

539.12.01(063)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

(по материалам VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, Крым, 5—9 мая 1981 г.)

С 5 по 9 мая 1981 г. в Алуште проходило VI Международное совещание по проблемам квантовой теории поля.

Данное совещание, как и пять предыдущих (Дубна, 1967; Азау, 1970; Алушта, 1973, 1976, 1979), было организовано по инициативе дирекции Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

В работе совещания приняло участие 110 ученых из 8 стран. Было заслушано и обсуждено 45 докладов, 11 из которых имели обзорный характер.

На совещании обсуждались наиболее актуальные проблемы современной теории поля:

- Строгие результаты в квантовой теории поля и в квантовой статистике.
- Точно решаемые модели в классической и в квантовой теории поля.
- Калибровочные теории.
- Квантовая хромодинамика.
- Киральные теории и мешки.
- Объединенные теории.
- Суперсимметрия и гравитация.

Совещание показало, что выбранная тематика наиболее полно отражает основные направления исследований в квантовой теории поля. В каждом из перечисленных направлений за прошедшие два года был достигнут значительный прогресс.

1. СТРОГИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ И В КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКЕ

В обзорном докладе Н. Н. Боголюбова (мл.) (МИАН) и В. Н. Плечко (ОИЯИ) были рассмотрены новые вариационные методы аппроксимации в теории электрон-фононных систем, основанные на исключении фононных переменных методом хронологических произведений. Получены аппроксимирующие выражения для равновесной свободной энергии и временных корреляционных функций. Существенно, что предложенный подход применим как в области слабой, так и в области сильной связи.

В сообщении А. М. Курбатова и Д. П. Санковича (МИАН) «Кластеризация гамильтониана и теорема Боголюбова (мл.) — Петрины» установлена возможность расширения класса модельных гамильтонианов, для которых корреляционные функции по исходному гамильтониану являются решениями тех же уравнений, которым удовлетворяют корреляционные функции по аппроксимирующему гамильтониану. Для трансляционно-инвариантного гамильтониана, описывающего систему, в которой взаимодействуют частицы лишь из нескольких определенных групп (кластеров), дано конструктивное построение аппроксимирующего гамильтониана, термодинамически эквивалентного исходному.

Сообщение А. А. Логанова, Б. В. Медведева, Л. М. Музафарова, В. П. Павлова, М. К. Поливанова и А. Д. Суханова (МИАН) было посвящено изучению аналитической структуры амплитуды рассеяния $3 \rightarrow 3$ вперед (обобщенная оптическая теорема) в рамках аксиоматического подхода Боголюбова.

Проблема математически корректного определения функциональных интегралов в квантовой теории рассматривалась в сообщении П. Экслера и Г. И. Колерова (ОИЯИ): «Описание динамики незамкнутых систем при помощи строго определенных интегралов Фейнмана». В работе показано, что динамику незамкнутых квантовомеханических систем с комплексным зависящим от времени потенциалом можно описать формулой типа Фейнмана — Ито. Получен явный вид пропагатора d -мерного затухающего осциллятора, который при исчезновении затухания дает правильный масловский фазовый множитель.

В сообщении В. Н. Попова (ЛОМИ) «Двумерная теория поля с несколькими конденсированными фазами» были представлены результаты исследования методом эффек-

тивного действия полевых моделей с четырехфермионным ток-токовым взаимодействием. В двумерной теории обнаружен фазовый переход из симметричной фазы в несимметричную. В разных фазах существует различное число голдстоуновских мод бозе-возбуждений аналогично сверхтекучим фазам He^3 .

В сообщении В. А. Ильина, М. С. Имашева и Д. А. Славнова (МГУ) был предложен новый вариант перенормировок. Показано, что перенормированный граф Фейнмана с N петлями может быть представлен в виде специальной свертки $N - 1$ -го графа Фейнмана с пропагатором свободного поля. Это позволяет сформулировать схему перенормировок по петлям, независимую от R -операции. Доказано, что по окончательному результату предложенная схема перенормировок эквивалентна R -операции.

Сообщение Ю. М. Ломсадзе (Северо-Осетинский университет) было посвящено новой версии аксиоматических подходов Боголюбова и Вайтмана в квантовой теории локальных и нелокальных полей.

Интересная связь математического аппарата ренормгруппы с нелинейной задачей переноса излучения была изложена в сообщении М. А. Мнацаканяна (Бюраканская астрофизическая обсерватория АН Арм. ССР).

2. ТОЧНО РЕШАЕМЫЕ МОДЕЛИ В КЛАССИЧЕСКОЙ И В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

В докладе Л. Д. Фаддеева (ЛОМИ) представлен обзор развития квантового метода обратной задачи рассеяния за 2 года, прошедшие после предыдущей Алуштинской конференции. В этом направлении получены следующие важные результаты. Дана точная формулировка решетчатых приближений для интегрируемых моделей. Получены формулы следов для локальных квантовых законов сохранения. Построена S -матрица для возбуждений. Дан вывод квантового аналога уравнения Гельфанда — Левитана — Марченко. В докладе обсуждались перспективы метода и отмечались нерешенные проблемы.

В последние годы в математическом аппарате физики элементарных частиц успешно используется такое геометрическое понятие, как минимальная поверхность (модель релятивистской струны, вильсоновский критерий удержания кварков в адронах). Впервые в релятивистской физике минимальные поверхности возникли при изучении нелинейных полевых моделей Борна — Инфельда. В обзоре Н. А. Черникова и Н. С. Шавохиной (ОИЯИ) рассматривается использование теории минимальных поверхностей в нелинейной электродинамике и в релятивистской задаче двух тел. Получена система ковариантных уравнений для нелинейной электродинамики типа Борна — Инфельда в n -мерном римановом мире. Показано, что плоские бегущие волны являются решениями уравнений как линейной, так и нелинейной электродинамики в n -мерном мире Пуанкаре — Минковского. Получены решения уравнений электродинамики (как в линейном, так и в нелинейном случае) в n -мерном мире Пуанкаре — Минковского в виде двумерной поверхности в n -мерном мире. Рассмотрена задача столкновения двух бегущих плоских волн. Отмечено, что уравнения для минимальной поверхности возникают в нелинейной теории поля. Минимальная поверхность в мире Пуанкаре — Минковского появляется также и в релятивистской задаче двух тел и позволяет решить вопрос о релятивизации уравнений Ньютона для двух тел в случае, когда потенциал взаимодействия пропорционален расстоянию между телами.

Доклад Б. М. Барбашова, В. В. Нестеренко и А. М. Червякова (ОИЯИ) был посвящен использованию методов классической дифференциальной геометрии для получения общих решений целого класса нелинейных уравнений в частных производных второго порядка с двумя независимыми переменными. Эти уравнения определяют основные дифференциальные формы двумерной минимальной поверхности, погруженной в n -мерное псевдоевклидово пространство. Обсуждалась связь предложенного подхода с групповыми методами интегрирования нелинейных уравнений.

О специальных преобразованиях нелинейных эволюционных уравнений, интегрируемых методом обратной задачи рассеяния, говорилось в сообщении В. К. Мельникова (ОИЯИ). Автором найдены два класса нелинейных эволюционных уравнений, которые связаны между собой преобразованиями, аналогичными преобразованию Миуры. Исследована связь между симметриями этих уравнений.

Квантовому варианту нелинейного уравнения Шредингера было посвящено сообщение В. С. Герджикова (ОИЯИ) и П. Н. Кулиша (ЛОМИ). Показано, что квантовый метод обратной задачи рассеяния позволяет построить решение этого уравнения. Получен энергетический спектр и с помощью анзаца Бете построены точные квантовые состояния.

В сообщении В. Г. Маханькова (ОИЯИ) были представлены результаты по изучению нелинейного уравнения Шредингера в двумерном пространстве-времени с некомпактной группой внутренней симметрии $U(p, q)$, $p + q = n$.

3. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕОРИИ

Большое внимание было уделено на совещании общим проблемам в теории неабелевых калибровочных полей. Обзор новых результатов, полученных в этой области вне рамок теории возмущений по константе связи, был сделан в докладе А. А. Славнова (МИАН). Рассматривался феноменологический статус разложения по числу цветов в квантовой хромодинамике, в частности, уравнения для вильсоновского функционала при $N_c \rightarrow \infty$, а также уравнения для функций Грина в $SU(2)$ -теории в терминах бесцветных биклокальных переменных. Новый подход к исследованию инфракрасного поведения неабелевых калибровочных теорий был предложен в докладе Б. А. Арбузова (ИФВЭ). С помощью асимптотических решений уравнений Швингера — Дайсона изучается инфракрасное поведение кваркового пропагатора в КХД. Показано, что при выделенных значениях масс кварков может существовать решение с полюсом. Дано применение этого метода к массивным векторным теориям, где физически приемлемое решение может осуществляться при выделенных значениях константы связи.

Проблема перехода к непрерывному пределу в теории поля, заданной на решетке, обсуждалась в докладе М. Маринаро (Италия). Изучалась евклидова N -компонентная $g\Phi^4$ теория на решетке. Для функций Накано — Швингера строились кластерное и $1/N$ разложения. Показано, что при малых g переход к непрерывному пределу тривиален. Для больших g правильный результат получается только в том случае, если вначале выполняется аналитическое продолжение соответствующих надраспределений, а потом осуществляется переход к непрерывному пределу.

Учет инстантонных решений в теории Янга — Миллса рассматривался в сообщении Э. М. Ильгенфрица, Д. И. Казакова и М. Мюллера-Пройскера (ОИЯИ). Найдены лидирующие инстантонные вклады в перенормировку заряда путем вычисления двух- и трехточечных функций Грина в приближении разряженного инстантонного газа. Полученная β -функция испытывает резкий рост в районе $g = 1$, что находится в хорошем соответствии с экстраполяцией результата, полученного в евклидовой теории на решетке в режиме сильной связи. В работе А. К. Квашиевского (ПНР) изучались гауссовы флуктуации вокруг одно-инстантонных решений в $HP(1)$ σ -модели, описывающей составные $SU(2)$ -калибровочные поля.

В сообщении Ю. Н. Кафиева (Институт математики СОАН СССР) «Четырехмерные сигма-модели и составные поля Янга — Миллса» была представлена $SU(2)$ калибровочно-инвариантная сигма модель на кватернионном проективном пространстве HP^n . Для любого n модель топологически нетривиальна и имеет инстантонные решения. Показана связь HP^1 модели с $O(5)$ моделью Скирма. Построены правила Фейнмана для произвольной $O(N)$ модели Скирма путем сведения лагранжиана этой модели к лагранжиану массивного поля Янга — Миллса, взаимодействующего с обычной сигма-моделью в пределе бесконечной массы.

В сообщении Р. Кипнера (ГДР) были доложены результаты по суммированию дважды логарифмических вкладов в кварк-кварковую амплитуду рассеяния и в амплитуду аннигиляции во всех порядках теории возмущений в квантовой хромодинамике. Обсуждалась возможность обобщения результатов, полученных Горшковым и др. в квантовой электродинамике на случай неабелевой теории.

4. КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА

Одно из центральных мест на совещании занимали доклады, посвященные квантовой хромодинамике (КХД). Развитие этой теории позволило непосредственно подойти к ее проверке в экспериментально доступной области энергий.

В докладе А. В. Ефремова и А. В. Радюшкина (ОИЯИ) был дан детальный обзор работ, посвященных анализу радиационных (т. е. многопетлевых) и степенных поправок к амплитуде и сечению жестких процессов в квантовой хромодинамике. Основное внимание уделялось тем исследованиям, которые позволяют повысить точность предсказаний КХД. В этой связи обсуждалась зависимость конечных результатов расчетов от выбранной ренормировочной схемы КХД, а также проблема определения фундаментального масштаба в данной теории.

Актуальной проблемой как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения, являются в настоящее время экзотические кварковые состояния. Обсуждению этого вопроса в рамках квантовой хромодинамики был посвящен доклад В. И. Захарова (ИТЭФ). Был дан обзор предсказаний различных моделей для экзотических состояний (в последние включены как многокварковые мезоны, так и глюоний). Рассматривалась модель мешков, большие N_c и правила сумм квантовой хромодинамики. Показано, что разные схемы приводят к разным предсказаниям. Причем эти расхождения особенно значительны в приложении этих моделей к физике глюония.

Важнейшее свойство квантовой хромодинамики — это асимптотическая свобода, т. е. убывание эффективной константы взаимодействия кварков с глюонами с ростом энергии. Именно в силу этого свойства КХД претендует на описание сильных взаимо-

действий. Однако вывод об асимптотической свободе в КХД получен только с помощью расчетов по теории возмущений. Поэтому крайне важно исследовать этот вопрос без использования итерационных рядов. Данная проблема в такой постановке обсуждалась в сообщении З. Хабы (ПНР). Выявленные свойства стабильности КХД в сильном фоновом поле можно рассматривать как основу асимптотической свободы в данной теории. Сообщение П. С. Исаева (ОИЯИ) было посвящено приближенному решению эволюционных уравнений квантовой хромодинамики. Были представлены в явной аналитической форме функции распределения кварков и глюонов в нуклоне, удовлетворяющие с высокой точностью системе интегро-дифференциальных эволюционных уравнений квантовой хромодинамики — уравнениям Алтарелли — Паризи.

Ряд результатов был получен в последнее время путем формулировки квантовой хромодинамики на языке вильсоновских функционалов, заданных на контурах. Возникающие здесь проблемы перенормировок и сингулярного поведения на малых расстояниях соответствующих функциональных уравнений обсуждались в сообщениях Ф. Кашлуна (ГДР) и Е. Вицорека (ГДР).

Доклад Л. Н. Липатова (ЛИЯФ) был посвящен физическим свойствам поперечно-чужковской особенности в квантовой хромодинамике. Было получено решение уравнений для t -канальных парциальных волн для различных размерностей пространства-времени ($D = 2, 3$). Предложено обобщение главного логарифмического приближения, а именно — способ построения амплитуд с мультiredжевской унитарностью. В модельном случае упругой унитарности такая амплитуда найдена в явном виде.

Феноменологической моделью адронов в настоящее время являются модели кварковых мешков. Несомненный интерес представляет выяснение связи этого подхода с квантовой хромодинамикой. Развивая аналогию глюонных полей с квантовой жидкостью, В. Н. Первушин (ОИЯИ) пришел к гипотезе о доминантности в сильных взаимодействиях самодуальных полей в пространстве Минковского. Им было показано, что теория спинорных частиц в таких неабелевых полях является релятивистским вариантом модели адронных мешков.

Каким потенциалом описывается взаимодействие между кварками в адронах и как получить его в рамках квантовой хромодинамики — эти вопросы несомненно являются чрезвычайно важными с точки зрения сравнения предсказаний квантовой хромодинамики с экспериментальными данными (адронная спектроскопия, распады адронов). Эти проблемы детально обсуждались в сообщении М. В. Терентьева (ИТЭФ), где был предложен вывод мультипольного разложения для энергии взаимодействия пары кварков в поле длинноволновых вакуумных флуктуаций в рамках квантовой хромодинамики. Конкретным расчетам с помощью кварк-партоной модели адронов было посвящено выступление Ф. С. Садыхова (Азербайджанский университет).

5. КИРАЛЬНЫЕ ТЕОРИИ И МЕШКИ

Одной из важных проблем в современной физике элементарных частиц является выяснение связи между квантовой хромодинамикой, предсказания которой относятся к высокоэнергетическим процессам, с киральными теориями, которые хорошо описывают сильные взаимодействия в области низких энергий. Этой проблеме был посвящен ряд докладов, представленных на совещании.

В докладе П. Ди-Веккиа (Италия) «Киральная динамика в квантовой хромодинамике» был предложен эффективный лагранжиан, описывающий низкоэнергетическую динамику псевдоскалярных мезонов в квантовой хромодинамике с большими N_c .

В докладе М. Г. Волкова (ОИЯИ) были изложены результаты расчетов распадов $\eta \rightarrow 3\pi$ и $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ в $U(3) \times U(3)$ -киральной теории. Для ширины распада $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ получено значение $1,3 \cdot 10^{-3}$ эВ, что отличается на 4 порядка от старых экспериментальных данных. Предварительные результаты, полученные в настоящее время в ИФВЭ (Протвино), не противоречат этим теоретическим предсказаниям.

В сообщении М. М. Мусаханова (ТашГУ) «Киральная модель мешков» было предложено объединение модели кварковых мешков с нелинейной сигма-моделью.

Обзор низкоэнергетических адронных взаимодействий в нелокальной модели кварков был дан в докладе М. Динейхана, Г. В. Ефимова, М. А. Иванова (ОИЯИ). Этот подход является самосогласованной квантовополевой моделью релятивистского мешка. Были рассчитаны редкие распады псевдоскалярных и векторных мезонов, причем полученные результаты хорошо согласуются с последними экспериментальными данными. Оказалось, что имеющиеся экспериментальные данные согласуются с предположением о том, что скалярные мезоны являются двухкварковой системой.

6. ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ

С большим интересом на совещании обсуждались единые теории слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий. В докладе А. Ю. Игнатьева, В. А. Кузьмина, В. А. Матвеева, М. Е. Шапошникова (ИЯИ АН СССР) был дан обзор теорий большого

объединения, их экспериментальных и космологических следствий. Рассматривались следующие вопросы: распад протона, нейтрон-антинейтронные осцилляции, барионная асимметрия Вселенной. В заключение обсуждались проблемы и перспективы большого объединения с точки зрения физики элементарных частиц и космологии.

Проблема барионной асимметрии Вселенной в рамках конкретной модели большого объединения, а именно в $(SU(4))^4$ минимальной теории, детально обсуждалась в сообщении А. Ю. Игнатова, В. А. Кузьмина и М. Е. Шапошникова (ИЯИ АН СССР). Показано, что спонтанное нарушение B -симметрии, которое имеет место в этой теории наряду с нарушением цветной симметрии при энергиях ~ 1 ГэВ, не согласуется с космологическими данными.

Суперсимметричная модель электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий с группой симметрии $SU_L(2) \times SU_R(2) \times SU(4)$ была представлена в сообщении Г. М. Верешкова, В. А. Дубровского и В. А. Савченко (Ростовский университет). Рассматривался вопрос о непротиворечивости этой модели с имеющимися экспериментальными данными и отмечены те предсказания теории, проверка которых станет возможной в энергетической области 10^2 — 10^3 ГэВ в системе центра инерции. Были перечислены физические процессы, экспериментальное исследование которых представляет интерес с точки зрения проверки гипотезы суперсимметрии.

Расчету конкретных процессов на основе восьмикварковой вектороподобной модели слабых и электромагнитных взаимодействий была посвящена работа В. И. Савбова, Е. С. Грдлички и М. В. Солоджика (Ужгородский университет).

7. СУПЕРСИММЕТРИЯ И ГРАВИТАЦИЯ

Одним из перспективных направлений в физике элементарных частиц является в настоящее время теория супергравитации. Доклады, представленные на совещании по данной тематике, свидетельствовали о существенном прогрессе в создании эффективного математического аппарата для этой теории. Обзорный доклад В. И. Огиевского (ОИЯИ) был посвящен развитию предложенного им ранее динамического подхода к супергравитации. Единственность этого подхода состоит в том, что только в нем все следствия теории вытекают из принципа действия и геометрии. Показана плодотворность понятия гравитационной аналитичности. Подчеркивается решающая роль центральных и полуженеральных зарядов (в особенности в расширенных супергравитациях).

Проблема описания взаимодействия полей Эйнштейна с калибровочными полями обсуждалась в сообщении Д. В. Волкова и В. И. Ткача (ХФТИ). Найденные авторами решения уравнений, описывающих такие взаимодействия, указывают на возможность компактификации подпространств в симметрические пространства.

В сообщении И. Нидерле (ЧССР) и Е. А. Иванова (ОИЯИ) с единой точки зрения была дана калибровочная формулировка различных гравитационных теорий (Эйнштейна, Эйнштейна — Картана, Вейля и др.). Полная группа инвариантности лагранжиана имеет вид $H^{10c} \otimes \text{Diff } R^4$. Здесь $\text{Diff } R^4$ — общая ковариантная группа, которая действует на координаты x_μ , а H^{10c} есть локальная калибровочная группа, возникающая при локализации глобальной группы симметрии H . Группа H^{10c} действует в касательном пространстве, присоединенном к каждой точке x_μ . Различные группы H соответствуют различным теориям гравитации. Для того чтобы исключить лишние калибровочные поля, группа H^{10c} должна быть спонтанно нарушенной.

Свойства гравитационного вакуума и их связь с физическими взаимодействиями обсуждались в сообщении В. Н. Мельникова (ВНИИФТРИ).

С большим интересом были заслушаны на совещании доклады, посвященные некоторым специальным проблемам физики элементарных частиц.

Оригинальные идеи применения геометрии к квантовой механике были предложены в докладе Е. Р. Кайаниэлло (Италия) «Игра с геометрией и квантовой механикой». Примечательно, что этот подход можно рассматривать как альтернативу обычным попыткам проквантовать общую теорию относительности.

Обзорный доклад С. М. Биленького и Ф. Нидермайера (ОИЯИ) был посвящен проблеме нейтринных осцилляций. Подробно рассматривались различные схемы смешивания нейтрино. Обсуждалась проблема CP -нарушения в лептонном секторе и был предложен возможный опыт по поиску CP -нарушения в осцилляциях. Рассматривались результаты последних экспериментов по поиску осцилляций нейтрино.

Выступавшие на заключительном заседании участники (Л. Д. Фаддеев (СССР), Е. Р. Кайаниэлло (Италия), Ф. Кашлун (ГДР)) дали высокую оценку совещанию. Было отмечено большое значение таких встреч физиков для плодотворного обмена идеями в области квантовой теории поля и несомненная полезность их периодического повторения. Издательский отдел ОИЯИ выпустил сборник трудов VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля, в котором представлены, в основном, обзорные доклады.

М. К. Волков, Г. И. Колеров, В. В. Нестеренко