

Г-212



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.12+539.14+539.17

2-85-911

ГАРСЕВАНИШВИЛИ
Вахтанг Романович

**КВАЗИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ
В ПЕРЕМЕННЫХ СВЕТОВОГО ФРОНТА
И ПРОБЛЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Отделе теоретической физики Математического института АН ГССР и в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

ВАГРАДОВ
Георгий Михайлович

доктор физико-математических наук
профессор

СМОРОДИНСКИЙ
Яков Абрамович

доктор физико-математических наук
профессор

ТКЕБУЧАВА
Феликс Григорьевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Математический институт им. В.А.Стеклова АН СССР

Защита диссертации состоится "___" _____ 1986 года в
" " часов на заседании специализированного совета Д047.01.01 при
Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных ис-
следований, г. Дубне, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1986 г.

Ученый секретарь специализированного
Совета

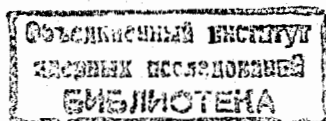
В. И. ЖУРАВЛЕВ

Актуальность проблемы. Изучение процессов взаимодействия частиц и ядер при высоких энергиях представляет собой одну из основных задач физики элементарных частиц. На разных этапах эту задачу ставили и решали как экспериментально, так и теоретически, исходя из существующих в данное время технических возможностей и теоретических представлений, основу которых вот уже в течение нескольких десятилетий составляет квантовая теория поля.

Принципы инвариантности и законы сохранения, всегда служившие направляющим звеном в построении физических теорий, приобрели в настоящее время особое значение. Современный этап развития квантовой теории характеризуется ключевой ролью нового квантового числа — цвета кварков (Н.Н.Боголюбов, Б.В.Струминский, А.Н.Тавхелидзе; М.Хан, Й.Намбу; Й.Миямото) и принципа локальной калибровочной инвариантности Янга-Миллса.

Свойство асимптотической свободы квантовой хромодинамики (калибровочной теории взаимодействия цветных кварков и глюонов) позволяет рассчитывать в низших порядках теории возмущений процессы взаимодействия партонов на малых расстояниях. Однако здесь остается нерешенной проблема больших расстояний, в разрешении которой исследования с атомными ядрами играют столь же фундаментальную роль, как и исследования с самими ядрами. Более того, высокоэнергетические процессы с участием атомных ядер позволяют исследовать многокварковые состояния, одним из наиболее ярких проявлений которых является эффект кумулятивного рождения частиц (А.М.Баддин), и, возможно, даже новое состояние ядерной материи — кварк-глюонную плазму. В этих процессах может проявиться важная физическая характеристика ядерной материи — "скрытый цвет" атомных ядер (В.А.Матвеев).

Теоретические и экспериментальные исследования последнего времени привели к представлению об ядрах как о сложных релятивистских объектах со многими внутренними степенями свободы. Одновременно с этим изучение взаимодействий ядер высоких энергий привело к выводу о неполноте представлений о ядрах как о системах квазинезависимых нерелятивистских нуклонов, и потребовало как релятивистского описания движения самих нуклонов, так и рассмотрения кварковых степеней свободы в ядрах. Приведенные соображения определили предмет исследований, положенных в основу диссертации: вывод и анализ релятивистских многочастичных уравнений, применение развитых методов к изучению высокоэнергетических взаимодействий частиц и ядер и сравнение полученных при этом результатов с экспериментом для проверки адекватности развиваемых представлений.



Цель работы. Исследования, вошедшие в настоящую диссертацию, были направлены на создание релятивистского подхода к ядерным процессам, позволяющего учитывать как нуклонные, так и кварк-партоные степени свободы в ядрах и описывающего широкий класс взаимодействий с участием атомных ядер.

По современным представлениям, и адроны, и ядра являются связанными состояниями более элементарных составляющих. Основными источниками информации о связанных состояниях являются процессы взаимодействия между ними или их взаимодействие с частицей, которую на данном этапе исследования можно рассматривать как бесструктурную. Так как при высокоэнергетических взаимодействиях доминирующую роль играют неупругие процессы, то восстановление полной картины конечного состояния представляется практически неосуществимой задачей. С этой точки зрения стимулирующее влияние на развитие физики высоких энергий оказал новый путь к исследованию структуры частиц - инклюзивный подход А.А. Логунова с сотрудниками. Именно на этом пути было, в частности, обнаружено явление масштабной инвариантности и найдено указание на точноподобную кварк-партоновую картину строения адронов.

Для описания процессов с участием релятивистских ядер были разработаны различные теоретические модели, однако теоретической схемы, удовлетворительно описывающей всю совокупность данных, пока не существует. При изучении процессов с участием атомных ядер нередко возникают ситуации, требующие учета малых межнуклонных расстояний, что соответствует большим относительным импульсам составляющих ядро частиц. Возникает проблема адекватного описания ядер при произвольных импульсах его составляющих. Таким образом, для описания процессов ядерных взаимодействий удобнее пользоваться не обычными квантово-механическими ядерными волновыми функциями, которые соответствуют движению нуклонов с малыми внутренними импульсами, а функциями, в которых будет учтен релятивистский характер движения кварков, нуклонов или других образований внутри ядра.

Предложенный А.А. Логуновым и А.Н. Тавхелидзе, основанный на формализме двухвременных функций Грина, квазипотенциальный подход в квантовой теории поля сочетает в себе строгость положений квантовой теории поля с простотой и наглядностью основных уравнений и их физической интерпретацией. Заметим, что в квантовой теории поля систему взаимодействующих частиц можно описывать с помощью ковариантного формализма Бете-Солпитера. Однако факт зависимости амплитуды Бете-Солпитера от относительного времени двух частиц делает затруднительной ее вероятностную интерпретацию и вносит ряд математических трудностей, преодоление которых вырастает в самостоятельную трудную задачу.

Научная новизна. Развита и впервые применена к процессам высокоэнергетических взаимодействий ядер формализм светового фронта для релятивистских многочастичных систем, позволяющий учитывать как нуклонные, так и кварк-партоные степени свободы в ядрах.

Впервые предложено представление данных по сечениям инклюзивных процессов в переменных светового фронта, позволяющее более четко (по сравнению с используемыми в настоящее время методами) разделить фазовое пространство на области, называемые традиционно центральной и фрагментационными.

Впервые изучена кинематика и модельная динамика глубоко неупругих лептон-ядерных процессов, когда в конечном состоянии наряду с лептоном регистрируется и фрагмент начального ядра.

Практическая ценность. Разработанный подход и оригинальные результаты нашли широкое применение в исследованиях релятивистских кварковых моделей адронов и в релятивистской ядерной физике.

Предложенные методы использовались во многих исследованиях других авторов, как теоретических, так и экспериментальных.

Проведено сравнение части полученных теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными. Другая часть может быть доведена до сравнения с экспериментом после получения соответствующих данных.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Развита квазипотенциальная формализм в переменных "светового фронта" для двух и многочастичных релятивистских систем. Уравнения этого подхода составляют удобный инструмент для решения широкого круга задач физики элементарных частиц и атомного ядра.

2. Предложено новое представление данных по сечениям инклюзивных процессов в переменных "светового фронта", которые в двух предельных случаях переходят в широко используемые в физике высоких энергий переменные ($x_F = 2p_z/\sqrt{s}$) в областях фрагментации и $x_1 = P_1/\sqrt{s}$ в области больших поперечных импульсов). Анализ соответствующих данных в этих переменных приводит к более четкому по сравнению с используемыми в настоящее время методами разделению фазового пространства на области центральную и фрагментационные.

3. Исследованы вопросы взаимодействия релятивистских составных систем. Показано, что механизм обмена кварковыми составляющими в сочетании со степенным характером импульсных распределений кварков в адронах воспроизводит результаты правил кваркового счета Матвеева-Мурадяна-Тавхелидзе.

4. Разработан метод построения упругих и глубоконеупругих формфакторов и амплитуд рассеяния составных систем. Показано, что учет поперечного движения кварков в терминах релятивистских волновых функций с масштабно-инвариантной параметризацией "продольного" движения составляющих приводит к нарушению бьеркеновского скейлинга структурных функций.

5. На основе учета многокварковых конфигураций в ядрах проведен анализ EMC-эффекта. Дано объяснение отклонению отношения $F_2(A_1)/F_2(A_2)$ от единицы как результата глубоконеупругого рассеяния лептонов на бесцветных многокварковых конфигурациях в ядрах, находящихся "в среде" непроявляющихся нуклонов ядра. Даны предсказания для отношения $F_2(A_1)/F_2(A_2)$ для различных ядер с атомными номерами A_1 и A_2 во всей допустимой кинематической области изменения бьеркеновской переменной. Прослежена связь между процессами кумулятивного рождения частиц и глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах, как процессами, в которых изучается одна и та же физическая характеристика - кварк-партоновая функция ядра.

6. Поставлена и решена проблема релятивизации ядерных волновых функций. Получены релятивистские аналоги известных волновых функций легких ядер, обладающие масштабными свойствами по переменным "светового фронта", записанные в произвольной лоренцевой системе отсчета и при произвольных значениях импульса ядра как целого и внутренних импульсов его составляющих.

7. Сформулированы основные моменты релятивистского подхода к описанию процессов с участием атомных ядер и даны некоторые его приложения. В частности, проведен расчет ряда высокоэнергетических ядерных процессов и предсказаны масштабные свойства сечений в переменных "светового фронта", вытекающие из масштабных свойств волновых функций. Показано, что в доступной проверке области энергий падающих легких ядер указанные масштабные свойства выполняются с хорошей точностью.

8. Развита методика изучения процессов глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах и рождения лептонных пар в адрон-ядерном взаимодействии, когда в конечном состоянии наряду с лептонами на совпадение регистрируется и фрагмент начального ядра. Впервые проведен кинематический анализ этих процессов и выделены независимые структурные функции, характеризующие эти процессы. Установлены масштабные свойства этих структурных функций в бьеркеновском пределе, в области фрагментации ядра, и их связь со структурными функциями глубоконеупругих лептон-адронных процессов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения, содержит 201 страницу машинописного текста, 21 рисунок, 1 таблицу и список литературы из 212 названий.

Содержание работы. Во введении дан обзор современных представлений о взаимодействиях частиц и ядер при высоких энергиях, сформулированы мотивировки, приводящие к постановке затронутых проблем. Кратко сформулированы основные вопросы, изложенные в основном тексте диссертации.

Первая глава диссертации посвящена разработке квазипотенциального формализма в переменных "светового фронта". Дан вывод уравнений для связанных состояний и задач рассеяния. Прослежена связь и отличие уравнений этого подхода с уравнением Вайнберга, полученным в рамках старой теории возмущений в системе с бесконечным импульсом. Поскольку основное отличие в этих уравнениях состоит в определении продольных масштабно-инвариантных переменных (p_z/P_z в уравнении Вайнберга и $(p_0 + p_z)/(P_0 + P_z)$ в нашем случае), которые выступают как внутренние переменные в описании составной системы и непосредственно не измеряются, то поставлена задача о нахождении возможных отличий в наблюдаемых величинах. С этой целью проведен анализ инклюзивных распределений вторичных частиц в адрон-адронных соударениях при высоких энергиях в переменных "светового фронта" и найдено существенное отличие соответствующих ξ^+ -распределений от распределений тех же частиц по фейнмановской переменной $x_F = 2p_z/\sqrt{s}$ (в этом случае аналог переменной p_z/P_z в уравнении Вайнберга).

Во второй главе развит метод построения релятивистских упругих формфакторов и амплитуд рассеяния составных систем в формализме "светового фронта". Получено общее выражение для матричного элемента тока составной системы в терминах релятивистских волновых функций в переменных "светового фронта" и обобщенного вершинного оператора \hat{F}_μ . В импульсном приближении получен явный вид вершинного оператора и выписан электромагнитный формфактор составной системы, состоящей как из двух, так и из произвольного числа составляющих.

Здесь же исследованы вопросы взаимодействия релятивистских составных систем в рамках развитого формализма. Получен общий вид амплитуды рассеяния составных частиц через релятивистские волновые функции и оператор перехода. Изучен механизм с обменом точечными кварковыми составляющими. Этот механизм в сочетании со степенным видом импульсных распределений кварков в адронах позволяет воспроизвести результаты анализа размерностей с привлечением предположения о кварковой структуре адронов (правила кваркового счета).

Изучению глубоконеупругих формфакторов составных систем посвящена **третья глава** диссертации. Здесь, аналогично случаю упругих формфакторов, получено общее выражение для тензора $W_{\mu\nu}$ через волновые функции в переменных "светового фронта" и обобщенную "двухфотонную верши-

ну" $\tilde{F}_{\mu\nu}$. В низшем порядке по электромагнитному взаимодействию вычислен явный вид оператора $\tilde{F}_{\mu\nu}$ и выписаны выражения для структурных функций W_1 и νW_2 . Приведен явный вид этих структурных функций в случае некоторых конкретных параметризаций волновой функции составной системы. Показано, что учет поперечного движения кварков приводит к нарушению бьеркеновского скейлинга.

В связи с результатами экспериментов по кумулятивному рождению частиц и недавних экспериментов по глубококонепругому лептон-ядерному рассеянию (ЕМС-эффект) поставлен вопрос об объяснении эффекта заметного отличия в поведении структурных функций ядер с различными атомными номерами. Показано, что этот эффект качественно можно объяснить рассеянием на бесцветных многокварковых образованиях в ядрах. При этом учитывается, что данное многокварковое образование находится в среде непроявляющихся нуклонов ядра, по релятивистскому движению которых проводится соответствующее усреднение.

В четвертой главе поставлены и изучены вопросы релятивизации ядерных волновых функций, возникшие в связи с развитием исследований в области релятивистской ядерной физики. Рассмотрен случай двухнуклонного ядра-дейтрона. Указан путь релятивизации известных из нерелятивистской ядерной физики волновых функций дейтрона. Предлагается способ проверки масштабных свойств "продольного движения", заложенного в релятивистскую волновую функцию - изучение распределений нуклонов-спектаторов в процессе развала дейтрона при различных начальных энергиях.

Рассмотрены вопросы релятивизации волновых функций более сложных ядер. С целью проверки масштабных свойств этих волновых функций проведен расчет дифференциального сечения процесса частичного развала релятивистского ядра на водородной мишени. В рамках релятивистской гауссовской параметризации волновых функций начального и конечного ядер вычислен интеграл их перекрытия и даны предсказания для спектров ядер-спектаторов.

Проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными по фрагментации ${}^4\text{He} \rightarrow {}^3\text{He}$; ${}^3\text{He} \rightarrow d$. Анализ данных показывает, что в проверенной области энергий с хорошей точностью выполняются масштабные свойства релятивистских волновых функций ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$.

В пятой главе изучаются глубококонепругие лептон-ядерные процессы на совпадение, т.е. процессы, в которых в конечном состоянии одновременно с лептонами регистрируется спектаторный фрагмент начального ядра. Подробно изучена кинематика таких процессов и выделены независимые структурные функции, характеризующие эдронные части рассматриваемых процессов. Получены выражения для дифференциальных сечений рассмотренных процессов через введенные структурные функции. Проведен

размерный анализ структурных функций и на основе принципе автомодельности получены их масштабные свойства в бьеркеновском пределе в области фрагментации начального ядра. Получена связь между структурными функциями глубококонепругих лептон-ядерных процессов на совпадение и известными структурными функциями глубококонепругих процессов на нуклоне в предположении, что процесс происходит на отдельных нуклонах начального ядра. Здесь, как и в предыдущей главе, возникает интеграл перекрытия релятивистских волновых функций начального ядра и ядра-спектатора. Однако отсутствие в настоящее время соответствующих данных не позволяет провести сравнение теоретических результатов с экспериментом.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Апробация работ. Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались на семинарах в ЛТФ и ЛВЭ ОИЯИ, в ФИАН СССР, в ИФВЭ ТГУ, в ИИЯЭ Болгарской АН, в Варшавском институте ядерных исследований, в Страсбургском центре ядерных исследований, в Международном центре теоретической физики (Триест), на Международном семинаре по глубококонепругим и инклюзивным процессам (Сухуми, 1975), на Международной школе по теоретической физике (Карпач, 1976), на ХУШ Международной конференции по физике высоких энергий (Тбилиси, 1976), на Международной школе по физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике (Гомель, 1977), на Школе по физике высоких энергий (Бакуриани, 1980), на Международной конференции по физике элементарных частиц (Аренсхол, 1980), на Международных семинарах "Кварки-80", "Кварки-82" (Сухуми, 1980, 1982), "Кварки-84" (Тбилиси, 1984), на Международном семинаре по проблеме физики высоких энергий (Протвино, 1984), на УП Международном семинаре по физике высоких энергий (Дубна, 1984).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.Р.Герсеванишвили, В.А.Метвеев. О релятивистских формфакторах многочастичных систем. ТМФ, 1975, т. 24, стр. 3.
2. V.R.Garsevanishvili. Problems of Interactions of the Relativistic Composite Systems. In: "Recent Development of the Relativistic Quantum Field Theory and Its Applications". Lectures at the XIII Winter School of Theoretical Physics. Karpacz, February, 1976, p. 315.
3. В.Р.Герсеванишвили. К вопросу о формфакторах составных систем. Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 23, стр. 58.
4. V.R.Garsevanishvili, D.G.Mirianashvili. Moving Deuterons and the Relativistic. Three Body Problem. Rep. Math. Phys., 1977, v. 11, p. 89.

5. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили, Д.Г.Мирианшвили, М.С.Ниорадзе. О распределении фрагментов-спектаторов в процессах с участием релятивистских ядер. ТМФ, 1977, т. 33, стр. 236.
6. В.Р.Гарсеванишвили. Рассеяние составных частиц и квазипотенциальный подход в переменных светового фронта. В Трудях Международного семинара "Глубокоупругие и инклюзивные процессы", Сухуми, 1975, Изд. ИЯИ АН СССР, 1977, с.75.
7. Л.Н.Абесалашвили, Н.С.Амаглобели, В.Р.Гарсеванишвили и др. Об одной масштабно-инвариантной переменной для описания адрон-адронных взаимодействий. Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 28, с. 174.
8. L.N.Abesalashvili, N.S.Amaglobeli, V.R.Garsevanishvili et al. Perhaps a New Scaling Variable for the Description of Hadron-Hadron Interactions- In Proc. of the IV European Antiproton Symposium, Strasbourg, 1978, Ed. by A.Fridman, vol. 1, p. 495.
9. Абесалашвили, Н.С.Амаглобели, В.Р.Гарсеванишвили и др. Инклюзивный анализ π - p -взаимодействий в переменных светового фронта. ЯФ, 1979, т. 30, стр. 156.
10. Л.Н.Абесалашвили, Н.С.Амаглобели, В.Р.Гарсеванишвили и др. О "критических" поверхностях в фазовом пространстве частиц, инклюзивно рожденных в адрон-адронных соударениях. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, стр. 448.
11. В.Р.Гарсеванишвили, Д.Г.Мирианшвили, М.С.Ниорадзе. Процессы с участием релятивистских ядер и многочастичный формализм в переменных светового фронта. Лекции на Международной школе по физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике. Гомель, 1977. Изд. ОИЯИ, Д2-11707, Дубна, 1979, с.419.
12. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили, Я.З.Дарбаидзе. О глубокоупругом рассеянии лептонов на ядрах. ТМФ, 1980, т. 42, стр. 50.
13. Б.С.Аладешвили, ..., В.Р.Гарсеванишвили и др. Эксперименты с пучками ядер высоких энергий и проблема релятивизации ядерных волновых функций. ЯФ, 1981, т. 34, стр. 1063. Preprint CRN 80-1, Strasbourg, 1980.
14. Ya.Z.Darbaidze, Sh.M.Esakia, V.R.Garsevanishvili, Z.R.Menteshashvili. Problems of Deep Inelastic Lepton-Nucleus Interactions. Fortschritte der Physik. 1980, Band 28, p. 506.
15. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили, Ш.М.Эсакия. О структурных функциях глубокоупругого лептон-адронного взаимодействия. Труды ТГУ, Физика, 1981, т. 226, стр. 58.
16. В.Р.Гарсеванишвили, Я.З.Дарбаидзе, З.Р.Ментешашвили, Ш.М.Эсакия. В Трудях Международного семинара "Кварки-80", Сухуми, 1980, Изд. ИЯИ АН СССР, 1982, стр. 121.

17. N.S.Amaglobeli, V.R.Garsevanishvili et al. Perhaps a New Unified Scaling Variable for the Description of Low and High P_{\perp} -Processes? Preprint ICTP, IC/82/191, Trieste, 1982, с.287.
В трудах Международного семинара "Кварки-82", Сухуми, 1982, Изд. ИЯИ АН СССР, 1983,
18. V.R.Garsevanishvili, Z.R.Menteshashvili. On the Problem of Quark Degrees of Freedom in Nuclei. JINR-preprint, E2-84-314, Dubna, 1984.
19. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили, Д.Г.Мирианшвили, М.С.Ниорадзе. Вопросы теории ядерных взаимодействий в релятивистском подходе. ЭЧАЯ, 1984, т. 15, стр. IIII.
20. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили. К вопросу о многокварковых конфигурациях в ядрах. Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 40, стр. 539.
21. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили. К вопросу о кварковых степенях свободы в ядрах. В Трудях VII Международного семинара по физике высоких энергий. Изд. ОИЯИ, Д1,2-84-509, Дубна, 1984, с. 157.
22. V.R.Garsevanishvili. Light Front Formalism for Few Body Systems and Some of Its Applications. In Proc. of the IX European Conference on Few Body Problem in Physics, Tbilisi, 1984, p. 387. World Scientific Singapore-Philadelphia. Ed. L.Faddeev, T.Kopaleishvili.
23. В.Р.Гарсеванишвили, З.Р.Ментешашвили, Д.Г.Мирианшвили, М.С.Ниорадзе. О масштабных свойствах релятивистских волновых функций ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$. ЯФ, 1985, т. 41, стр. 587.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 декабря 1985 года