркового конфайнмента при описании эффектов низкоэнергетической адронной физики.



Целью диссертации является построение релятивистской кварковой модели с учетом конфайнмента, которая с единых позиций позволяет описывать кварковую структуру адронов и ее последующее применение к описанию низкоэнергетических процессов с участием как мезонов, так и барионов.

Научная новизна. В диссертации открыто новое направление в теории сильных взаимодействий – развит единый подход к описанию низкоэнергетических адронных взаимодействий, основанный на определенных представлениях об адронизации и конфайнменте. Адроны рассматриваются как коллективные бесцветные возбуждения в кварк-глюонных взаимодействиях. Предполагается, что конфайнмент кварков обеспечивается усреднением по вакуумным конфигурациям глюонного поля.

На основе данных представлений сформулирована релятивистская кварковая модель адронов с учетом конфайнмента, названная моделью конфайнированных кварков – МКК, которая применяется для описания низкоэнергетических адронных процессов с целью изучения внутренней структуры адронов при низких энергиях. Модель позволяет единым образом изучать как простейшие двухкварковые состояния (мезоны), так и более сложные образования (многокварковые состояния и адроны с экзотической структурой – глюболы, гибриды и т.п.).

Показано, что при нулевых энергиях МКК воспроизводит низкоэнергетические соотношения, полученные в киральных теориях, и, кроме того, позволяет описывать импульсную зависимость физических матричных элементов (параметры наклона, формфакторы, фазы рассеяния и т.д.).

В рамках развитого подхода рассмотрено большинство эффектов низкоэнергетической физики мезонов: вычислены ширины распадов векторных, псевдоскалярных, аксиальных и скалярных мезонов, получено поведение электромагнитных и слабых формфакторов псевдоскалярных мезонов, исследована структура нелептонных взаимодействий каонов, вычислены значения поляризуемостей пионов, с помощью анализа многочастичных процессов и распадов скалярных мезонов исследованы свойства скалярных мезонов и показана их роль в низкоэнергетической физике. Показана ограниченность трактовки скалярных мезонов как простейших двухкварковых состояний.

Среди результатов следует выделить те, которые получены в связи с выполняемыми или планируемыми экспериментами по изучению внутренней структуры адронов:

1. Вычислены параметры наклона в дельта-распадах $P \rightarrow \gamma \rho^+ \rho^-$ и ширины редких распадов псевдоскалярных мезонов $P \rightarrow \rho^+ \rho^-$. Эти величины характеризуют внутреннюю структуру нейтральных псевдоскалярных мезонов.

2. Вычислены значения электрической и магнитной поляризуемостей пионов и сечение фоторождения пиона в кулоновском поле ядра.

3. Получено отношение аксиального и векторного формфактора в электрослабом распаде $\pi \rightarrow e \nu \gamma$. Последующие экспериментальные измерения этой величины подтвердили полученное значение.

4. В связи с планируемыми экспериментами по наблюдению и измерению времен жизни легких димезоатомов ($(\pi\pi)$ и (πK)) вычислены их основные характеристики: время жизни, значение энергии основного состояния и лэмбовского сдвига.

Впервые в рамках единого динамического подхода к описанию кварковой структуры адронов рассмотрена низкоэнергетическая физика нуклона и Δ -изобары как трехкварковых систем. Вычислены статические характеристики нуклона и Δ -изобары и получено поведение электромагнитных формфакторов в низкоэнергетической области. Получены сильные мезон-нуклонные формфакторы, определяющие нуклон-нуклонный потенциал.

Предложена кварк-дикварковая аппроксимация трехкварковой структуры нуклона и в ее рамках вычислены фазы NN -рассеяния.

Практическая ценность. Результаты исследований, на которых основана диссертация, уже нашли применение при описании различных эффектов низкоэнергетической физики адронов. Результаты расчетов параметров наклона переходных формфакторов дельта-распадов и ширины редких распадов нейтральных псевдоскалярных мезонов использовались в соответствующих экспериментах по их измерению (установка "Лептон-Ф", ИФВЭ); результаты расчетов поляризуемостей пионов и сечения фоторождения пиона в кулоновском поле ядра использовались в эксперименте на установке "Сигма-АЯКС" (ОИИИ, ИФВЭ); вычисленное значение отношения аксиального и векторного формфакторов в электрослабом распаде пиона было впоследствии подтверждено в экспериментах на мезонных фабриках SIN (Швейцария) и LAMPF (Канада); рассчитанные характеристики легких димезоатомов могут быть использованы в будущих экспериментах по их измерению на установке "Позитроний" (ОИИИ-ИФВЭ); рассмотренная возможность глюобольной интерпретации скалярного G (1590)-мезона оказалась полезной для обсуждения результатов экспериментов по его наблюдению (спектрометр ГМС, ИФВЭ-ЦЕРН).

Кварковое описание сильных нуклонных формфакторов, выполненное в МКК, дает возможность микроскопического исследования характеристик нуклон-нуклонного взаимодействия, играющего фундаментальную роль в ядерной физике.

Следующим шагом в развитии предложенного подхода является использование более реалистической функции Грина глюона на больших расстояниях и связь ее формы с ядром уравнения типа уравнения Бете-Солпитера

на связанные состояния в бесцветных кварковых системах. Развита схема может быть применена для описания многокварковых состояний (барионы, дибарионы и т.д.) и адронов с экзотической структурой (глюболы, гибриды и т.п.). Перспективной выглядит задача единого описания фундаментальных $\pi\pi$, πN и NN взаимодействий, рассмотрение поляризационных явлений в нуклонной физике и описание нелептонных взаимодействий гиперонов.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Построена релятивистская кварковая модель с учетом конфайнмента. Адроны рассматриваются как коллективные бесцветные возбуждения в кварк-глюонных взаимодействиях. Предполагается, что конфайнмент обеспечивается усреднением по вакуумным глюонным конфигурациям. Модель позволяет с единых позиций описывать низкоэнергетическую физику адронных взаимодействий и изучать эффекты, связанные с проявлением внутренней структуры адронов.

2. Разработаны методы вычислений физических матричных элементов в предложенном подходе. Показано, что при нулевых энергиях модель воспроизводит низкоэнергетические соотношения, полученные в киральных теориях. Кроме этого, модель позволяет изучать импульсную зависимость физических матричных элементов (формфакторы, фазы рассеяния и т.п.).

3. Проведены расчеты большинства эффектов низкоэнергетической физики легких мезонов. Особое внимание уделено роли кварковой структуры мезонов в рассмотренных процессах. Вычислены ширины основных распадов псевдоскалярных, векторных, аксиальных мезонов. Получено поведение пионного формфактора и фазы δ'_1 $\pi\pi$ -рассеяния. Вычислены электромагнитные радиусы каонов и параметры K_{ρ} -распада. Исследованы различные возможности описания слабых нелептонных взаимодействий и объяснения правила $\Delta I=1/2$ в нелептонных распадах каонов. Показано, что изотопическая инвариантность нарушается, в основном, за счет различия параметров, характеризующих u - и d -кварки. Полученные результаты находятся в согласии с экспериментальными данными.

4. В рамках предложенного подхода вычислены характеристики низкоэнергетических процессов с участием легких мезонов, которые являются предметом современных экспериментальных исследований. Вычислены параметры наклона в дельтацезевских распадах псевдоскалярных мезонов и ширины редких лептонных распадов нейтральных псевдоскалярных мезонов. Определено отношение аксиального и векторного формфакторов в электрослабом распаде пиона. С помощью анализа многочастичных процессов и распадов скалярных мезонов исследованы свойства скалярных мезонов. Показана роль легкого ϵ (600)-мезона в низкоэнергетической физике. Сделан

вывод об ограниченности трактовки скалярных мезонов как простейших двухкварковых состояний.

Вычислены значения поляризуемостей пионов и сечения фоторождения пиона в кулоновском поле ядра. Определены основные характеристики релятивистских ($\pi\pi$) и (πN) димезоатомов. Исследована возможность глобальной интерпретации скалярного G (1590)-мезона.

5. Исследованы свойства нуклона и Δ -изобары как трехкварковых систем. Вычислены магнитные моменты, отношение G_A/G_V , электромагнитные радиусы и ширина распада $\Delta \rightarrow p\pi$. Получено поведение электромагнитных и сильных нуклонных формфакторов при низких энергиях. Предложена кварк-дикварковая аппроксимация трехкварковой структуры нуклона и в ее рамках получено поведение фаз NN -рассеяния.

Апробация диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Дубна), Института ядерных исследований АН СССР (Москва), Института теоретической и экспериментальной физики (Москва), Института физики высоких энергий (Протвино), Физического института АН СССР им. П.Н.Лебедева (Москва), Физического института ЧСАН (Прага), Физического института САН (Братислава), на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР 1978-1988 гг, на школе Ленинградского института ядерных исследований (Гатчина, 1979), на Всесоюзном семинаре по программе исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР (Звенигород, 1987), на совещании по нуклонным степеням свободы в ядрах (Гатчина, 1987), на совещании "Инфракрасное поведение в КХД" (Тбилиси, 1988), на Всесоюзных конференциях по теории элементарных частиц (Ташкент, 1985, 1987), на международных конференциях: "Проблемы квантовой теории поля" (Алушта, 1979, 1981, 1984, 1987), "Кварки-80" (Сухуми, 1980), "Проблемы физики высоких энергий и теории поля" (Протвино, 1980, 1988), на международных семинарах по теории малочастичных и кварк-адронных систем (Дубна, 1987), по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1986, 1988), на международных конференциях по физике высоких энергий (Кордобанг, ГДР, 1986), "Адроны-87" (Смоленце, СССР, 1987), по теории элементарных частиц (Аренсхооп, ГДР, 1988).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 42 работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и трех приложений. Она содержит 216 страниц машинописного текста, включающего 30 таблиц, 45 рисунков и библиографический список литературы из 266 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор развития представлений о кварковой структуре адронов, обоснована актуальность проведенного в диссертации исследования и дано краткое изложение содержания работы.

В первой главе излагается схема перехода к бесцветным коллективным переменным в производящем КХД-функционале.

В § I стандартным образом производится разбиение глюонного поля в производящем КХД-функционале на вакуумные глюонные конфигурации и квантовые флуктуации. С помощью тождественных преобразований КХД-функционал представляется в форме, описывающей взаимодействие цветных кварковых токов посредством полной глюонной функции Грина во внешнем вакуумном поле.

В § 2 излагается переход к бесцветным мезонным переменным в полученном КХД-функционале в соответствии с подходом Намбу-Иона-Лазинио. Обсуждается возможность использования более реалистической функции Грина глюона.

В § 3 показывается, что вышеописанная схема перехода к бесцветным мезонным переменным в случае двухкварковых состояний полностью эквивалентна схеме адронизации, основанной на равенстве нулю перенормировки волновой функции мезона, взаимодействующего с соответствующим кварковым током. Данная схема адронизации легко обобщается на случай многокварковых состояний.

Во второй главе формулируются основные положения релятивистской кварковой модели с конфайнментом, названной моделью конфаймированных кварков (МКК). Адроны рассматриваются как коллективные бесцветные переменные в кварк-глюонных взаимодействиях. Предполагается, что конфайнмент обеспечивается усреднением по вакуумным глюонным конфигурациям.

В § I сформулированы основные постулаты МКК. Модель исходит из спектра масс адронов с заданными массами m_H и квантовыми числами J^{PC} . Постулируется кварковый состав адронов и строится лагранжиан взаимодействия адронов с кварками. Константа связи определяется из условия связности.

В § 2 представлена гипотеза о конфайнменте кварков, основанная на определенном представлении об усреднении физических матричных элементов по вакуумным глюонным конфигурациям. Физические величины определяются универсальной функцией конфайнмента, которая является целой аналитической функцией, убывающей достаточно быстро в евклидовой области. Показано, что виртон-кварковая модель (ВКМ) может быть получена из МКК с помощью специального выбора как процедуры усреднения по вакууму, так и формы функции конфайнмента.

В § 3 сформулированы правила вычислений физических матричных элементов в МКК. Они основаны на $1/N_c$ -разложении, которые в случае мезонов эквивалентны разложению по кварковым петлям. Первое приближение по $1/N_c$, или однопетлевое, соответствует древесным диаграммам киральной теории. Отличие состоит в том, что адрон-адронные вершины описываются кварковыми петлями, определяющими структуру адронов. Во втором приближении по $1/N_c$ в матричных элементах появляются пороговые особенности, соответствующие промежуточным двухчастичным адронным состояниям.

В главе III фиксируются свободные параметры модели с помощью фитирования по основным распадам мезонов и проверяются известные низкоэнергетические соотношения, полученные в рамках киральных теорий.

Во вводном § I дан обзор установленных закономерностей сильных взаимодействий легких адронов в рамках киральных теорий и методов алгебры токов.

В § 2 на основе простейших лагранжианов взаимодействия легких мезонов с кварками в рамках МКК вычислены основные распады этих мезонов и определены основные параметры модели. Показано, что в пределе нулевых масс мезонов воспроизводятся основные низкоэнергетические соотношения киральных теорий (соотношение Гольдбергера-Треймана, аномальные тождества Уорда, гипотеза об универсальности векторных мезонов и т.д.)

В § 3 исследован вопрос о нарушении киральной симметрии в МКК на примаре перехода от 4-фермионного лагранжиана Намбу-Иона-Лазинио к соответствующим мезонным лагранжианам. Показано, что в результате такого перехода возникает стандартный лагранжиан σ -модели, в котором киральная симметрия нарушена как за счет линейного σ -члена, так и за счет различия масс π - и σ -мезонов.

Глава IV посвящена описанию низкоэнергетической физики мезонов в рамках предложенного подхода. Расчеты проводятся в рамках как виртон-кварковой модели (ВКМ), так и модели конфаймированных кварков (МКК). Показано, что результаты этих двух моделей практически не отличаются в области малых энергий. Следует подчеркнуть, что МКК является следующим этапом в развитии идей ВКМ и поэтому применима для больших энергий. МКК позволяет описать более широкий круг явлений низкоэнергетической физики и получить более тонкие характеристики адронов, чем ВКМ.

Во вводном § I обсуждаются современные экспериментальные исследования, направленные на изучение тонких характеристик адронов, отражающих их внутреннюю структуру.

В § 2 вычислены параметры наклона переходных формфакторов дилитцевских распадов $P \rightarrow \rho^+ l^+ l^-$ и $V \rightarrow \rho^+ l^+ l^-$ и ширины редких распадов псевдоскалярных мезонов $P \rightarrow l^+ l^-$.

§ 3 посвящен описанию электромагнитного формфактора пиона в МКК в области $-10 \text{ ГэВ}^2 \leq q^2 \leq 1 \text{ ГэВ}^2$, где q - переданный импульс. Полученное поведение формфактора и δ_1^1 -фазы $\pi\pi$ -рассеяния хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В § 4 в рамках МКК вычислено отношение аксиального и векторного формфактора в электрослабом распаде $\pi \rightarrow e\nu\gamma$. Показано, что существенный вклад дает промежуточный аксиальный a_1 -мезон. Вычислены ширины сильных и радиационных распадов a_1 -мезона.

В § 5 в рамках МКК вычислены электромагнитные радиусы каонов и параметры K_L -распада. Полученные значения находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

В § 6 в ВКМ вычислено сечение фоторождения пионов в кулоновском поле ядра.

В § 7 в рамках МКК исследована проблема описания скалярных мезонов в низкоэнергетической физике. Показана ограниченность трактовки скалярных мезонов как простейших двухкварковых состояний. Введено дополнительное двухкварковое взаимодействие с производной. Показана существенная роль промежуточного $\xi(600)$ -мезона в многочастичных процессах ($\pi\pi \rightarrow \pi\pi$, $\pi\eta \rightarrow \pi\eta$ и т.д.). Определены параметры, характеризующие скалярные мезоны, и вычислены ширины сильных и электромагнитных распадов скалярных мезонов.

В § 8 определены основные характеристики легких ($\pi\pi$) и (πK) димезонатов (время жизни, значения волновой функции в нуле и сдвиг $2S-2P$ уровней) в связи с планируемыми экспериментами по их измерению.

В § 9 вычислены значения поляризуемостей пионов и проведено сравнение с экспериментом и результатами других подходов.

§ 10 посвящен описанию нелептонных распадов K -мезонов и объяснению правила $\Delta I=1/2$. Исследованы различные возможности описания переходов с $\Delta S=1$. Рассмотрены феноменологические 4-кварковые лагранжианы, которые строго запрещают переходы с $\Delta I=3/2$ (лагранжиан, преобразующийся как шестая компонента октета и лагранжиан, использующий цветные степени свободы кварков). Вычислены ширины распадов $K \rightarrow 2\pi$,

3π , $\eta\gamma$, $\pi\pi\gamma$. Использован известный эффективный лагранжиан с $\Delta S=1$, полученный в модели Вайнберга-Салама при учете глюонных КХД-поправок. Соответствующие коэффициенты зафиксированы с помощью фитирования по распадам $K \rightarrow 2\pi$, 2γ . Показано, что основную роль в объяснении правила $\Delta I=1/2$ играет промежуточный $\xi(600)$ -мезон. С помощью эффективного лагранжиана, описывающего переходы с $\Delta S=2$, вычислена разность масс K_L-K_S -мезонов.

В § II исследован вопрос о нарушении изотопической инвариантности. Рассмотрены две возможности ее нарушения: за счет электромагнитного

взаимодействия кварков и за счет сильного взаимодействия, приводящего к различию параметров u - и d -кварков. На основе расчетов разности масс π^+ и π^0 мезонов, ширины и параметра наклона в распаде $\eta \rightarrow 3\pi$, ширины распада $\omega \rightarrow 2\pi$ сделан вывод о том, что нарушение изотопической инвариантности имеет, в основном, неэлектромагнитную природу.

В § 12 исследована возможность глобальной интерпретации скалярного $G(1590)$ -мезона в рамках ВКМ. На основе расчетов ширин распадов $G \rightarrow \eta\eta$, $\eta\eta'$ можно сказать, что имеющиеся экспериментальные данные не исключают интерпретации $G(1590)$ -мезона как глобола.

Глава V посвящена описанию свойств нуклона и Δ -изобары как трехкварковых систем и микроскопическому описанию нуклон-нуклонного взаимодействия, играющего фундаментальную роль в ядерной физике.

Во вступительном § I обсуждаются особенности описания NN -взаимодействия в рамках моделей, основанных на одно- и двухбозонных обменах. Отмечается, что сильные мезон-нуклонные формфакторы строятся феноменологическим образом.

В § 2 построены $SU(2)$ -трехкварковые токи с квантовыми числами нуклона и Δ -изобары.

В § 3 вычислены электромагнитные и слабые формфакторы нуклона. Проведено сравнение с экспериментом и результатами других подходов.

В § 4 вычислены сильные мезон-нуклонные формфакторы. Проведено сравнение с феноменологическими формфакторами, используемыми для описания фаз NN -рассеяния.

В § 5 предложена кварк-дикварковая аппроксимация трехкварковой структуры нуклона. В рамках этой картины вычислены статические характеристики нуклона, его электромагнитные и сильные формфакторы. Построен потенциал однобозонного обмена и вычислены фазы NN -рассеяния.

В заклучении дана сводка основных результатов диссертации, указаны приложения этих результатов и намечены задачи для будущих исследований.

В Приложении I изложена техника вычислений кварковых диаграмм в МКК.

В Приложении II изложен алгоритм вычислений физических матричных элементов в виртон-кварковой модели, являющейся частным случаем МКК.

В Приложении III дана сводка основных кинематических формул, групповых соотношений и приведен явный вид громоздких выражений.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

I. Efimov G.V., Ivanov M.A. Confinement and quark structure of light hadrons.- Intern. Journal of Modern Phys. A, 1988, v. 3, N12,

- р. 2911-2940. (JINR preprint E2-88-37, Dubna, 1988, p. 40). (Конфайнмент и кварковая структура легких адронов).
2. Ефимов Г.В., Иванов М.А. КХД, конфайнмент и низкоэнергетическая физика адронов.- В кн.: Труды УШ Международного семинара по проблемам физики высоких энергий, ОИЯИ Д1,2-86-668, Дубна, 1987, с. 51-62.
 3. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Конфайнмент и кварковая структура адронов.- В кн.: Труды УШ Международного совещания по проблемам квантовой теории поля, ОИЯИ, Д2-87-798, Дубна, 1987, с. 211-224.
 4. Dineykan M., Dubnickova A.Z., Efimov G.V. and Ivanov M.A. Virton-quark model and low-energy interactions of hadrons.- Preprint ICTP, IC/84/247, Trieste, 1984, p. 68. (Виртон-кварковая модель и низкоэнергетические адронные взаимодействия).
 5. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Нелокальная модель кварков.- ЭЧАЯ, 1981, т. 12, вып. 15, с. 1219-1274.
 6. Dubnickova A.Z., Efimov G.V., Ivanov M.A. Nonlocal quark model and meson decays.- Fort. der Phys., 1979, v.27, No.9, p.403-435. (Нелокальная модель кварков и распады мезонов).
 7. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Нелокальная модель кварков.- В кн.: Труды Ш Международного совещания по проблемам физики высоких энергий и квантовой теории поля, Протвино, 1980, с. 321-330.
 8. Efimov G.V., Ivanov M.A. Confinement and quark structure of hadrons.- In proceedings of the conference "Hadron Structure' 87", Edited by D.Krupa, Bratislava, 1988, pp. 210-217. (Конфайнмент и кварковая структура адронов).
 9. Авакян Е.З., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Низкоэнергетические соотношения в модели конфаймированных кварков.- В кн.: Труды II совещания "Инфракрасное поведение в КХД", Тбилиси, 1988.
 10. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Электромагнитные характеристики распадов $P \rightarrow \gamma \rho^+ \rho^-$ в нелокальной модели кварков.- Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 32, вып. 1, сс. 60-62.
 11. Динейхан М., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Формфактор распада $\omega \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$ в нелокальной модели кварков.- Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, вып. 1, с. 66-68. (Препринт ОИЯИ Р2-80-706, Дубна, 1980, 3 с.)
 12. Динейхан М., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Распады $V \rightarrow \rho \rho^+ \rho^-$ в нелокальной модели кварков.- ЯФ, 1982, т. 35, вып. 3, сс. 748-755. (Препринт ОИЯИ Р2-81-272, Дубна, 1981, 11 с.)
 13. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Мурадов Р.Х., Соломонович М.М. Распады $P \rightarrow \rho^+ \rho^-$ в нелокальной модели кварков.- Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 34, вып. 4, сс. 230-234. (Препринт ОИЯИ Р2-81-287, Дубна, 1981, 5 с.).

14. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Мешник С.Г. Формфактор пиона и фаза δ_1^{\prime} $\pi\pi$ -рассеяния в модели конфаймированных кварков.- Сообщение ОИЯИ Р2-88-253, Дубна, 1988, 12 с.
15. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Роль a_1 -мезона в низкоэнергетической физике адронов.- ЯФ, 1987, т. 46, вып. 2(8), с. 576-584. (Препринт ОИЯИ Р2-86-278, Дубна, 1986, 15 с.).
16. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Нелептонные распады каонов.- Препринт ОИЯИ Е2-87-630, Дубна, 1987, 24 с.
17. Иванов М.А., Охлопкова В.А. Слабые и электромагнитные характеристики псевдоскалярных мезонов в нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ Р4-12509, Дубна, 1979, 12 с.
18. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Охлопкова В.А. Характеристики электромагнитных, слабых лептонных и нелептонных распадов псевдоскалярных мезонов в нелокальной модели кварков.- ЯФ, 1981, т. 33, вып. 2, с. 559-569.
19. Иванов М.А., Кузьмин В.А., Репортиренко А.М. Фоторождение пионов в кулоновском поле ядра.- ЯФ, 1986, т. 43, вып. 5, с. 1231-1234. (Препринт ОИЯИ Р2-85-356, Дубна, 1985, 6 с.)
20. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Поляризуемость π -мезонов в модели конфаймированных кварков.- Препринт ОИЯИ Е2-88-519, Дубна, 1988, 16 с.
21. Динейхан М., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Распады скалярных мезонов в нелокальной модели кварков.- ЯФ, 1982, т. 35, вып. 1, с.134-143. (Препринт ОИЯИ Р2-81-131, Дубна, 1981, 17 с.).
22. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Любовицкий В.Е. О свойствах $(\pi\pi)$ -атома.- ЯФ, 1986, т. 44, вып. 2(8), с. 460-465. (Препринт ОИЯИ Р2-85-546, Дубна, 1985, 10 с.).
23. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Любовицкий В.Е. О πK -димерах.- Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 45, вып. 11, с. 526-529. (Препринт ОИЯИ Р2-87-151, Дубна, 1987, 10 с.).
24. Иванов М.А., Охлопкова В.А. Нелептонные распады каонов в нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ Р2-12638, Дубна, 1979, 16 с.
25. Динейхан М., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Сильные и слабые нелептонные взаимодействия мезонов в нелокальной модели кварков.- Препринт ОИЯИ Р2-80-604, Дубна, 1980, 26 с.
26. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. О разности масс $K_L - K_S$ -мезонов.- Препринт ОИЯИ Е2-88-518, Дубна, 1988,
27. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Мурадов Р.Х., Соломонович М.М. О нарушении изотопической инвариантности.- Препринт ОИЯИ Р2-83-420, Дубна, 1983, 16 с.

28. Иванов М.А., Мурадов Р.Х. К вопросу о природе G (1590)-мезона. Письма в ЖЭТФ, т. 42, вып. 7, с. 297-300. (Препринт ОИЯИ Р2-85-198, Дубна, 1985, 6 с.).
29. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Любовицкий В.Е. Кварковая структура нуклона и сильные мезон-нуклонные формфакторы.- ЯФ, 1988, т. 48, вып. 1(7), сс. 198-208. (Препринт ОИЯИ Р2-87-384, Дубна, 1987, 22 с.).
30. Efimov G.V., Ivanov M.A. and Lubovitskij V.E. Strong Nucleon and Δ -isobar form factor in the quark-confinement model.- Few-Body Systems, 1988, v. 5, No. 4, pp. 430-457. (ОИЯИ препринт Р2-87-776, Дубна, 1987, 18 с.). Сильные формфакторы нуклона и Δ -изобары в модели конфайнмированных кварков.
31. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Любовицкий В.Е., Мачавариани А.И., Челидзе А.Д. Микроскопическое описание фаз NN -рассеяния с учетом кварковой структуры адронов.- В кн.: Труды IX Международного семинара по проблемам физики высоких энергий, ОИЯИ Д1,2-88-652, Дубна, 1988.
32. Дубничкова А.З., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Поправки к массам псевдоскалярных и векторных мезонов в нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ Р2-10734, Дубна, 1977, 18 с.
33. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Нелокальная модель кварков и некоторые физические следствия.- Сообщение ОИЯИ Р2-10740, Дубна, 1977, 25с.
34. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Радиационные распады векторных мезонов в нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ Е2-11065, Дубна, 1977 31 с.
35. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Лобанов Ю.Ю. Поправки к массам барионов в нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ. Р2-11878, Дубна, 1978, 23 с.
36. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Ноговицын Е.А. Радиационные распады η, η' -мезонов в нелокальной модели кварков.- ЯФ, 1981, т. 34, вып. 7, с. 264-269. (Препринт ОИЯИ Е2-80275, Дубна, 1980, 10 с.).
37. Динейхан М., Ефимов Г.В., Иванов М.А. Распады адронов в нелокальной модели кварков.- В кн.: Труды XI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля, ОИЯИ Д2-81-543, Дубна, 1981, с. 229-248.
38. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Ноговицын Е.А., Рябцев А.Д. К вопросу о границах применимости нелокальной модели кварков.- Сообщение ОИЯИ Р4-83-429, Дубна, 1983, 12 с.
39. Ефимов Г.В., Иванов М.А. Адронная физика низких энергий в виртон-кварковой модели.- В кн.: Труды XII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля, ОИЯИ Д2-84-366, Дубна, 1984, с. 308-325.

40. Ефимов Г.В., Иванов М.А., Рапортиренко А.М. О кварковой структуре нестранных мезонов.- Сообщение ОИЯИ Р2-85-594, Дубна, 1985, 28 с.
41. Ефимов Г.В., Иванов М.А. О кварковой структуре легких мезонов.- В кн.: Труды У Всесоюзного семинара. Программы экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР, Москва, 1987, с. 172-175.
42. Авакян Е.З., Авакян С.Л., Ефимов Г.В., Иванов М.А. О распаде $K \rightarrow e \nu$.- Препринт ОИЯИ Р2-86-441, Дубна, 1986, 6 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 февраля 1989 года.