

Л-934

С 324.19



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-98-131

На правах рукописи
УДК 530.12.01; 530.125; 530.126

20/36

ЛЮБОВИЦКИЙ
Валерий Ефимович

**ФИЗИКА ЛЕГКИХ И ТЯЖЕЛЫХ БАРИОНОВ
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАРКОВОЙ МОДЕЛИ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1998

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исторически физика барионов как особая область исследований возникла в начале нынешнего века в ходе пионерских открытий протона и нейтрона. Изучение свойств барионов представляет собой одну из актуальных проблем физики элементарных частиц. Существует ряд основных причин, в силу которых барионам уделяется повышенное внимание. Во-первых, наилегчайшие барионы (нуклоны) составляют основу ядерной материи. Поэтому, проблемы строения нуклонов и их свойств тесно связаны с задачами ядерной физики. Во-вторых, с исследованием барионной физики неразрывно связаны такие фундаментальные открытия последних сорока лет, как $V - A$ структура слабых взаимодействий, унитарная $SU_F(3)$ симметрия, объяснившая существование октета барионов с $J^P = 1/2^+$, открытие цвета в результате разъяснения парадокса со спиновой статистикой трех одинаковых кварков в Δ^{++} -изобаре и, наконец, косвенное подтверждение кварковой гипотезы в результате экспериментов в Стенфорде по глубоконеупругому рассеянию лептонов на нуклонах. Третья причина интереса к барионам связана с возможностью получения независимой информации о проблемах КХД, таких как цветовой конфайнмент и перенос цвета, адронизация кварков и т.д. В настоящее время одним из перспективных направлений в барионной физике является исследование слабых распадов тяжелых барионов, которое является уникальным инструментом для определения неизвестных параметров стандартной модели (матричных элементов матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава V_{cb} и V_{ub}) и исследования эффектов CP нарушения.

С момента обнаружения первых барионов во главу угла встал естественный вопрос о разработке реалистического подхода, позволяющего описывать статические и динамические свойства барионов. В области высоких энергий с этой задачей успешно справляется КХД. Однако, в области низких энергий КХД теряет свою предсказательную силу из-за растущей константы связи. Это явилось стимулом для возникновения различных теоретических подходов, позволяющих тем или иным образом вычислять низкоэнергетические барионные характеристики: правила сумм КХД, КХД на решетке, различные варианты кварковых моделей (модели "мешков", потенциальные кварковые модели, конституентные кварковые модели на световом конусе, кварковые модели, основанные на

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

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор А.К. Лиходед
Доктор физико-математических наук, профессор И.М. Народецкий
Доктор физико-математических наук, профессор Р.Н. Фаустов

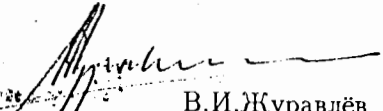
Ведущая организация: Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского университета

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1998 г. на заседании
Диссертационного совета Д047.01.01 при Лаборатории теоретической
физики Объединённого института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1998 г.

Учёный секретарь совета
кандидат физико-математических наук


В.И. Журавлёв

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

эффективных лагранжианах адрон-кваркового взаимодействия), солитонные модели, эффективная теория тяжелых кварков, $1/N_c$ разложение в пределе больших N_c , киральная пертурбативная теория тяжелых барионов, подходы, основанные на кварк-дикварковой барионизации КХД-функционала.

Основной успех большинства из перечисленных подходов связан с изучением свойств барионов, когда величины переданных импульсов незначительны и во взаимодействиях барионов принимают участие локальные поля (фотоны, лептоны или голдстоуновские бозоны). В этом случае возникает возможность использовать разного рода приближения к описанию структуры барионов, основанные на тех или иных динамических принципах (симметриях). Этот путь позволяет вычислять статические характеристики барионов (спектр масс, ширины распадов). Однако, при описании динамических характеристик (формфакторов, параметров низкоэнергетического рассеяния) и, в особенности, эффектов, связанных с большими энерговыведениями (нуклон-антинуклонная аннигиляция, нелептонные распады тяжелых барионов и т.д.), необходимо учитывать внутреннюю структуру барионов. Другими словами, для построения адекватного теоретического подхода, позволяющего систематическим образом вычислять статические и динамические характеристики барионов, необходимо в первую очередь правильно заложить информацию об их внутренней структуре.

Данным критериям удовлетворяет модель конфаймированных кварков (МКК), предложенная Г.В.Ефимовым и М.А.Ивановым. МКК представляет собой релятивистскую кварковую модель, основанную на эффективных локальных лагранжианах адрон-кваркового взаимодействия, позволяющих динамическим образом описывать кварковую структуру мезонов и барионов в области низких энергий. Поведение легких кварков в области больших расстояний описывается в МКК пропагаторами, учитывающими их конфаймент. Динамика тяжелых кварков задается свободными фермионными пропагаторами. В свою очередь, МКК также нуждается в модернизации. В частности, использование в МКК локальных кварк-адронных вершин оказывается недостаточным для получения нужного убывания адронных формфакторов. С физической точки зрения, адроны (барионы) представляют собой достаточно протяженные объекты и возникает необходимость в учете (в качестве первого шага феноменологическим образом) внутренней структуры вершин адрон-кваркового взаимодействия. Одна из наиболее простых возможностей

связана с введением в кварк-адронные вершины релятивистских формфакторов, эффективно описывающих распределение кварков в адронах. В принципе, явный вид данных формфакторов может быть найден из решения соответствующего уравнения типа Бете-Солпитера. Однако, для этого необходимо знать потенциал трехкваркового взаимодействия. Как правило, вид искомого потенциала моделируется. Вторая возможность усовершенствования модели конфаймированных кварков основана на моделировании вида кваркового пропагатора. Следовательно, возникает потребность в формулировке квантово-полевой схемы, позволяющей описывать барионы как связанные состояния конститuentных кварков, учитывать структуру барион-кварковых вершин и имеющей возможность моделировать поведение кварков в области больших расстояний. Вместе с тем, необходимым требованием к предполагаемой модели должна быть ее относительная простота и ясность физических принципов.

Цель диссертации состоит в построении квантово-полевой модели адронов, позволяющей описывать статические и динамические характеристики барионов, содержащих легкие и тяжелые кварки, с целью выяснения закономерностей низкоэнергетической феноменологии. Основной акцент диссертации делается на изучении физики тяжелых барионов - одном из перспективных направлений в современной физике элементарных частиц.

Научная новизна и практическая ценность.

Новым достижением является разработка релятивистской кварковой модели (РКМ), позволяющей последовательным и самосогласованным образом проводить вычисления низкоэнергетических характеристик легких и тяжелых барионов. Барионы рассматриваются в РКМ как связанные состояния конститuentных кварков. Внутренняя структура барионов учитывается феноменологическим образом при помощи вершинных функций, входящих калибровочно-инвариантным образом в эффективные лагранжианы барион-кваркового взаимодействия. Лагранжианы барион-кваркового взаимодействия служат основой для описания барион-барионных взаимодействий в области низких энергий. Параметрами модели являются вершинные функции и пропагаторы кварков. Выбор вершинных функций обеспечивает ультрафиолетовую сходимость матричных элементов. Благодаря внутренней самосогласованности и наличию незначительного числа свободных параметров, РКМ имеет достаточно высокую предсказательную силу.

Сформулированный подход был надежно апробирован на фундаментальных низкоэнергетических характеристиках легких барионов. С единичных позиций был исследован широкий спектр статических и динамических характеристик нуклонов и легких гиперонов, включая магнитные моменты, зарядовые радиусы, константы полуплептонных распадов, сильные мезон-нуклонные константы, ширины двухчастичных распадов декаплета барионов, электромагнитные формфакторы нуклона в евклидовой области. Кроме того, был сделан расчет параметров низкоэнергетического адрон-адронного рассеяния: сильных мезон-барионных формфакторов, длин πN и фаз NN -рассеяния. Были сделаны предсказания для наблюдаемых характеристик (время жизни и сдвиг основного уровня за счет сильных взаимодействий) адронного $\pi^- p$ атома. Следует подчеркнуть, что впервые в рамках одного подхода при наличии малого числа свободных параметров было достигнуто хорошее количественное согласие с экспериментом одновременно для сильных, слабых и электромагнитных характеристик легких барионов.

Несомненно новым результатом является детальный анализ полуплептонных и нелептонных распадов очарованных и прелестных барионов, который сделан впервые. Это наиболее значимая часть диссертации, имеющая большую практическую ценность в связи с планируемыми экспериментами. Показана связь результатов модели со следствиями симметрии Изгура-Вайзе в пределе бесконечно-больших значений масс тяжелых кварков. Продемонстрировано выполнение модельно-независимых соотношений Бьеркена-Волошина-Ху, накладывающих ограничение на импульсную зависимость формфакторов полуплептонных распадов тяжелых адронов. Впервые вычислен вклад "нефакторизованных" диаграмм в амплитуды нелептонных распадов тяжелых барионов. Показано, что суммарный вклад "нефакторизованных" диаграмм в амплитуды тяжело-легких переходов достигает 60 % от вклада "факторизованной" диаграммы и 30 % в случае $b \rightarrow c$ переходов. Тем самым получены доказательства существенной роли "нефакторизованных" диаграмм в феноменологии нелептонных взаимодействий тяжелых барионов. В связи с планируемыми экспериментами сделаны предсказания для распадных характеристик тяжелых барионов: функций Изгура-Вайзе и их радиусов, ширины распадов, угловых распределений и лептонных спектров, параметров нарушения C и P -четности в слабых взаимодействиях.

Апробация работы. Материалы диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики им.Н.Н.Боголюбова ОИЯИ, а также Теоретическом семинаре Института Теоретической и Экспериментальной Физики (г.Москва), семинарах теоретических отделов Института Физики Высоких Энергий (г.Протвино) и Института Ядерной Физики (г.Новосибирск), семинаре НИИ Физики Санкт-Петербургского государственного университета, семинарах по теоретической физике и квантовой теории поля Томского государственного университета, Теоретических семинарах Института им.П.Шерера (г.Виллиген, Швейцария), Университетов г.Майнц и г.Вупперталь (Германия), Института Физики Словацкой Академии Наук (г.Братислава). Также материалы диссертации были представлены и докладывались на Международном совещании по теории малочастичных и кварк-адронных систем (Дубна, 1987), IX и XIII Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1988; 1996), III Международном симпозиуме "Пион-нуклонная и нуклон-нуклонная физика" (Гатчина, 1989), IX Международной конференции по проблемам квантовой теории поля (Дубна, 1990), VI Международной конференции "Кварки-90" (Телави, 1990), I Международной конференции по проблемам теоретической физики (Томск, 1991), V Международном симпозиуме "Мезоны и легкие ядра" (Чехословакия, 1991), Международной конференции "Структура адронов" (Чехословакия, 1991, 1993; Словакия, 1996), Международном совещании по ядерной физике (Австрия, 1992), Международном рабочем совещании "Связанные системы легких и тяжелых кварков и симметрии" (Дубна, 1993), Международном рабочем совещании "Мезон-барионные взаимодействия в проблеме многих тел" (Дубна, 1994), Международном семинаре "Физика тяжелых кварков" (Германия, 1994), Международном рабочем совещании ОИЯИ-Тайвань "Физика промежуточных и высоких энергий" (Дубна, 1995), Международной конференции по спектроскопии адронов "Адрон-95" (Англия, 1995), VII Международной Ломоносовской конференции по проблемам фундаментальной физики (Москва, 1995), VII Международной конференции по структуре барионов "Барионы '95" (США, 1995), III Немецко-Российском рабочем совещании "Прогресс в физике тяжелых кварков" (Дубна, 1996), IV Международном рабочем совещании "Прогресс в физике тяжелых кварков" (Германия, 1997), Международном рабочем совещании "Прогресс в квантовой хромодинамике" (ДЭЗИ, Германия, 1997).

На защиту выдвигаются следующие положения.

Основные результаты, полученные в диссертации условно можно разделить на три группы.

I. Построение релятивистской кварковой модели барионов:

1. Сформулирована релятивистская кварковая модель барионов, содержащих легкие и тяжелые кварки, позволяющая проводить вычисления их статических и динамических характеристик в области низких энергий.
2. Разработана техника вычисления двухпетлевых и трехпетлевых диаграмм, описывающих барион-барионные взаимодействия.
3. Предложен приближенный метод вычисления двухпетлевых диаграмм, описывающих барионные взаимодействия (кварк-дикварковая аппроксимация), основанный на унитарной симметрии трехкварковых токов легких барионов.
4. На примере низкоэнергетических пионных характеристик (константы распадов, радиусы, формфакторы) исследована чувствительность наблюдаемых адронных характеристик к выбору модельных параметров.

II. Анализ физики нуклонов и легких гиперонов:

1. Описан широкий спектр статических характеристик нуклонов и легких гиперонов: магнитные моменты, зарядовые радиусы, константы полупертурбационных распадов, мезон-нуклонные константы и ширины распадов.
2. Вычислены электромагнитные формфакторы нуклона в пространственно-подобной области значений квадрата переданного импульса фотона.
3. Рассчитаны сильные мезон-нуклонные формфакторы, определяющие потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия. На основе теоретико-полевого уравнения Бланкенбэкклера-Шугара описаны фазы нуклон-нуклонного рассеяния в области $E_{\text{лаб}} \leq 500$ МэВ.
4. Вычислены S -волновые длины πN рассеяния и характеристики адронного $\pi^- p$ атома.

III. Исследование слабых распадов тяжелых барионов. Это наиболее значимая часть диссертации в связи с планируемыми экспериментами и тем обстоятельством, что теоретические методы, позволяющие проводить вычисления различных характеристик тяжелых барионов, еще до конца не разработаны. В секторе тяжелых барионов получено:

1. Впервые сделан последовательный и детальный анализ полупертурбационных и нелептонных распадов барионов, содержащих s и b кварки.
2. Показана связь результатов модели со следствиями симметрии Изгура-Вайзе в пределе бесконечно-больших значений масс тяжелых кварков. Продемонстрировано выполнение модельно-независимых соотношений Бьеркена-Волошина-Ху, накладывающих ограничение на импульсную зависимость формфакторов полупертурбационных распадов тяжелых адронов.
3. Впервые вычислен вклад "нефакторизованных" диаграмм в амплитуды нелептонных распадов тяжелых барионов. Показано, что суммарный вклад "нефакторизованных" диаграмм в амплитуды тяжело-легких переходов достигает 60 % от вклада "факторизованной" диаграммы и 30 % в случае $b \rightarrow c$ переходов. Тем самым получены доказательства существенной роли "нефакторизованных" диаграмм в феноменологии нелептонных взаимодействий тяжелых барионов.
4. В связи с планируемыми экспериментами сделаны предсказания для наблюдаемых характеристик эксклюзивных распадов тяжелых барионов: функций Изгура-Вайзе и их радиусов, ширины распадов, угловых распределений и лептонных спектров, параметров нарушения C и P -четности в слабых взаимодействиях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Она содержит 230 страниц машинописного текста, 46 таблиц и 47 рисунков. Список литературы включает 288 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении ставится задача построения релятивистской кварковой модели, позволяющей последовательным и самосогласованным образом исследовать статические и динамические свойства легких и тяжелых барионов (§0.1). Введение начинается с истории возникновения барионной физики как самостоятельного направления в физике элементарных частиц и обсуждения актуальности данной проблемы (§0.2). Далее в §0.3 следует обзор основных теоретических подходов, позволяющих описывать свойства барионов в области низких энергий. Обзор литературы завершается критическим разбором проблем, которые необходимо решать при описании динамических характеристик барионов (§0.4). Фактически обсуждаются требования, которые необходимо предъявлять к низкоэнергетическим теориям и моделям барионов, претендующим на описание наиболее тонких адронных характеристик (формфакторов, параметров низкоэнергетического рассеяния и т.д.). Делается однозначный вывод о том, что ключевую роль в этом случае должен играть учет кварковой структуры адронов. Затем формулируется цель диссертации (§0.5), излагаются основные идеи предлагаемого подхода к описанию свойств легких и тяжелых барионов. В заключительной части введения излагается структура диссертации (§0.6) и обсуждается ее апробация (§0.7).

В первой главе формулируются основные положения релятивистской кварковой модели, позволяющей описывать статические и динамические свойства мезонов и барионов (§1.1). В §1.2 обсуждается кварковая структура адронов - один из фундаментальных принципов модели. Строятся эффективные лагранжианы взаимодействия адронов с кварками, позволяющие описывать динамику связанных адронных состояний в области низких энергий. Лагранжианы адрон-кваркового взаимодействия содержат кварковые токи, обладающие соответствующими квантовыми числами адрона. Спин-флэйворная структура кварковых адронных токов имеет тот же самый вид, что и в методе правил сумм КХД. Константы связи адронов с кварками вычисляются из условия связности $Z_H = 0$ (условия равенства нулю константы перенормировки адронного поля), играющего ключевую роль в полевых моделях, описывающих динамику связанных состояний в терминах элементарных (кварковых) полей. Наличие протяженной структуры адронов учитывается феноменологическим образом - путем введения в кварковые токи вершинных формфакторов, описывающих распределение кварков в адронах. В §1.3 строятся лагранжианы взаимодействия адронов и кварков с фотонами и лептона-

ми. Обсуждается вопрос градиентной инвариантности. В §1.4 обсуждается выбор параметров модели: вершинных формфакторов и пропагаторов кварков. Вершинные формфакторы выбираются из требования ультрафиолетовой сходимости матричных элементов физических процессов. При выборе пропагаторов кварков рассматриваются две возможности: в виде свободного фермионного пропагатора и в виде целой функции, соответствующей условию конфайнмента кварков. В §1.5 рассматривается техника вычислений матричных элементов физических процессов. В §1.6 в качестве нормировки подхода рассматриваются фундаментальные характеристики π -мезона. Вычисляются константы f_π и $g_{\pi\gamma\gamma}$, электромагнитные радиусы (r_π , $r_{\pi\gamma}$) и формфакторы пиона, определяющие переходы $\pi^\pm \rightarrow \pi^\pm\gamma$ и $\gamma^*\pi^0 \rightarrow \gamma$. На основе выполненных вычислений делается вывод о том, что наблюдаемые характеристики слабо чувствительны к выбору вершинной функции адрон-кваркового взаимодействия. В §1.7 дается заключение к первой главе.

В последующих главах рассматриваются приложения модели к физике легких и тяжелых барионов.

Во второй главе исследуется низкоэнергетическая физика нуклона. Нуклон рассматривается как связанное состояние трех кварков. В §2.2 строятся соответствующие трехкварковые нуклонные токи. Структура вершин взаимодействия нуклонов с кварками моделируется гауссовскими вершинными функциями, содержащими свободный размерный параметр Λ_N . Пропагаторы кварков выбираются в виде свободных фермионных пропагаторов. С использованием всего двух свободных параметров (конституентная масса кварка $m_q = 420$ МэВ и размерный параметр $\Lambda_N = 1.25$ ГэВ) дается описание экспериментальных данных для статических и динамических характеристик нуклонов: магнитных моментов и зарядовых радиусов (см. Таблицу 1), а также электромагнитных формфакторов в пространственно-подобной области значений квадрата переданного импульса (§2.3). В §2.4 вычисляются сильные мезон-нуклонные формфакторы. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными и предсказаниями других теоретических подходов. На основе хорошего согласия полученных результатов с экспериментом делается вывод о том, что сформулированный подход правильно передает поведение нуклона в области низких энергий (§2.5).

Таблица 1. Статические характеристики нуклонов

	μ_p	μ_n	$ \frac{\mu_p}{\mu_n} $	r_E^p (фм)	$\langle r^2 \rangle_E^n$ (фм ²)	r_M^p (фм)	r_M^n (фм)
РКМ	2.79	-1.86	1.50	0.92	-0.132	0.84	0.84
Эксперимент	2.79	-1.91	1.46	0.86 ± 0.01	-0.119 ± 0.004	0.86 ± 0.06	0.88 ± 0.07

В третьей главе исследуются свойства нуклонов и легких гиперонов (Σ , Ξ , Δ , ...) в рамках кварк-дикварковой аппроксимации двухпетлевых трехкварковых диаграмм. Идея кварк-дикваркового приближения основана на унитарной симметрии трехкварковых токов легких барионов (§3.2). В силу данной симметрии в двухпетлевых диаграммах, описывающих барион-барионные взаимодействия выделяется поддиаграмма, соответствующая кварковой петле, которую можно заменить калибровочно-инвариантным образом на пропагатор дикварка. В результате такого анзаца амплитуды физических процессов с участием барионов описываются однопетлевыми кварк-дикварковыми диаграммами. Предложенная схема позволяет самосогласованным и последовательным образом вычислять различные низкоэнергетические характеристики октета и декаплета легких барионов. Имеющиеся свободные параметры фиксируются с учетом большого набора экспериментальных данных из низкоэнергетической мезонной и барионной физики. Полученные результаты сравниваются с результатами других теоретических подходов и экспериментальными данными (§3.3 и §3.4). В §3.3 вычисляются электродинамические характеристики легких барионов: магнитные моменты барионов, зарядовые радиусы нуклонов, константы слабых полуплеетонных распадов октета барионов и электромагнитные формфакторы в пространственно-подобной области. Результаты для магнитных моментов октета барионов μ_B и коэффициентов C_{DB} , характеризующих магнитные моменты переходов $D \rightarrow B\gamma$, приведены в Таблице 2. Видно, что полученные результаты находятся в хорошем количественном согласии с экспериментом.

Таблица 2. Магнитные моменты легких барионов

Процесс	Наблюдаемая Величина	Эксперимент	SU_6	РКМ
$p \rightarrow p\gamma$	μ_p	2.793	2.79	2.798
$n \rightarrow n\gamma$	μ_n	-1.913	-1.86	-1.864
$\Sigma^+ \rightarrow \Sigma^+\gamma$	μ_{Σ^+}	2.42 ± 0.05	2.79	2.465
$\Sigma^- \rightarrow \Sigma^-\gamma$	μ_{Σ^-}	-1.157 ± 0.025	-0.93	-0.820
$\Lambda^0 \rightarrow \Lambda^0\gamma$	μ_{Λ^0}	-0.613 ± 0.004	-0.93	-0.846
$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0\gamma$	$\mu_{\Sigma^0\Lambda^0}$	1.61 ± 0.08	1.61	1.494
$\Xi^- \rightarrow \Xi^-\gamma$	μ_{Ξ^-}	-0.679 ± 0.031	-0.93	-0.790
$\Xi^0 \rightarrow \Xi^0\gamma$	μ_{Ξ^0}	-1.250 ± 0.014	-1.86	-1.582
$\Delta^+ \rightarrow p\gamma$	C_{Δ^+p}	1.25 ± 0.2	1	1.23
$\Delta^0 \rightarrow n\gamma$	C_{Δ^0p}	1.25 ± 0.2	1	1.23
$\Sigma^{*+} \rightarrow \Sigma^+\gamma$	$C_{\Sigma^{*+}\Sigma^+}$	$-(1.25 \pm 0.2)$	-1	-0.97
$\Sigma^{*0} \rightarrow \Sigma^0\gamma$	$C_{\Sigma^{*0}\Sigma^0}$	0.63 ± 0.1	0.5	0.48
$\Sigma^{*0} \rightarrow \Lambda^0\gamma$	$C_{\Sigma^{*0}\Lambda^0}$	$-(1.08 \pm 0.17)$	-0.87	-0.91
$\Xi^{*0} \rightarrow \Xi^0\gamma$	$C_{\Xi^{*0}\Xi^0}$	$-(1.25 \pm 0.2)$	-1	-0.92

В §3.4 исследуются эффекты сильных взаимодействий легких барионов. В качестве первого шага проводится вычисление мезон-барионных формфакторов и ширин двухчастичных сильных распадов декаплета барионов. В Таблице 3 приведены значения вычисленных мезон-барионных формфакторов в точке нулевой передачи. Для сравнения даны результаты для феноменологических формфакторов, которые использовались для описания NN -рассеяния (Machleidt R. et al., Phys. Rep. 149 (1987) 1; Dumbrajs O. et al., Nucl. Phys. B216 (1983) 277). Далее на основе рассчитанных мезон-барионных формфакторов строится потенциал NN -взаимодействия в приближении одномезонного обмена, который используется в уравнении Бланкенбэккера-Шугара с целью вычисления фаз нуклон-нуклонного рассеяния. В финальной части §3.4 проводится расчет длин пион-нуклонного рассеяния и характеристик (π^-p) -атома. Полученные предсказания для времени жизни адронного (π^-p) -атома и сдвига основного энергетического уровня ΔE_1 , за счет сильных взаимодействий хорошо согласуются с результатами недавних экспериментов в PSI. Итоги исследований подводятся в §3.5. Основной вывод состоит в том, что кварк-дикварковое приближение правильно передает трехкварковую структуру легких барионов в области низких энергий.

Таблица 3. Сильные мезон-барионные константы

Вертекс	$G_{MNN(\Delta)}^2(0)/(4\pi)$	
	РКМ	Другие подходы
πNN	13.85	14.08; 14.28 ± 0.018
ηNN	3.96	3.67; 5.0
$\eta' NN$	3.07	3.77; 4.23
$a_0 NN$	0.28	1.62; 1.16
ϵNN	3.95	4.56; 8.85
$f_0 NN$	2.06	4.56; 8.85
ρNN	0.42 (F/G=3.66)	0.41; 0.55 ± 0.06 (F/G=6.1) (F/G=6.1 ± 0.6)
ωNN	3.78 (F/G=-0.07)	10.6; 5.7 ± 2.0 (F/G=0) (F/G=0)
$\pi N\Delta$	0.35	0.36

Четвертая и пятая главы посвящены одному из наиболее перспективных направлений барионной физики - слабым распадам барионов, содержащих один тяжелый кварк b или c . Это наиболее значимая часть диссертации в связи с планируемыми экспериментами.

В четвертой главе рассматриваются полулептонные распады очарованных и прелестных барионов (Рис.1).

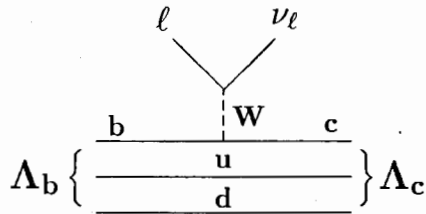


Рис. 1. Полулептонный распад тяжелого бариона

В §4.2 строятся лагранжианы взаимодействия тяжелых барионов с составляющими кварками. При этом для тяжелых кварков рассматривается предел бесконечно больших значений масс тяжелых кварков (предел Изгура-Вайзе). В §4.3 рассматриваются матричные элементы полулептонных распадов тяжелых барионов. В §4.4 анализируются наблюдаемые характеристики полулептонных распадов тяжелых барионов. Для полноты

картины приводятся результаты для лептонных и полулептонных распадов тяжелых мезонов. А именно, вычисляются фундаментальные характеристики физики тяжелых кварков - функции Изгура-Вайзе и параметры их наклона. Исследуется их соответствие модельно-независимым неравенствам Бьеркена-Волошина-Ху, следующих из правил сумм Бьеркена, которые связывают ширину инклюзивного распада b -кварка $b \rightarrow c\ell\bar{\nu}_\ell$ с полной адронной шириной полулептонных распадов Ω_b бариона (B -мезона) в основное и низлежащие возбужденные состояния в пределе Изгура-Вайзе. Показано, что данные неравенства выполняются при разумном выборе свободных параметров, что может служить дополнительным и независимым доказательством обоснованности развиваемого подхода. С использованием вычисленных функций Изгура-Вайзе делаются предсказания для распадных характеристик тяжелых адронов с изменением аромата $b \rightarrow c$. Вычисляются ширины распадов, угловые распределения, лептонные спектры и параметры асимметрии, характеризующие меру нарушения C и P инвариантности в слабых распадах. В качестве иллюстрации в Таблице 4 приведены результаты для ширин распадов прелестных барионов. Для сравнения представлены результаты других теоретических подходов.

Таблица 4. Ширины $b \rightarrow c$ распадов тяжелых барионов (в ед. 10^{10} сек $^{-1}$) при $|V_{bc}|=0.04$

Процесс	[1]	[2]	[3]	РКМ
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ e^- \bar{\nu}_e$	5.9	5.1	5.14	5.39
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^+ e^- \bar{\nu}_e$	7.2	5.3	5.21	5.27
$\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma_c^{++} e^- \bar{\nu}_e$	4.3			2.23
$\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma_c^{*++} e^- \bar{\nu}_e$				4.56
$\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^0 e^- \bar{\nu}_e$	5.4	2.3	1.52	1.87
$\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^{*0} e^- \bar{\nu}_e$			3.41	4.01

- [1] Singleton R., Jr., Phys. Rev. D43 (1991) 2939
- [2] Cheng H.-Y., Tseng B., Phys. Rev. D53 (1996) 1457
- [3] Körner J.G. et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 33 (1994) 787

В заключительной части §4.4 обсуждаются результаты для тяжело-легких мод полулептонных распадов тяжелых барионов. Наиболее детально рас-

сма­трива­ет­ся про­цесс $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$, ко­то­рый не­дав­но был ис­сле­до­ван ко­лла­бо­ра­ци­ей CLEO. Вы­чи­с­ля­ют­ся сла­бые адрон­ные форм­фак­то­ры (f_1 и f_2), ха­рак­те­ри­зу­ю­щие струк­ту­ру ма­трич­но­го эле­мен­та пе­ре­хо­да $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$ в пре­де­ле Из­гу­ра-Вай­зе. По­ка­зы­ва­ет­ся, что ве­ли­чи­на их от­но­ше­ния $R = f_2/f_1$ хо­ро­шо со­г­ла­су­ет­ся с ре­зуль­та­та­ми экс­пе­ри­мен­та CLEO. Да­лее форм­фак­то­ры f_1 и f_2 ис­поль­зу­ют­ся при вы­чи­с­ле­нии ши­ри­ны рас­па­да Λ_c^+ ба­ри­о­на и ве­ли­чи­ны па­ра­мет­ра асим­мет­рии.

В пя­той гла­ве де­таль­ным об­ра­зом изу­ча­ют­ся не­леп­тон­ные рас­па­ды тя­желых ба­ри­о­нов в рам­ках спек­та­тор­но­го при­бли­же­ния для лег­ких квар­ков. Анали­з не­леп­тон­ных рас­па­дов тя­желых ба­ри­о­нов ус­лож­ня­ет­ся не­об­хо­ди­мо­стью уч­е­та на­ря­ду с фак­то­ри­зо­ван­ной диа­грам­мой (Рис.2а) так на­зы­вае­мых не­фак­то­ри­зо­ван­ных диа­грамм (Рис.2б), обус­лов­лен­ных внут­рен­ней эмис­сией W -бо­зо­на.

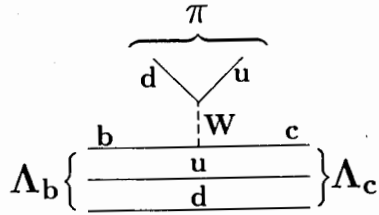


Рис.2а. Факторизованная диаграмма

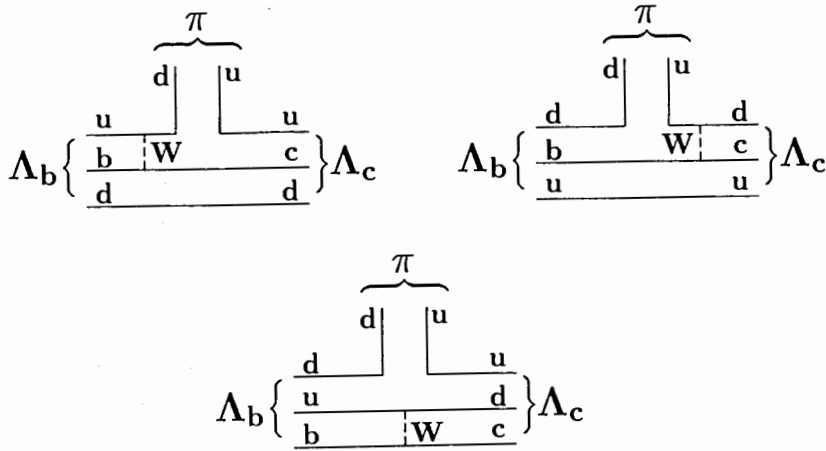


Рис.2б. Нефакторизованные диаграммы

Имеются убедительные аргументы в пользу необходимого учета нефакторизованных диаграмм в амплитудах физических процессов, следующие из экспериментального анализа распадов очарованных барионов. В данной диссертации впервые сделаны оценки вкладов нефакторизованных диаграмм. В §5.2 рассматривается формализм спектаторного приближения. Структура матричных элементов нелептонных распадов тяжелых барионов обсуждается в §5.3. Результаты для наблюдаемых характеристик слабых распадов приводятся в §5.4. Впервые делается оценка вклада нефакторизованных диаграмм в амплитуды нелептонных процессов. Показывается, что вклад нефакторизованных диаграмм не является подавленным по сравнению с вкладом факторизованной диаграммы. При этом он составляет $\sim 60\%$ для тяжело-легких переходов и $\sim 30\%$ для тяжело-тяжелых переходов. Вычисляются формфакторы, ширины распадов и параметры асимметрии для различных мод двухчастичных нелептонных распадов тяжелых барионов с псевдоскалярными мезонами (π, K, η, η') в конечном состоянии. Достигается хорошее согласие с известными экспериментальными данными для распадов очарованных барионов (Таблица 5) и делаются предсказания для распадных характеристик прелестных барионов (Таблица 6).

Таблица 5. Брэнчинги (в %) нелептонных распадов очарованных барионов.

Процесс	[1]	[2]	[3]	РКМ	Эксперимент
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+$	0.76	1.67	0.91	0.79	0.79 ± 0.18
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 \pi^+$	0.33	0.35	0.74	0.88	0.88 ± 0.20
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \pi^0$	0.33	0.35	0.74	0.88	0.88 ± 0.22
$\Lambda_c^+ \rightarrow p \bar{K}^0$	2.16	1.24	1.30	2.06	2.2 ± 0.4
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+$	0.27	0.10		0.31	0.34 ± 0.09

- [1] Körner J.G., Krämer M., Z. Phys. C55 (1992) 659
 [2] Xu Q.P., Kamal A.N., Phys. Rev. D46 (1992) 270
 [3] Cheng H.-Y., Tsen B., Phys. Rev. D48 (1993) 4188

Таблица 6. Ширины распадов Γ (в ед. 10^{10} s^{-1}) и параметры асимметрии α для $b \rightarrow c$ переходов.

Процесс	Γ	α	Процесс	Γ	α
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-$	0.382	-0.99	$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \pi^0$	0.014	0.94
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ \pi^-$	0.039	0.65	$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \eta$	0.015	-0.98
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \pi^0$	0.039	0.65	$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \eta'$	0.021	0.97
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \eta$	0.023	0.79	$\Xi_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ K^-$	0.010	-0.73
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \eta'$	0.029	0.99	$\Xi_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ K^-$	0.030	-0.74
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 K^0$	0.021	-0.81	$\Xi_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \bar{K}^0$	0.021	0
$\Lambda_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 K^0$	0.032	0.98	$\Xi_b^0 \rightarrow \Omega_c^0 K^0$	0.023	0.65
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^+ \pi^-$	0.479	-1.00	$\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^-$	0.645	-0.97
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^+ \pi^-$	0.018	0.61	$\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^-$	0.007	-1.00
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \pi^0$	0.002	-0.99	$\Xi_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 K^-$	0.016	-0.98
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \eta$	0.012	-0.86	$\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^0 \pi^-$	0.352	0.60
$\Xi_b^0 \rightarrow \Xi_c^0 \eta'$	0.003	0.71			

В заключительной части §5.4 даются предсказания для брэнчингов и параметров асимметрии распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda$ и $\Lambda_c^+ \rightarrow p \phi$. При этом вычисленное значение брэнчинга $\text{Br}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda) = 0.027\%$ хорошо согласуется с результатом $\text{Br}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda) = (0.037 \pm 0.017 \pm 0.004)\%$ недавних измерений коллаборации CDF. В §5.5 подводятся итоги проведенных исследований и намечаются перспективы дальнейших исследований.

В заключении перечисляются основные результаты, выдвигаемые для защиты.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Г.В.Ефимов, М.А.Иванов, В.Е.Любовицкий, *Кварковая структура нуклона и сильные мезон-нуклонные формфакторы*, ЯФ, **48** (1988) 198-208.
2. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Strong Nucleon and Δ -Isobar Form Factors in the Quark Confinement Model*, Few-Body Systems, **6** (1989) 17-43.

3. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Quark-Diquark Approximation of the Three-Quark Structure of Baryons in the Quark Confinement Model*, Z. Phys., **C47** (1990) 583-594.
4. Г.В.Ефимов, М.А.Иванов, В.Е.Любовицкий, А.Г.Русецкий, *Микроскопическое описание S-волновых длин πN -рассеяния и времени жизни ($p\pi^-$)-атома в модели конфайнированных кварков*. ЯФ, **51** (1990) 190-199.
5. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *Rare kaon decays $K_{L(S)}^0 \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$ in the Quark Confinement Model*, Z. Phys., **C52** (1991) 129-135.
6. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Predictions for Semileptonic Decays Rates of Charmed Baryons in the Quark Confinement Model*, Z. Phys., **C52** (1991) 149-158.
7. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *$B \rightarrow C$ Flavour Changing Decays of Baryons Containing a Single Heavy Quark*, Z. Phys., **C54** (1992) 349-356.
8. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Nucleon-Nucleon Phase Shift Description within Relativistically Invariant Quark Model*, Few-Body Systems (Suppl.), **5** (1992) 464-470.
9. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Quark Model Based Relativistically Invariant Meson Exchange Forces for Two-Nucleon Scattering*, Czech. J. Phys., **43** (1993) 747-760.
10. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Low Energy NN Scattering with Coupling Predicted by Relativistically Invariant Quark Model*, Acta Phys. Slov., **43** (1993) 387-402.
11. I.V.Anikin, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *To the Lagrangian Formulation of NJL-Model with Separable Interaction*, ЯФ, **57** (1994) 1082-1090.
12. М.А.Иванов, Н.Б.Ладыгина, В.Е.Любовицкий, *Полупертоновые распады тяжелых барионов*, ЭЧАЯ, **26** (1995) 146-191.

13. И.В.Аникин, М.А.Иванов, В.Е.Любовицкий, *Проверка неравенства Бьеркена-Ху для функций Изгура-Вайзе тяжелых барионов*, ЯФ, **58** (1995) 2243-2251.
14. I.V.Anikin, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *The Extended Nambu-Jona-Lasinio Model with Separable Interaction: Low energy Pion Physics and Pion-Nucleon Form Factor*, Z. Phys., **C65** (1995) 681-690.
15. M.A.Ivanov, M.P.Locher, V.E.Lyubovitskij, *Electromagnetic Form Factors of Nucleons in a Relativistic Three-Quark Model*, Few-Body Systems, **21** (1996) 131-147.
16. I.V.Anikin, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *The Low Energy Physics of Pion in the Relativistic Model with a Separable Interaction*, Chinese J. Phys., **34** (1996) 944-948.
17. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Weak Decays of Heavy Baryons in the Relativistic Quark Model*, Chinese J. Phys., **34** (1996) 1041-1046.
18. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *The $\gamma^* \pi \rightarrow \gamma$ Form Factor*, Phys. Lett., **B408** (1997) 435-438.
19. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, J.G.Körner, P.Kroll, *Heavy Baryon Transition in a Relativistic Three-Quark Model*, Phys. Rev., **D56** (1997) 348-364.
20. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Relativistic Quark Model Based Description of Low-Energy NN Scattering*, Int. J. Mod. Phys., **A12** (1997) 1385-1404.
21. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, A.G.Rusetsky, J.G.Körner, *Exclusive Nonleptonic Bottom to Charm Baryon Decays Including Nonfactorizable Contributions*, Mod. Phys. Lett., **A13** (1998) 181-191.
22. M.A.Ivanov, J.G.Körner, V.E.Lyubovitskij, A.G.Rusetsky, *Exclusive Nonleptonic Decays of Bottom and Charm Baryons in a Relativistic Three-Quark Model: Evaluation of Nonfactorizing Diagrams*, Phys. Rev., **D57** (1998) 5632-5652.
23. A.D.Chelidze, G.V.Efimov, M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, A.G.Rusetsky, *A Role of the Quark Structure in the Description of the s-Wave πN -Scattering Lengths and NN Phase Shifts*, Proc. of Third Int. Symp. "Pion-Nucleon and Nucleon-Nucleon Physics, Gatchina (1989), Ed. I.Lopatin, Leningrad, vol.2, (1989) 255-262.
24. G.V.Efimov, M.A.Ivanov, O.E.Khomutenko, V.E.Lyubovitskij, *Confinement of Light Quarks and Decays of Heavy Mesons*, Proc. of IX Int. Conf. on the Problems of the Quantum Field Theory, Dubna (1990), Ed. V.Kadyshevskij, D2-90-461, (1990) 56-60.
25. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Description of Nucleon Scattering in Relativistic Quark Model*, Proc.of Int.Conf."Hadron Structure' 91", Stará Lesná, Slovakia (1991), Ed. Ľ.Martinovič, (1991) 257-263.
26. R.Antalik, V.E.Lyubovitskij, *Meson-Nucleon Form Factors from Quark Model and Low Energy NN Scattering*, Proc. of Int. Conf. "Hadron Structure' 93", Banská Štiavnica, Slovakia (1993), Ed. S.Dubnicka, Institute of Physics, Bratislava, (1993) 333-340.
27. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Semileptonic Decays of Heavy Baryons: Isgur-Wise Functions and Observables of Bottom Baryons Decays*, Proc. of 138. WE-Heraeus-Seminar "Heavy Quark Physics", Bad Honnef, Germany (1994), Ed. J. Körner and P. Kroll, World Sci. Publ., (1994) 81-84.
28. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Semileptonic Decays of Charm and Bottom Baryons in the Relativistic Quark Model*, Proc. of Int. Conf. on Hadron Spectroscopy "HADRON-95", Manchester, UK (1995), Ed.by M. C. Birce et al., World Sci. Publ., (1995) 396-398.
29. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Heavy Baryons in a Relativistic Quark Model with a Nonlocal Interaction of Light Quarks*, Proc. of III German-Russian Workshop "Heavy Quark Physics", Dubna (1996), Ed. M.A.Ivanov and V.E.Lyubovitskij, (1996) 105-109.
30. V.E.Lyubovitskij, M.A.Ivanov, *Relativistic Quark Model Results for Heavy Baryon Semileptonic Decays*, Proc. of 7th Int. Conf. on the Structure of Baryons "BARYONS' 95", Santa Fe, USA (1995), Ed. by B. F. Gibson et al., World Sci. Publ., (1996) 547-550.

31. M.A.Ivanov, M.P.Locher, V.E.Lyubovitskij, *Electromagnetic Properties of Nucleons in a Relativistic Three-Quark Model*, Proc. of the Int. Conf. "Hadron Structure '96", Stará Lesná, Slovakia (1996), Ed. Ľ.Martinovič and P.Stríženec, Institute of Physics, Bratislava, (1996) 328-332.
32. I.Anikin, M.Ivanov, V.Lyubovitskij, *The Extended Nambu-Jona-Lasinio Model with Separable Interaction: Low Energy Pion Physics*, Proc. of VII Int. Conf. on Problems of Fundamental Physics, Moscow, Russia (1995), Ed. A.I.Studenikin, Moscow, (1997) 31-36.
33. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, M.P.Locher, *Nucleon Form Factors in a Relativistic Quark Model*, Proc. of XIII Int. Sem. on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics", Dubna (1996), Ed. A.Baldin.
34. V.E.Lyubovitskij, M.A.Ivanov, J.G.Körner, A.G.Rusetsky, *Exclusive Nonleptonic Decays of Heavy Baryons in a Relativistic Quark Model*, Proc. of IV Int. Workshop on Progress in Heavy Quark Physics, Rostock, Germany (1997), Ed. M.Beyer et al., Rostock, (1998) 167-170.
35. I.V.Anikin, M.A.Ivanov, N.B.Kulimanova, V.E.Lyubovitskij, *Sensitivity to Form Factors in the Extended Nambu-Jona-Lasinio Model with Separable Interaction*, Preprint PSI-PR-93-08, Villigen, 1993, 18p.
36. M.A.Ivanov, V.E.Lyubovitskij, *Isgur-Wise Function and Polarization Characteristics of Λ_b Baryon*, Preprint JINR E2-94-325, Dubna, 1994, 18p.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 мая 1998 года.