ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Михаила Дмитриевича Кузьмичева
“Ренормгрупповые функции в калибровочных теориях с N=1 суперсимметрией”,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Суперсимметричные калибровочные теории обладают рядом привлекательных свойств и позволяют единым образом описывать частицы с целым и полуцелым спином. Хорошо известен факт, что благодаря наличию симметрии между бозонами и фермионам известная проблема иерархии в Стандартной модели (СМ) находит элегантное решение из-за сокращения возникающих квадратично-расходящихся вкладов от известных частиц и их гипотетических суперпартнеров. Вдобавок к этому, удаётся найти естественного кандидата на роль тёмной материи и добиться объединения калибровочных взаимодействий при высоких энергиях. К сожалению, несмотря на продолжающиеся поиски экспериментального подтверждения в физике частиц суперсимметрия пока не получила. Во многом это объясняется тем, что эта симметрия между фермионами и бозонами должна быть с необходимостью нарушена, а масштаб этого нарушения априори не известен.

В то же время интерес к суперсимметрии не ограничивается лишь феноменологическими приложениями. В рамках суперсимметричных моделей можно получить точные результаты, выходящие за пределы стандартной теории возмущений (ТВ) и применимые как в режиме слабой, так и сильной связи. Примером могут служить утверждение о существовании точного соотношения между бета-функцией в N=1 суперсимметричных калибровочных теориях и аномальными размерностями полей материи — бета-функция Новикова-Шифмана-Вайнштейна-Захарова (NSVZ). Важнейшую роль при обнаружении и проверке подобного рода нетривиальных фактов играют расчёты петлевых поправок в старших порядках ТВ. Одна из основных трудностей при таких вычислениях связана с возникновением ультрафиолетовых расходимостей, требующих использования регуляризации и перенормировки. Последние содержат значительный произвол, который, однако, не должен сказываться при расчёте

наблюдаемых величин. Предпочтение отдаётся подходам, максимально сохраняющим хорошие свойства классической теории. К ним относится обсуждаемая в диссертации регуляризация с помощью высших ковариантных производных и так называемая HD+MSL схема перенормировки. Указанная регуляризация не нарушает калибровочную симметрию и суперсимметрию. Это оказывается важным при формальных манипуляциях с рядами теории возмущений. В то же время использование предписания HD+MSL позволяет легко обобщать соотношения, полученные в терминах голых параметров на перенормированный случай.

Диссертация Михаила Дмитриевича посвящена явному расчёту некоторого класса суперполевых диаграмм, дающих вклад в различные ренормгрупповые функции в рамках суперсимметричных моделей, регуляризированных с помощью высших ковариантных производных. Особое внимание уделено вкладам от духовых и материальных суперполей в трехпетлевую бета-функцию и двухпетлевые аномальные размерности духов, полей материи, а также в вершины с двумя духами и калибровочным суперполем. Важность таких расчетов связана с необходимостью явной пертурбативной проверки всепетлевых NSVZ соотношений, полученных с использованием факта конечности тройной вершины взаимодействия духовых и калибровочных (супер)полей.

Кроме того, в диссертации рассмотрен важный вопрос, касающийся возможности редукции констант связи в N=1 суперсимметричной калибровочной теории, удовлетворяющей так называемому условию P=Q/3. Автором впервые выводятся новые соотношения между аномальными размерностями суперполей, возникающие из требования ренормгрупповой инвариантности отношения юкавских и калибровочных констант. Явным вычислением продемонстрировано, что найденное соотношение можно удовлетворить в теории регуляризованной высшими ковариантными производными вплоть до двух петель. В трех петлях соотношение с необходимостью нарушается из-за возникновения вкладов пропорциональных свертке шести юкавских матриц, не редуцируемой к калибровочной константе с помощью соотношения P=Q/3.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 123 страниц.

Во **Введении** обсуждается актуальность проводимого исследования, перечисляются уникальные свойства суперсимметричных теорий и приводится обзор литературы. Также формулируется ряд точных утверждений, касающихся квантовых поправок, вычисляемых в суперсимметричных квантово-полевых моделях. Приводятся аргументы полезности использования регуляризации высшими ковариантными производными при пертурбативном исследовании соотношений типа NSVZ. Формулируются основные цели и задачи диссертации, обсуждается достоверность, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Наконец, указываются положения, выдвигаемые на защиту, выделяется личный вклад автора, приводиться список публикаций автора, а также список конференций, на которых состоялась апробация полученных результатов.

В **Главе 1** рассматривается N=1 суперсимметричная теория Янга-Миллса и обсуждается ряд вкладов духовых полей в трехпетлевую бета-функцию, а также двухпетлевые поправки в аномальную размерность последних. При этом в краткой форме даются необходимые определения констант перенормировки, ренормгрупповых функций, а также обсуждаются точные NSVZ-соотношения. После выписывания действия, регуляризованного высшими ковариантными производными, автор выводит необходимые правила Фейнмана и приводит детали явного расчёта ряда двухпетлевых диаграмм, дающих в сумме нулевой вклад в аномальную размерность духовых суперполей. Кроме того, с помощью подхода, основанного на рассмотрении вакуумных супердиаграмм, проводится вычисление вкладов в трехпетлевую бета-функцию, возникающих при «разрезании» духовых линий ряда вакуумных графов. При этом демонстрируется, что соответствующие вклады связаны с выполненными ранее расчётами аномальных размерностей духов и находятся в согласии с NSVZ соотношением.

Главе 2 посвящена вычислению непланарных вкладов в бета-функцию от суперполей материи в рамках N=1 суперсимметричных калибровочных теорий. Автор подробно описывает расчёт для неабелевого случая в калибровке Фейнмана, а также в произвольной калибровке для случая суперсимметричной квантовой электродинамики. Как и в предыдущей главе используется подход, основанный на вакуумных супердиаграммах, и явным образом демонстрируется связь NSVZ типа между вкладом в трехпетлевую

бета-функцию и соответствующим вкладом в аномальную размерность суперполей материи.

В **Главе 3** диссертации автор переходит к пертурбативной проверке теоремы о неперенормируемости вершины дух-дух-калибровочное суперполе на уровне двух петель. Проводится явное вычисление ряда сингулярных вкладов в вершинную функцию в произвольной калибровке в пределе нулевых внешних импульсов. В частности, после обсуждения необходимых правил Фейнмана даются выражения для супердиаграмм с петлей материи, а также представлены вклады, получаемые путём присоединения внешней калибровочной линии к рассмотренным в Главе 1 супердиаграммам для собственной энергии духовых полей. Несмотря на то, что часть вкладов оказывается не равным нулю, последние в точности сокращаются с вкладами от других диаграмм, рассмотренных коллегами автора в совместных публикациях.

В **Главе 4** изучается возможность построения N=1 суперсимметричных моделей, в которых отношение калибровочной и юкавских констант является ренормгрупповым инвариантом. В частности, рассмотрен известный в литературе случай «P=Q/3», соответствующий тому, что свертка двух юкавских констант по двух индексам выражается через калибровочную константу и операторы Казимира калибровочной группы. Комбинируя точное NSVZ соотношение для бета-функции и факт неперенормируемости вершины с двумя духами и калибровочным полем, автор выводит новое всепетлевое уравнение на аномальные размерности суперполей теории. Явным вычислением в теории «P=Q/3», регуляризованной высшими ковариантными производными проверено, что можно подобрать перенормировочное предписание таким образом, что это уравнение действительно удовлетворяется вплоть до двух петель. Что касается старших порядков, то автор приводит суперграф и соответствующее ему выражение, которое явно нарушает полученное соотношение. При этом, приводится сравнение с известными результатом, полученным в рамках размерной редукции, а также кратко обсуждаются гипотетические ситуации, когда найденные уравнения всё-таки могут удовлетворяться.

Могу отметить, что диссертация написана хорошим языком и достаточно подробно. Каждая глава содержит описание постановки задачи, некоторые детали расчёта и заканчивается кратким обсуждением полученных результатов.

В качестве несущественных замечаний по диссертации хотелось бы упомянуть следующее:

1) Во Введение впервые упоминается NSVZ соотношение. Мне показалось странным, что в работе, во многом основанной на соотношении, полученном в пионерской работе В.А. Новикова, М.А. Шифмана, А.И. Вайнштейна и В.И. Захарова, эта аббревиатура ни разу не расшифровывается.

2) Общим замечанием является то, что в некоторых местах обозначения, используемые в тексте вводятся не сразу после первого упоминания, а лишь через несколько абзацев/страниц. Например, это относится к обозначению голой калибровочной константы и её связи с перенормированной, обсуждаемой в первом разделе Главы 1. Также автор впервые упоминает DR-схему на стр.5, а краткое пояснение, что под ней подразумевается даётся только на стр. 100.

3) В разных частях диссертации выписаны выражения для суперграфов в виде интегралов либо по евклидовым импульсам, либо по импульсам в пространстве Минковского. Не совсем понятен выбор автора в том или ином случае и существенен ли он вообще.

4) Фраза в последнем параграфе на стр. 85 «Данный суперграф *состоит* из четырёх поддиаграмм» может ввести читателя в заблуждение, так как имеются в виду четыре возможные расстановки пропагаторов в одной и той же (под)диаграмме на Рис. 3.5.

5) Глава 4 основана на работе, выполненной только в соавторстве с научным руководителем, и на мой взгляд заслуживает большего внимания. Однако, в диссертации не приведён расчёт диаграммы, представленной на Рис 4.1., а дана лишь ссылка на статью в журнале. От включение этого оригинального расчёта в текст диссертации, последняя бы только выиграла.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, в которой автор внёс существенный вклад в исследование точных соотношений, возникающих в суперсимметричных теориях. Все результаты являются оригинальными и достоверными, получены с помощью хорошо известных и опробованных методов квантовой теории поля. Результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, и неоднократно докладывались на международных

конференциях. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно сказать, что диссертация М.Д Кузьмичева "Ренормгрупповые функции в калибровочных теориях с N=1 суперсимметрией" соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней ВАК, а ее автор М.Д. Кузьмичев безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Официальный оппонент

к.ф.-м.н., начальник сектор ЛТФ ОИЯИ А.В.Бедняков

03 мая 2024 г.

Подпись начальника сектора ЛТФ ОИЯИ А.В. Беднякова заверяю:

учёный секретарь ЛТФ ОИЯИ А.В.Андреев

Сведения об оппоненте:
Бедняков Александр Вадимович
кандидат физико-математических наук, без звания,
начальник сектора Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова,
Объединённый институт ядерных исследований,
адрес: ул. Жолио-Кюри, д.6, г. Дубна, 141980
тел. 8(496)2162748, e-mail: alexander.bednyakov@jinr.ru