

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

          
Д - 687

2-84-106

УДК 539.1.01:539.17.01.

ДОРКИН

Сергей Михайлович

ШЕСТИКВАРКОВЫЕ СОСТОЯНИЯ В ЯДРАХ  
И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ  
В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

А.И. ТИТОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
доцент

Ю.Ф. СМЕРНОВ

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Л.А. КОНДРАТЮК

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт  
ядерных исследований АН СССР, Москва.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1984 года  
на заседании Специализированного совета К 047.01.01  
Лаборатории теоретической физики Объединенного института  
ядерных исследований, г. Дубна, Московской области

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1984 года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

В атомных ядрах могут существовать, а в ядерных процессах проявляться многокварковые системы. Для этого есть определенные экспериментальные указания. Прежде всего, существует большой класс так называемых кумулятивных процессов в адрон-ядерных взаимодействиях. Их общей чертой является то, что они происходят далеко вне пределов двухчастичной кинематики (падающий адрон плюс нуклон ядра). Их не удается объяснить, если учитывать только ядерное ферми-движение нуклонов или глауберовское перерассеяние падающего адрона на нуклонах. Приходится считать, что падающий адрон взаимодействует с коррелированной группой нуклонов, масса которой может достигать учетверенной массы нуклона. С другой стороны, эти процессы идут с большой передачей импульса, что говорит о малых размерах области взаимодействия,  $r < 1 \text{ фм}$ . Второе — это существование глубоконеупругих лептон-ядерных взаимодействий в области кумулятивности вплоть до второго порядка. По сравнению с адрон-ядерными реакциями, здесь значительно меньше неопределенностей с механизмом процесса, поэтому интерпретация этих данных весьма чувствительна к предположениям о кварк-партонных структурных функциях многокварковых состояний. Далее, имеются данные по факторам дейтрона,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  в области очень больших передач импульса (для дейтрона вплоть до  $Q^2 = 8 \text{ (ГэВ/с)}^2$ ). Эти данные невозможно объяснить на основе традиционных представлений о нуклон-нуклонных силах и структуре малонуклонных систем. Выход здесь также ищут на пути учета многокварковых степеней свободы в ядрах. И, наконец, в последние годы появилось много данных в области физики промежуточных энергий по взаимодействию нуклонов с нуклонами, адронов с дейтроном, фоторасщеплению дейтрона и др., в сечениях которых проявляются характерные особенности. Это относится к таким интерференционным характеристикам, как поляризация, анализирующая способность и т.д., где в области полных энергий  $E \approx$

2,2 ГэВ и выше появляются характерные "структуры". Эти последние связывают с существованием так называемых дибарионов, являющихся прямыми кандидатами на роль шестикварковых систем.

Все это приводит к тому, что теоретическое исследование структуры многокварковых состояний, анализ их проявления в ядрах и ядерных процессах является важным и актуальным.

Цель работы 1. Разработать теорию связи нуклонного и шестикваркового каналов в двухнуклонных системах и на ее основе рассчитать примеси многокварковых состояний в атомных ядрах и ширины шестикварковых состояний в нуклон-нуклонном рассеянии. 2. Исследовать структуру шестикварковых состояний, рассчитать спектр масс дибарионов. 3. Исследовать проявление шестикварковых состояний в реакциях с участием дейтрона: упругом электрон-дейтронном рассеянии и глубоконеупругом рассеянии дейтронов протонами.

#### Научная новизна и практическая ценность

В диссертации впервые сформулирован интерполяционный подход, учитывающий связь нуклон-нуклонного канала с шестикварковым. На его основе проведены расчеты примесей шестикварковых состояний в дейтроне, ширины шестикварковых резонансов (дибарионов) в нуклон-нуклонном рассеянии, сделаны оценки примесей многокварковых (девяти, двенадцати) состояний в атомных ядрах.

Впервые проведено детальное исследование структуры шестикварковых состояний на основе теоретико-группового подхода и рассчитан спектр масс дибарионов в энергетическом интервале 2,2 - 3,1 ГэВ. При этом рассматривались как нестранные шестикварковые состояния в каналах с изотопическим спином  $I = 0, 1$ , так и шестикварковые состояния со странностью  $\Delta = -1$  с изотопическим спином  $I = 1/2$ . Обнаружено, что плотность этих уровней велика и, например, в канале с  $I=1$  и с положительной четностью достигает величины  $1/25 \text{ МэВ}^{-1}$ . Вместе с тем расчеты указывают на возможное существование узких шестикварковых состояний в  $P$ -,  $D$ - волнах  $NN$ -системы при энергиях  $E = 2, 1 - 2, 3 \text{ ГэВ}$ .

Исследовано проявление шестикварковых степеней свободы в зарядовом и квадрупольном факторах дейтрона в широкой области переданных импульсов  $Q^2 \leq 6 (\text{ГэВ}/c)^2$ , при этом отдельно рассматривались эффекты, обусловленные антисимметризацией волновой функции дейтрона по кварковым переменным и вклад именно шестикварковых состояний. Показано, что учет антисимметризации пренебрежимо мал для реалистических волновых функций дейтрона, а шестикварковые состояния играют определяющую роль в описании факторов при больших передачах импульса  $Q^2 \gg 2 (\text{ГэВ}/c)^2$ .

Исследована реакция глубоконеупругого рассеяния дейтронов протонами. Дан последовательный анализ реакций такого типа. Показано, что возбуждение нуклонных резонансов в мишени с последующим их распадом (резонансный механизм) не позволяет описать сечение этой реакции. Впервые показано, что кварк-партонный механизм воспроизводит основные закономерности  $dp \rightarrow dX$  реакции, при этом учет шестикварковой примеси в дейтроне приводит к улучшению согласия с экспериментом.

Апробация работ. Результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, а также были представлены и докладывались на Международных семинарах по физике высоких энергий (Дубна, 1978, 1981 г.г.), на Международном семинаре по экстремальным состояниям в ядрах (Дрезден, 1980 г.), Всесоюзных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Рига, 1979 г. и Киев, 1982 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано семь работ.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений. Объем диссертации - 131 страница машинописного текста, 22 рисунка, 11 таблиц. Список библиографии содержит 101 наименование.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому описанию шестикварковых конфигураций в двухнуклонных системах.

В § 1 сформулирована постановка задачи. В § 2 построена модель, учитывающая связь многокваркового и нуклонного каналов в ядрах. Задача ставится таким образом, что к известной ядерной волновой функции с размороженными трехкварковыми кластерами - нуклонами добавляется еще многокварковая, соответствующая распределению кварков внутри единого объема (многокваркового мешка), которая формируется микроскопическим кварковым взаимодействием  $V_{qq}$ , известным из физики элементарных частиц. Взаимное влияние этих двух каналов определяется кварк-нуклонным взаимодействием, которое строится на основе определенных модельных предположений. В случае двух взаимодействующих нуклонов волновая функция системы имеет вид:

$$\Psi = \hat{A} (\phi_1 \phi_2 \psi(r)) + \sum_{\lambda} c_{\lambda} \psi_{\lambda}(q^6),$$

здесь  $\Psi_\lambda$  - собственные функции шестикварковой ( $q^6$ ) системы (в конкретной модели - гауссовские функции с радиусом  $q_2$  - взаимодействия порядка  $0,5 \text{ фМ}$ ),  $\hat{A}$  - оператор антисимметризации кварков, принадлежащих разным кластерным функциям  $\phi_1$  и  $\phi_2$ . Амплитуды  $q^6$  - состояний  $C_\lambda$  и функции относительного движения нуклонов  $\varphi(r)$  определяются как решения системы связанных уравнений

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + U - \varepsilon \right] \varphi(r) = - \sum_\lambda c_\lambda \tilde{D}_\lambda(r),$$

$$-c_\lambda (E_\lambda - E) = \int dr \varphi(r) D_\lambda^*(r).$$

Здесь  $\varepsilon = E - 2M$ ,  $m = M/2$  - приведенная масса нуклонов. Взаимодействие между каналами осуществляется матричным элементом

$$\tilde{D}_\lambda = (E_\lambda - E) \langle \phi_1 \phi_2 | \Psi_\lambda \rangle + \langle \phi_1 \phi_2 | V_{qN} | \Psi_\lambda \rangle.$$

В случае ортогональных каналов  $\tilde{D}_\lambda$  определяется только вторым слагаемым. Взаимодействие  $V_{qN}$  задается как разность кваркового взаимодействия  $q^6$  - системы  $V_{qq} = \sum_{i,j=1}^6 V_{qq}(i,j)$  и феноменологического  $NN$  - взаимодействия в области вне ядра  $NN$  - сил:

$$v = \theta(r - r_a) (V_{NN}(r) + \sum_{i,j=1}^3 V_{qq}(i,j) + \sum_{i,j=4}^6 V_{qq}(i,j)),$$

т.е.  $V_{qN} = V_{qq} - v$ . Проведено исследование полученной системы уравнений и входящих в нее эффективных взаимодействий.

В § 3 рассчитаны примеси  $q^6$  - состояний в дейтроне. При этом использован тот факт, что  $|c_\lambda|^2 \ll 1$ . Тогда правая часть первого из уравнений пренебрежимо мала, а сама система уравнений расщепляется. Теперь  $\varphi(r)$  есть обычная функция дейтрона, которая определяется заданием феноменологического реалистического потенциала  $V_{NN}$ . В конкретных расчетах были использованы потенциалы Рейда с твердым ядром, Ломона-Фешбаха и Хильтена. Для шестикварковой конфигурации с кварками в  $S$  - оболочке было получено:  $c(S^6) = -0,37$  (Хильтен);  $-0,147$  (Рейд);  $-0,132$  (Ломон-Фешбах) в то время, как для  $S^4 p^2$  - конфигурации  $c(S^4 p^2) = 0,26$  (Хильтен);  $0,21$  (Рейд),  $0,18$  (Ломон-Фешбах). Значение суммарной вероятности двух конфигураций  $c^2 = c^2(S^6) + c^2(S^4 p^2) = 6,6 \cdot 10^{-2}$  согласуется с результатом обработки данных по упругому  $eD$  - рассеянию.

В § 4 рассчитаны ширины шестикварковых состояний в нуклон-нуклонном рассеянии. Оказалось, что ширина резонанса  $\Gamma$  зависит от типа  $q^6$  - конфигурации, а именно для  $S^6$  - состояния  $\Gamma(S^6) = 29 \text{ МаВ}$ , для  $S^4 p^2$  - состояния  $\Gamma(S^4 p^2) = 9,3 \text{ МаВ}$ .

В § 5 сделаны оценки примеси многокварковых ( $q^9$ -,  $q^{12}$ -) состояний в ядрах. Предполагается, что примеси  $C_A$  ( $A=3,4$ ) определяются, главным образом, перекрытием волновой функции  $q^{3A}$  - состояния и внешней  $A$  - нуклонной функции  $\psi_{ext}^A$ . Найденные значения  $|C_A|^2$  согласуются с данными, полученными из анализа экспериментальных данных по кумулятивному рождению частиц в протон-ядерных соударениях.

В § 6 сформулированы основные выводы первой главы.

Во второй главе дан теоретический анализ спектра шестикварковых состояний в интервале  $2,2 - 3,1 \text{ ГэВ}$ , в котором ведется интенсивный поиск дибарионных резонансов.

В § 1 сформулирована постановка задачи.

В § 2 исследуется структура волновых функций шестикварковых состояний. Основу рассмотрения составляет теоретико-групповой подход. При этом исследовалась структура нестранных шестикварковых состояний с изотопическим спином  $I = 0, 1$  и странных ( $\Delta = -1$ ) с  $I = 1/2$ .

В § 3 проведен расчет спектра масс дибарионов на основе MIT bag модели. Основной результат заключается в том, что плотность шестикварковых состояний велика и, например, для состояний положительной четности с  $I=1$  она составляет  $1/25 \text{ МаВ}^{-1}$ . Среднее расстояние между уровнями совпадает по порядку величины с их ширинами распада в нуклон-нуклонный канал, что, по-видимому, является основной трудностью при поиске изолированных дибарионных резонансов. Вместе с тем, спектры странных  $q^6$  - состояний по сравнению со спектрами нестранных имеют ряд особенностей, в частности, в  $P$ -,  $D$ - парциальных волнах  $NN$  - системы имеются изолированные уровни, которые могут быть кандидатами на роль узких дибарионов в  $NN$  - системе. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведен расчет спектра масс странных ( $\Delta = -1$ ) дибарионов с  $I = 1/2$ , которые могут проявляться в конкретных парциальных волнах  $NN$  - системы. Сплошные линии соответствуют состояниям с меньшей шириной и являются более реальными кандидатами в дибарионные резонансы.

В § 4 приведен основные выводы второй главы.

В третьей главе исследуется проявление шестикварковой структуры в зарядовом  $F_C$  и квадрупольном  $F_Q$  формфакторах дейтрона. При этом мы используем модель, развитую в первой главе, которая при малых  $Q^2$  (квadrатах переданного 4-импульса) допускает обычную двухнуклонную интерпретацию дейтрона, а при больших  $Q^2$  оперирует с дейтроном как с шестикварковым объектом.

В § 1 сформулирована постановка задачи.

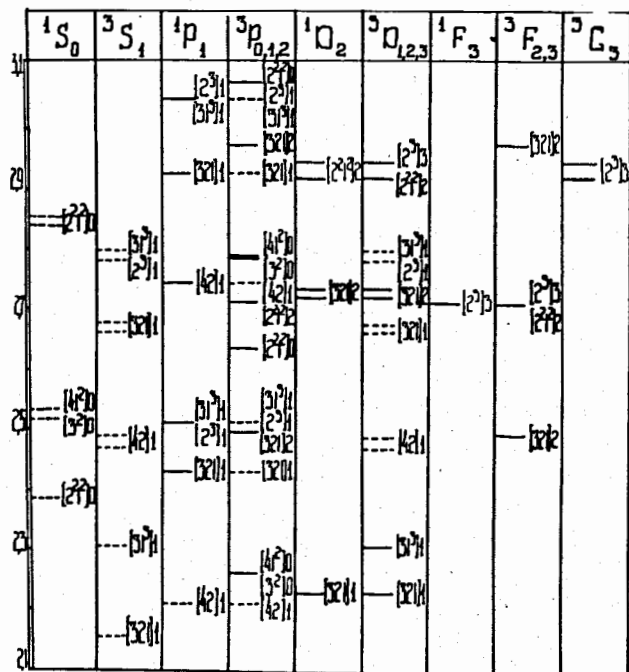


Рис. 1. Спектр масс странных ( $\Delta = -1$ )  $q^6$ - состояний в парциальных волнах  $1N$  системы.

В § 2 последует вклад в формфакторы дейтрона, обусловленный антисимметризацией волновой функции дейтрона по кварковым переменным ( $F_c^e, F_q^e$ ) без учета шестикварковых примесей в дейтроне. Показано, что для реалистических волновых функций (Рейд с мягким кором -  $RSC$ , Рейд с твердым кором -  $RHC$ , парижская волновая функция -  $P$ ) он мал и его вклад в сечение упругого  $eD$ -рассеяния оставляет несколько процентов (рис. 2).

В § 3 последует вклад истинных шестикварковых состояний в дейтроне. Показано, что  $q^6$ -состояния играют определяющую роль при больших переданных импульсах ( $Q^2 > 2(\text{ГэВ}/c)^2$ ). Это иллюстрируется на рис. 3, где показан расчет и сравнение с экспериментом квадрата электрического формфактора  $F_E^2 = F_c^2 + F_q^2$ . Из условия согласия с экспериментом определено значение примеси  $q^6$ -состояния в дейтроне,  $c^2 = 0,07$ .

В § 4 приведены основные результаты третьей главы и выводы.

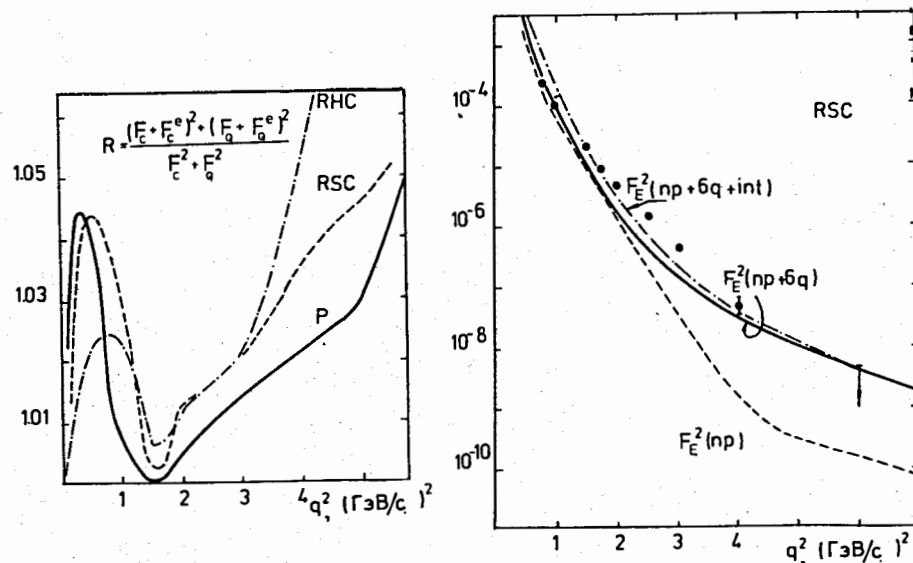


Рис. 2.

$$R = \frac{(F_c + F_c^e)^2 + (F_q + F_q^e)^2}{F_c^2 + F_q^2}$$

показывающее относительный вклад обменных поправок в сечение упругого  $eD$ -рассеяния для волновых функций:  $P$  (сплошная),  $RSC$  (пунктир) и  $RHC$  (штрих-пунктир)

Рис. 3.

Расчет и сравнение с экспериментом квадрата электрического формфактора  $F_E^2 = F_c^2 + F_q^2$ . Пунктир - без учета  $q^6$ -конфигураций, сплошная - с учетом  $q^6$ -конфигураций, но без учета интерференции между  $q^6$  и  $1N$  каналами, штрих-пунктир - с учетом  $q^6$ -конфигураций и интерференции.

В четвертой главе проведен теоретический анализ глубоконоупругого рассеяния дейтронов протонами. Экспериментальные данные были получены на синхрофазотроне ОИЯИ в группе М.Г. Мещерякова. Дейтроны с импульсом  $P_0 = 8,9$  ГэВ/с рассеивались ядрами водорода под углом  $\theta = 0,103$  рад, так что квадрат пространственной части переданного импульса достигал величины  $\bar{q}^2 = 1,6 (\text{ГэВ}/c)^2$ . Спектры дейтронов имеют четко выраженный пик, соответствующий упругому  $d/p$  рассеянию. Было обнаружено, что с ростом  $\bar{q}^2$  сечение быстро убывает, однако,

начиная с  $q^2 = 1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> убывание прекращается и спектры выходят на плато. Из эксперимента, таким образом, видно, что "рыхлая" ядерная система-дейтрон с большой вероятностью теряет значительный импульс и при этом не расщепляется на нуклоны. Теоретический анализ этого факта и составляет содержание четвертой главы диссертации.

В § 1 сформулирована постановка задачи.

В § 2 и § 3 исследуется резонансный механизм глубоконеупругих  $pp \rightarrow pX$  и  $dp \rightarrow dX$  реакций, т.е. механизм, когда в результате многократного рассеяния кварков налетающей частицы и мишени в мишени возбуждаются нуклонные резонансы, распадающиеся в нерегистрируемый канал  $X$ . При этом учитывается возбуждение четырех резонансов:  $N_{1470}^*$ ,  $N_{1520}^*$ ,  $N_{1535}^*$ ,  $N_{1690}^*$ . Рассмотрение § 2 основывается на нерелятивистской кварковой модели, в § 3 использовались релятивистские волновые функции нуклонов и нуклонных резонансов, рассчитанные в модели релятивистского гармонического осциллятора. Оказалось, что использование релятивистских функций приводит к сильной перенормировке параметров амплитуды кварк-кваркового взаимодействия по сравнению с нерелятивистскими. Однако в итоге расчет привел к одному результату: вклад резонансного механизма мал и составляет менее 40 %.

В § 4 исследуется вклад нерезонансных процессов. Предполагается, что основной вклад в сечение дает упругое рассеяние налетающей частицы кварком мишени. Показано, что такой механизм воспроизводит основные закономерности глубоконеупругих  $pp \rightarrow pX$  и  $dp \rightarrow dX$  - реакций.

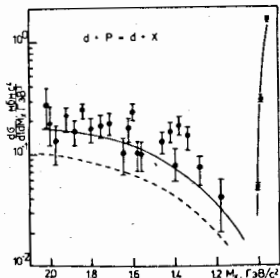


Рис. 4.

Расчет и сравнение с экспериментом дифференциального сечения  $dp \rightarrow dX$  реакции. Пунктир - без учета примеси  $q^6$  - состояний в дейтроне, сплошная - с учетом,  $c^2 = 0,05$ .

На рис. 4 приведен расчет и сравнение с экспериментом дифференциального сечения  $dp \rightarrow dX$  реакции. Видно, что учет  $q^6$ - примеси в дейтроне приводит к улучшению согласия с экспериментом.

В § 5 приведены основные выводы четвертой главы.

В заключении приведены основные выводы, выдвигаемые на защиту.

В Приложении А описана техника генеалогических коэффициентов и расчет вкладов остаточных взаимодействий в массы  $q^6$ -состояний.

В Приложении Б исследуется сходимость рядов, появляющихся при вычислении обменных поправок к формфакторам дейтрона.

#### Основные результаты диссертации, выдвигаемые на защиту

1. Предложена система уравнений связанных каналов, учитывающая нуклонный и кварковый каналы. На ее основе вычислены примеси шестикварковых состояний в дейтроне. Полученное значение вероятности ( $\approx 7\%$ ) согласуется с величинами, извлеченными из анализа экспериментальных данных и другими расчетами.

2. В рамках уравнений связанных каналов вычислены ширины шестикварковых состояний в  $NN$  - канале. Расчет, выполненный для  $S^6$  и  $S^4p^2$  - конфигураций, привел к значению  $\Gamma \approx 10-30$  МэВ.

3. Сделаны оценки примесей многокварковых ( $q^2, q'^2$ ) состояний в ядрах. Полученные значения вероятностей согласуются с данными, полученными из анализа экспериментов по кумулятивному рождению частиц в протон-ядерных столкновениях.

4. Исследована структура спектра шестикварковых состояний, как нестранных, так и странных ( $\Delta = -1$ ). Показано, что плотность шестикварковых уровней велика, среднее расстояние между уровнями положительной четности с изоспином  $I=1$ , например, составляет 25 МэВ. В то же время в системе странных шестикварковых состояний в области энергий 2,1 - 2,3 возможны изолированные конфигурации, являющиеся кандидатами на роль узких дибарионов в  $NN$  - системе.

5. Исследован вклад шестикварковых степеней свободы в зарядовый и квадрупольный формфакторы дейтрона. Показано, что:

а) вклад в формфакторы, обусловленный антисимметризацией волновой функции дейтрона по кварковым переменным, пренебрежимо мал в широкой области переданных импульсов  $Q^2 \leq 6$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>.

б) при  $Q^2 \gtrsim 2-3$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> определяющую роль при описании формфакторов дейтрона играют шестикварковые примеси. Вклад интерференции шестикваркового и нуклонного каналов мал.

6. Исследована реакция глубоконеупругого рассеяния дейтронов протонами  $dp \rightarrow dX$ . Показано, что:

а) резонансный механизм не может полностью описать  $pp \rightarrow pX$  и  $dp \rightarrow dX$  реакции.

б) кварк-партоный механизм взаимодействия воспроизводит основные закономерности реакций  $pp \rightarrow pX$  и  $dp \rightarrow dX$ .

в) учет примеси шестикварковых состояний в дейтроне приводит к улучшению согласия с экспериментом.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

Лукьянов В.К., Титов А.И., Доркин С.М. О существовании много-баррионных конфигураций - флуктонов в атомных ядрах.- Дубна, 1978 - Юс (препринт ОИЯИ P2-II049).

Dorkin S.M., Lukvanov V.K., Titov A.I. The Six-Quark State Widths in the Nucleon-Nucleon Scattering. - Dubna, 1980 - 6 p. (JINR Communication E2-80-43).

Буров В.В., Доркин С.М., Лукьянов В.К., Титов А.И. Шестикварковая структура в формфакторе дейтрона.- Дубна, 1981 - IIc. (препринт ОИЯИ P2-81-621).

Burov V.V., Dorkin S.M., Lukvanov V.K., Titov A.I. Six-Quark Structure in the Deuteron Form-Factors. - Zeit.Phys., ser.A.: Atoms and Nuclei, v.306, No 1, S.149-154.

Доркин С.М., Резник Б.Л., Титов А.И. Структура спектра шестикварковых состояний. - ЯФ, 1982, т. 36, в. 5, с. 1244-1257.

Доркин С.М., Каптарь Л.П., Титов А.И. Глубоконеупругое дейтрон-протонное рассеяние и кварковая структура дейтрона - Дубна, 1982, - 14 с. (препринт ОИЯИ P2-82-81).

Доркин С.М., Лукьянов В.К., Титов А.И. Шестикварковые примеси в двухнуклонных системах. - Дубна, 1982, - 22 с (препринт ОИЯИ P2-82-913).

Доркин С.М., Каптарь Л.П., Титов А.И. Глубоконеупругое дейтрон-протонное рассеяние - Дубна, 1984,- 14с (препринт ОИЯИ P2-84-95 ).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 февраля 1984 года.