

539.12.01(063)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ
(по материалам III международного совещания по нелокальной
квантовой теории поля, Алушта, 23—29 апреля 1973 г.)

Г. В. Ефимов, А. В. Ефремов, В. Н. Первушин

Прогресс в понимании физики мира элементарных частиц, достигнутый за последние годы, в значительной степени связан с развитием квантовой теории поля. И уже совсем далеким кажется тот период, когда возникали предложения вообще похоронить теорию поля, заменив ее концепцией аналитических свойств амплитуд. Развитие калибровочных и киральных теорий со спонтанно нарушенной симметрией, неполиномиальных и нелокальных теорий, а также методов вычисления, выходящих за рамки теории возмущений, не только позволило объяснить и предсказать ряд экспериментальных фактов, но и обогатило арсенал теоретической физики рядом довольно глубоких по содержанию физических явлений и «механизмов». Именно этим вопросам было посвящено III международное совещание по нелокальной квантовой теории поля.

Основной целью совещания, как и двух предыдущих (Дубна, 1967 г., Азау, 1970 г.) было обсуждение проблем, связанных с построением самосогласованной квантовой теории поля с радикальной модификацией теории на малых расстояниях и с поиском возможных экспериментальных следствий структуры пространства-времени на малых расстояниях (доклады Д. И. Блохинцева, Г. В. Ефимова, В. Г. Кадышевского (ОИЯИ), Г. В. Ватагина (Италия), Д. А. Киржница (ФИАН СССР) и др.).

Гипотеза о существовании нового, после константы Планка и скорости света, «масштаба природы» была выдвинута Г. В. Ватагиным в 1934 г. Критический обзор ряда попыток построения нелокальных теорий дан в монографии Блохинцева¹.

Внутренним стимулом к нелокальному обобщению теории поля были и остаются трудности с ультрафиолетовыми расходимостями, возникающие при разложении матрицы рассеяния по константе связи. Как известно², в данном случае мы имеем дело с математической проблемой умножения друг на друга сингулярных обобщенных

функций с совпадающими особенностями. Мы остановимся на четырех довольно бурно развивающихся в последнее время направлениях, пытающихся обойти эту трудность с помощью: 1) нелокальных форм-факторов, 2) кривого импульсного пространства, 3) аналитического метода регуляризации, развиваемого в неполиномиальных теориях поля, 4) масштабной инвариантности на малых расстояниях.

В квантовой теории полей, взаимодействующих нелокально (доклады Г. В. Ефимова с сотрудниками, Б. И. Воронова и др.), предполагается, что лагранжиан взаимодействия не является локальной функцией поля, а зависит от «размазанного» поля. «Размазка» вводится с помощью форм-фактора, определяющего область, где происходит нелокальное взаимодействие. Оказывается, что форм-факторы, являющиеся целыми аналитическими функциями, позволяют построить конечную теорию, которая удовлетворяет условиям причинности, унитарности и релятивистской инвариантности. В рамках такой нелокальной теории построена конечная градиентно-инвариантная теория возмущений для электродинамики частиц со спином 0, $1/2$, 1, $3/2$ и теории слабых взаимодействий. Последняя основана на физическом постулате, который гласит, что все нейтральные поля взаимодействуют с заряженными нелокальным образом. Эффективно это приводит к изменению пропагаторов нейтральных полей нейтрино и фотона. С физической точки зрения введение в теорию форм-факторов приводит к изменению электромагнитного и «слабого» потенциалов на малых расстояниях, что, по-видимому, свидетельствует о распределенных пространственно электрическом и «слабом» зарядах. В этой теории путем сравнения с экспериентом получены ограничения на величину нелокальной области взаимодействия в электродинамике и теории слабых взаимодействий.

Развитие аппарата квантовой теории поля в кривом пространстве относительных импульсов (доклад В. Г. Кадышевского, А. Донкова, М. Матеева и Р. Мир-Касимова) преследует ту же цель: дать адекватное описание взаимодействий элементарных частиц в ультрамалых пространственно-временных масштабах. Основной гипотезой этого аппарата является замена обычного евклидова импульсного пространства на пространство постоянной кривизны. Показано, что последнее не противоречит ни одному из постулатов в аксиоматике Н. Н. Боголюбова, за исключением условий причинности и локальности, которые формулируются заново в духе геометрии импульсного пространства Де-Ситтера. Строится квантовая теория поля, приводящая к экспериментально проверяемым следствиям. В частности, эта теория дает ограничения на спектр масс реальных и виртуальных частиц сверху (т. е. существование максимона), что в свою очередь приводит к тому, что вклад однофотонных виртуальных процессов при больших переданных импульсах подавлен, а дифференциальное сечение рассеяния адронов на большие углы, падает степенным образом по энергии. Из последнего процесса, а также из процессов однофотонной аннигиляции лептонной пары и рождения лептонных пар в глубоконеупругих реакциях можно извлечь информацию об элементарной длине.

Проблему умножения друг на друга сингулярных обобщенных функций с совпадающими особенностями удалось решить в неполиномиальных квантовых теориях поля без нарушения принципа локальности взаимодействия и без привлечения гипотетического искривленного импульсного пространства (доклады М. К. Волкова, А. Т. Филиппова, Б. А. Арбузова, Г. Лемана и др.). Метод вычисления, развитый в неполиномиальных теориях, получил название суперпропагаторного метода, который заключается в регуляризации расходящихся диаграмм с помощью аналитического продолжения по степеням пропагаторов, при этом перенормировки физических величин становятся конечными и выражаются в терминах констант связи. Роль элементарной длины в этом случае как бы выполняют размерные константы связи в сильных, слабых и гравитационных взаимодействиях. В рамках этого метода А. Саламом с сотрудниками была реализована идея М. А. Маркова, Б. С. Де-Витта и И. Б. Хрипловича о конечной перенормировке во всех взаимодействиях вследствие регуляризирующей роли гравитации, а именно, построена конечная квантовая электродинамика с перенормировкой массы, выраженной через логарифм гравитационной постоянной. Наметься также перспективная тенденция к описанию реальных физических явлений в слабых (доклад А. Т. Филиппова) и сильных (доклады Г. Лемана, И. Ховеркампа, М. К. Волкова, В. Н. Первушина) взаимодействиях. Наиболее интересным, по нашему мнению, являются попытки описания взаимодействия квантовых полей в киральных теориях. Суперпропагаторный подход позволяет получать низкоэнергетические поправки к так называемому приближению графов-деревьев. Здесь построена кирально-инвариантная квантовая теория поля и получено довольно хорошее согласие с экспериментами по низкоэнергетическому пион-пионному рассеянию и электромагнитному форм-фактору пиона.

Большое внимание привлекает сейчас решение проблем теории поля с помощью расширения лоренцовской инвариантности на малых расстояниях до масштабной и конформной инвариантности, т. е. инвариантности относительно равномерного в каждой точке растяжения всех координат. Такая инвариантность эквивалентна конечной ренормировке заряда и приводит к появлению аномальных размерностей полей

(пропагаторы свободных полей модифицируются возведением в некую нецелую степень).

Принципиальная возможность построения самосогласованной теории поля с точной комформной симметрией была показана в работах Г. Мака, И. Тодорова, А. М. Полякова и А. Б. Мигдала (доклады И. Тодорова и Г. Мака).

Наиболее злободневным и интересным сейчас является вопрос проявления масштабной инвариантности в физических процессах. Здесь используются чаще всего два метода — это метод, основанный на гипотезе о разложении произведения двух полевых операторов при уменьшении интервала между соответствующими пространственно-временными точками, и метод автомодельности, основанный на гипотезе о независимости амплитуд при высоких энергиях от размерных параметров типа масс. Этими методами было получено много важных следствий, в частности возможность нарушения «бёркеновского скейлинга» в процессе глубоко неупругого рассеяния, быстрое падение электромагнитных форм-факторов $\sim 1/t^2$ и дифференциальных сечений рассеяния на большие углы $\sim 1/s^{10}$ в модели кварков (доклад А. Н. Тавхелидзе). Однако, как показывает анализ теории возмущений, эти методы неприменимы для целого ряда процессов, таких, как рассеяние в дифракционной области. Рассмотрение следствий гипотезы масштабной инвариантности, в пределе малых расстояний, в обычной ренормируемой теории дает возможность сформулировать более общий метод (доклад А. В. Ефремова, И. Ф. Гинзбурга), применимый к любым процессам при высоких энергиях. В частности, для процессов дифракционного типа он приводит к модифицированной реджевской картине, где наряду с полюсами Редже возникает неподвижные корневые ветвления. Для инклюзивных процессов этот метод приводит к падению сечений как $\sim q_{\perp}^{-8}$ (доклад А. В. Ефремова). Хорошее согласие с экспериментом свидетельствует в пользу масштабной инвариантности на малых расстояниях.

В настоящее время, пожалуй, одним из наиболее популярных разделов квантовой теории поля является теория калибровочных полей (доклады Б. А. Арбузова, Л. Д. Фаддеева, А. А. Славнова, К. Нишиджимы). Стимулом к развитию теории калибровочных полей является возможность построения единых ренормируемых моделей слабых и электромагнитных взаимодействий. Основой таких теорий является механизм спонтанного нарушения инвариантности относительно градиентных преобразований, который привел в свое время к созданию квантовой теории сверхтекучести и сверхпроводимости. Механизм спонтанного нарушения симметрии, вследствие которого безмассовые векторные частицы приобретают массу (явление Хиггса), позволяет применить хорошо разработанный аппарат квантовой электродинамики и теории безмассовых полей Янга—Миллса для описания калибровочной теории взаимодействия заряженных массивных векторных мезонов (W -бозонов) с другими полями. Теория приводит к новым экспериментальным следствиям в слабых взаимодействиях, которые могут быть проверены в ближайшее время.

Большое внимание сейчас уделяется обобщению калибровочных и киральных теорий со спонтанно нарушенной симметрией, а именно, нелинейной реализации пространственно-временных симметрий (доклады В. И. Огиевского, Д. В. Волкова). Результатом этих исследований является построение существенно нелинейных лагранжианов, из которых можно получать низкоэнергетические соотношения между различными процессами. По существу, здесь пытаются ответить на вопрос, какие динамические следствия содержатся в группах симметрий, которыми мы привыкли описывать кинематические характеристики частиц. Основные идеи этого направления тесно связаны с общей теорией относительности и по своему духу являются ее дальнейшим развитием.

Выявилась новая волна интереса к самой теории гравитации, в частности к проблеме квантования гравитации. Весьма дискуссионным является упомянутый выше вопрос о регуляризирующей роли гравитации в мире элементарных частиц. Появились аргументы (доклад М. А. Маркова) в пользу того, что на первых порах для качественного изучения проблемы регуляризирующих свойств гравитации достаточно классического неквантованного гравитационного поля.

Делаются попытки квантования поля в римановом пространстве постоянной кривизны (доклад Н. А. Черникова), которые особенно интересны в том отношении, что комформная инвариантность лагранжиана оказывается необходимой для кортцускулярной интерпретации векторов состояния. В настоящее время продолжают работу по построению перенормируемой квантовой теории гравитации (доклад Е. С. Фрадкина).

Успешно продолжают развиваться функциональные методы в квантовой теории поля (доклады Б. М. Барбашова, В. А. Матвеева, А. Н. Тавхелидзе и др.). С помощью функционального аппарата удалось получить асимптотическое решение ряда квантово-полевых моделей, которые воспроизводят оптическую картину рассеяния частиц. Как известно, геометрооптическое (эйкональное) приближение оказалось весьма плодотворным при изучении рассеяния сильно взаимодействующих частиц.

На совещании были также заслушаны обзорные доклады, посвященные экспериментальной ситуации в физике сильных взаимодействий (доклад Л. Д. Соловьева) и в физике слабых взаимодействий (доклад С. М. Биленького).

В работе совещания приняли участие 110 ученых из 13 стран мира. Общая оценка совещания была сделана рядом участников на заключительном заседании. Г. В. Ватагин (Италия), М. А. Марков (СССР), К. Нишиджима (Япония) и К. Хепп (Швейцария) отметили хорошую подготовку совещания и его большое значение для развития квантовой теории поля вообще и нелокальной теории в частности. Всеобщим было мнение о необходимости дальнейшего периодического проведения такого рода совещаний.

Издательский отдел ОИЯИ выпустил сборник «Трудов III международного совещания по нелокальной квантовой теории поля»³, в котором представлены все обзорные доклады.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Б л о х и н ц е в, Пространство и время в микромире, М., «Наука», 1970.
 2. Н. Н. Б о г о л ю б о в, Д. В. Ш и р к о в, Введение в теорию квантованных полей, М., Гостехиздат, 1957.
 3. Труды III международного совещания по нелокальной квантовой теории поля, Дубна, ОИЯИ (Д2-7161), 1973.
-