

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.

Суперсимметричные калибровочные теории в $D = 4$ размерности пространства-времени являются объектом пристального внимания теоретиков в последние десятилетия. Это связано как с ролью подобных теорий как наиболее вероятного обобщения Стандартной Модели (СМ), так и с наличием у таких теорий ряда замечательных математических свойств. В частности, ожидается, что некоторые такие теории (например, $N = 4$ максимально суперсимметричная теория Янга–Миллса в планарном пределе) являются квантовыми интегрируемыми системами, т.е. допускают получение в замкнутом виде точных, справедливых во всех порядках теории возмущений (ТВ) ответов для ряда «наблюдаемых», таких как аномальные размерности локальных операторов или элементы S -матрицы. Наличие подобных результатов, в свою очередь, позволяет строить и тестировать различные гипотезы о возможных общих подходах к исследованию различных моделей квантовой теории поля (в том числе для Квантовой Хромодинамики - части СМ) как в рамках ТВ так и за её пределами. Но и в теориях с меньшей суперсимметрией, которые не обязательно являются интегрируемыми, оказывается возможным получение точных, справедливых во всех порядках ТВ результатов. Например, подобным результатом является так называемая точная бета-функция Новикова–Шифмана–Вайнштейна–Захарова (NSVZ) – соотношение, связывающее бета-функцию калибровочной константы связи с аномальными размерностями киральных суперполей в $N = 4$ калибровочных теориях. Несмотря на то, что это соотношение было получено в 80-х годах 20-го века, до сегодняшнего дня остаётся нерешённым

ряд тонких вопросов, связанных с явным построением схемы, где бы NSVZ бета-функция систематически воспроизводилась при вычислениях по ТВ. Для исследования подобных вопросов, как и для работы с суперсимметричными квантовыми теориями поля вообще, стандартно применяется, так называемый формализм суперграфов (Фейнмановских диаграмм явно учитывающих суперсимметрию). Для эффективной работы с суперграфами на современном этапе развития компьютерной техники целесообразно применять специально разработанное программное обеспечение - так называемые пакеты компьютерной алгебры. Разработке и апробации на реальных задачах одного из таких пакетов и посвящена кандидатская диссертация Ильи Широкова, *что является важной и актуальной задачей.*

Диссертация состоит из 4 глав (включая введение), заключения, списка литературы и приложения.

Глава 1 является Введением. В нем описываются основные проблемы Стандартной Модели и теорий Великого Объединения и возможные решения этих проблем при помощи суперсимметричных расширений существующих теорий. Затем перечисляются интересные квантовые свойства суперсимметричных теорий. После этого приведен обзор существующих программ, с помощью которых можно вычислять квантовые поправки в различных теориях. Кроме того, в данной главе дается краткая характеристика диссертации, приводится список конференций на которых докладывались описываемые в диссертации достижения. В конце главы дается краткое содержание работы.

В Главе 2 описывается ряд вычислений, сделанных вручную, в которых принимал участие автор. Эти вычисления во многом помогли овладеть навыками, которые затем были применены для создания программы. Эти вычисления проводились в рамках $N = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий, которые описаны в первом разделе главы. Затем подробно описывается вычисления определенного вклада, содержащего вставку поляризованного оператора калибровочного поля, в аномальную размер-

ность духов Фаддеева-Попова. Также в главе 2 описано вычисление вклада в трехточечную духово-калибровочную вершину. Это вычисление проводилось в рамках явной проверки теоремы о неперенормировке тройной духово-калибровочной вершины. В конце главы также приведено вычисление части вклада духов Фаддеева-Попова в бета-функцию $N = 1$ суперсимметричной теории Янга-Миллса. На основе этого результата и результата для духов Фаддеева-Попова выполнена проверка части NSVZ соотношения.

В Главе 3 приводится описание новой программы для генерации суперграфов и проведения вычислений в терминах суперпространства. Описывается алгоритм, реализуемый программой, затем приводятся основы внутреннего синтаксиса программы. Затем описывается $N = 1$ суперсимметричная электродинамика с N_f ароматами, в рамках которой работает программа. Приводятся примеры входных файлов для вычисления двухточечной функции Грина суперполей материи в одной и двух петлях, в том числе с полями Паули-Вилларса в неминимальной калибровке. В конце главы приводятся результаты для заданных входных файлов, они сравниваются с соответствующими ручными вычислениями, а также приводится время работы для различных случаев использования программы.

В Главе 4 описывается вычисление трехпетлевой аномальной размерности в $N = 1$ суперсимметричной электродинамике с N_f ароматами. Приводится общее выражение для интегралов в импульсном пространстве, дающих вклад трехпетлевую аномальную размерность. Эти интегралы берутся в технике полиномов Чебышева. Подробно взятие этих интегралов описывается в Приложении. Приводится окончательный результат для трехпетлевой аномальной размерности в терминах голой константы связи. С помощью NSVZ-соотношения на основе этого результата вычисляется бета-функция в четырех петлях, также определенная в терминах голых констант связи. Затем на основе этих выражений вычисляется соответствующие внутригрупповые функции, определенные в терминах перенормированных констант связи. Оказывается, что с помощью специальной конечной перенормировки эти

функции можно переписать в виде, содержащем только схемно-независимые части. Такая схема вычитаний названа минимальной. В конце главы приводится общее доказательство того, что такая схема существует во всех петлях.

Краткие итоги исследований, лежащих в основе диссертации, подводятся в Заключении.

Степень обоснованности научных положений и выводов в диссертации выводов, а так же их достоверность и новизна не вызывают сомнений. Диссертант использовал надежные и хорошо подходящие для решения поставленных задач теоретические методы, умело комбинировал их. По результатам диссертации опубликовано несколько, включая статьи в авторитетных журналах JHEP и Nucl. Phys. B. Результаты неоднократно представлялись на международных и всероссийских конференциях и докладывались на научных семинарах.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

К формальным недостаткам рецензируемой диссертации можно отнести отсутствие подробного описания манипуляций, или хотя бы одного подробно разобранным примера, с D-производными («D-алгебры») при вычислении суперграфов в $N = 1$ суперполях. Наличие подобного примера, на взгляд рецензента, было бы очень хорошим дополнением к имеющейся литературе, посвящённой вычислениям в $N = 1$ суперполях. Так же можно, с сожалением, отметить отсутствие текущей версии разработанного пакета в открытом доступе.

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:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
подразделения № 176
Центра фундаментальных и прикладных исследований
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Борк Леонид Владимирович

ноябрь 2022 г.

Контактные данные:

тел.: (916) 092-13-65; e-mail: bork@itep.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

127055, Москва,
Сущевская ул., 22,
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова»
тел.: 8 (499) 789-66-00; e-mail: bork@itep.ru

Подпись ведущего научного сотрудника ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» Л.В. Борка удостоверяю:

ученый секретарь ФГУП «ВНИИА»,
кандидат технических наук

С.И. Дубовик