

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Широкова Ильи Евгеньевича
на тему: «Автоматизация вычислений квантовых поправок в
суперсимметричных теориях»
по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика»

Рассматриваемая диссертация посвящена исследованию свойств различных суперсимметричных моделей в рамках квантовой теории поля. Данная тематика является актуальной, исследования по ней осуществляются в ведущих научных центрах во всем мире. Актуальность обусловлена тем, что введение суперсимметрии в теоретические модели позволяет решить ряд проблем Стандартной модели физики элементарных частиц, такие как проблема описания темной материи, проблема иерархии и др. Кроме того, суперсимметрия является элегантной математической конструкцией, в рамках которой можно исследовать общие свойства квантовых явлений и вне привязки к феноменологии. В частности, в диссертации представлены результаты вычислений вкладов высших порядков в соотношение Новикова-Шифмана-Вайнштейна-Захарова (NSVZ), которое является примером того, что между голыми зарядами, т. е. в ультрафиолетовом пределе теории, имеются соотношения, которые не видны в доступной для эксперимента, т. е. в инфракрасной, области. Исследование таких закономерностей потенциально может помочь решить проблем физической интерпретации перенормировок. Поэтому, несмотря на отсутствие сигналов суперсимметричной физики на Большом адронном коллайдере и других современных экспериментах, исследования в данной области остаются важными для развития физики фундаментальных взаимодействий.

Перед диссертантом была поставлены несколько довольно сложных задач по учету квантовых поправок высших порядков теории возмущения в суперсимметричных моделях с калибровочной инвариантностью.

Вычисление таких поправок является чрезвычайно трудоёмким и на практике невозможно без использования компьютеров для осуществления алгебраических преобразований. Точнее, при решении первой задачи о вычислении двухпетлевых диаграмм, дающих вклад в аномальную размерность духов Фаддеева-Попова, автор проводил вычисления вручную, что позволило ему освоить процедуру вычислений петлевых поправок в суперсимметричных моделях. Для решения последующих более громоздких задач он разработал алгоритм проведения аналитических вычислений и реализовал его в виде компьютерной программы. Причем данная программа является по сути первым инструментом, позволяющим последовательно проводить многопетлевые вычисления непосредственно с суперсимметричными полями в четырехмерном пространстве-времени. Понятно, что в диссертации представлена первая версия данной программы, и ее еще предстоит развивать для учета вкладов различного типа, например, с внешними линиями калибровочных полей. Но уже сейчас данная программа хорошо протестирована на воспроизведении известных результатов и применена к получению новых ответов, которые ранее не были получены из-за сложности соответствующих вычислений. Диссертация содержит представление значительного количества новых результатов теоретических вычислений. Где это возможно, проведено сопоставление с результатами, полученными другими группами с применением альтернативных методов.

Материалы диссертации своевременно опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах, статьи в которых рецензируются ведущими специалистами в области тематики диссертации, что подтверждает высокий научный уровень и новизну полученных результатов. Материалы исследований также докладывались и обсуждались на представительных международных конференциях и публиковались в трудах этих научных мероприятий. Уже сейчас на статьи по материалам диссертации имеется заметное количество ссылок, что говорит о востребованности полученных результатов научным сообществом.

Таким образом, **актуальность и значимость** темы диссертационной работы обусловлены важностью изучения фундаментальных явлений в квантовой теории поля в связи с проводимыми в настоящее время экспериментальными и теоретическими исследованиями. Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, дающее значительные результаты для физики фундаментальных взаимодействий. Полученные в диссертации результаты и развитые в ней методы могут быть использованы при проведении дальнейших теоретических исследований в МГУ, ИЯИ РАН (Москва), ОИЯИ (Дубна) и в других российских и зарубежных научных центрах. **Новизна результатов** диссертации заключается в том, что разработан оригинальный алгоритм вычисления многопетлевых вкладов в суперсимметричных теориях, этот алгоритм реализован в виде компьютерной программы, и получен ряд новых результатов важных для анализа фундаментальной суперсимметричных моделей.

Обоснованность полученных результатов обусловлена тем, что при выполнении программы исследований применялись современные широко апробированные при решении других задач теоретические подходы. **Достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений. Она подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых журналах и хорошим согласием в частных случаях с ответами, полученными другими методами ранее. Также было показано, что полученные аналитические результаты обладают определёнными свойствами в соответствии с требованиями известных общих теорем. Необходимо отметить, что **личный вклад** И.Е. Широкова в исследованиях, отражённых в диссертации, был определяющим. Это четко показано в самой диссертации. Собственно задача автоматизации вычислений квантовых поправок была выполнена соискателем самостоятельно.

Диссертация состоит из четырех глав, первая из которых является Введением, Заключения, списка литературы и одного Приложения. Во **Введении** формулируется объект исследования, ставятся цель и задачи работы, в общем виде описывается современное состояние исследований в

данной области. Также здесь проводится обзор методов, которые применяются для изучения объекта исследования. Вместе с этим во введении описана актуальность, новизна работы, перечислены положения выносимые на защиту, апробация работы и научные публикации по материалам диссертации. Во **второй Главе** достаточно детально описаны вычисления двухпетлевых вкладов в суперсимметричных калибровочных теориях. Эти вычисления проводились вручную, что позволило автору отработать процедуры, которые затем вошли в алгоритм вычисления вкладов более высоких порядков. Показано, что в разрабатываемом автором и его коллегами подходе удаётся эффективно проверять выполнение NSVZ соотношения и исследовать схемную зависимость. **Третья Глава** посвящена обсуждению разработанного автором алгоритма и его реализации в виде компьютерной программы. Эта глава является центральной главой диссертации и содержит результаты полученные автором полностью самостоятельно. Алгоритм очень четко описан, что должно позволить его дальнейшее использование и другими исследователями. В **четвертой Главе** представлены оригинальные результаты по вычислению трехпетлевой аномальной размерности и четырехпетлевой бета-функции в $N_f=1$ суперсимметричной электродинамике, полученные с помощью созданной программы. В **Заключении** кратко суммируются основные результаты проведенных исследований. Показаны возможные пути развития созданной программы. В **Приложении** описывается методы аналитического вычисления фейнмановских интегралов методом полиномов Чебышёва. Данное приложение весьма полезно и для полноты описания использованных в диссертации методов, и для будущих читателей, которые смогут освоить данный метод.

Диссертация написана хорошим языком, приведены все необходимые формулы, обоснования и детали вычислений. Проведённые исследования описаны подробно, с обоснованием основных положений и аккуратным цитированием использованной литературы. Показано хорошее знание современного состояния исследований в данной области, и на этом фоне ясно видна новизна и значимость проведенных исследований.

По содержанию диссертации есть следующие **замечания**:

1. В тексте диссертации присутствует небольшое количество опечаток, например, «Пропгаторы» вместо «Пропагаторы» на стр. 24, и «Каон» вместо «каон» на стр. 5. Но такие опечатки не искажают смысл текста.

2. В разделе 1.2 говорится, что основная цель диссертации – создание компьютерной программы. Правильнее было бы подчеркнуть, что целью является создание соответствующего алгоритма и реализация его в виде компьютерной программы.

3. На стр. 22 после формулы (2.12) при обсуждении метода регуляризации высшими производными говорится, что функции R и F (регуляторы) «быстро растут на бесконечности». Такое утверждение не является строгим, поскольку скорость роста на бесконечности не конкретизирована. Кроме того, было бы полезно сказать о поведении этих функций в нуле.

4. В разделе 2.3 представлены детали вычислений определенного вклада в аномальную размерность духов Фаддеева-Попова. Данные вычисления были проведены лично автором и привели к получению оригинального нового результата. Досадно, что в конце раздела 2.3 не дает окончательное выражения для искомого вклада, а говорит, что этот вклад можно «легко найти» из Ур. (2.47).

5. Интересны результаты вычисления трехпетлевой аномальной размерности и четырехпетлевой бета-функции, полученные в «минимальной схеме» перенормировок. При этом говорится, что эта схема соответствует «пределу конформной симметрии». К сожалению, это соответствие осталось без должного обсуждения. Непонятно, каким образом проявляется конформная симметрия в рассматриваемой автором модели.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени

М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3. – «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Широков Илья Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
начальник сектора №5 Научного отдела теории фундаментальных
взаимодействий Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований
ОРГ. ПРАВ.ФОРМА «международная межправительственная организация»
АРБУЗОВ Андрей Борисович

10.11.2022

Контактные данные:

тел.: +7(916)4700101, e-mail: arbuzov@theor.jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.02 — «теоретическая физика»

Адрес места работы:

141980, Московская обл., г Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,
Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической
физики им. Н.Н. Боголюбова
Тел.: +7(496)216-50-59; e-mail: post@jinr.ru

Подпись сотрудника Лаборатории теоретической
физики ОИЯИ А.Б. Арбузова удостоверяю:
заместитель директора ЛТФ ОИЯИ

Н.В. Антоненко
10.11.2022