

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Казанцев Александр Евгеньевич

**Многопетлевые вычисления и точные
результаты в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теориях**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель:

Пронин Петр Иванович,

к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической физики физического факультета ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»

Официальные оппоненты:

Борк Леонид Владимирович,

к.ф.-м.н., в.н.с. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова»

Арефьева Ирина Ярославна,

д.ф.-м.н., профессор, в.н.с. отдела теоретической физики ФГБУН «Математический институт им. В.А.Стеклова Российской академии наук»

Волобуев Игорь Павлович,

д.ф.-м.н., в.н.с. отдела теоретической физики высоких энергий ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

Защита состоится 17 мая 2018 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.06 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, д.1., стр. 2, физический факультет, Северная физическая аудитория.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/105381024/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.01.06,
доктор физико-математических наук,
профессор

П.А. Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Суперсимметричные калибровочные теории являются одним из наиболее вероятных возможных обобщений Стандартной модели. Поэтому исследование квантовых свойств суперсимметричных теорий приобретает особую актуальность. Известно, что на квантовом уровне суперсимметричные теории обладают рядом очень интересных особенностей, например, в них существуют так называемые теоремы о неперенормировке. (Назовем самые известные: $\mathcal{N} = 1$ суперпотенциал не получает бесконечных квантовых поправок [1], $\mathcal{N} = 2$ суперсимметричная теория Янга–Миллса получает расходящиеся квантовые поправки лишь в однопетлевом приближении [2], а $\mathcal{N} = 4$ суперсимметричная теория Янга–Миллса конечна [3, 4].) Но даже там, где суперсимметрия не приводит к сокращению расходимостей, она приводит к тому, что расходимости разного рода оказываются связанными друг с другом. Здесь необходимо упомянуть точную β -функцию Новикова–Шифмана–Вайнштейна–Захарова (НШВЗ)[5, 6, 7, 8], которая связывает β -функцию калибровочной константы связи с аномальной размерностью суперполей материи в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, а также некоторые другие аналогичные соотношения (см., например, результат для точной перенормировки массы калибрино в работе [9]). Однако пока неясно, в какой регуляризации и в какой схеме вычитаний эти соотношения справедливы, поэтому их точный смысл пока не определен до конца. В настоящее время самой распространенной и разработанной техникой вычислений по теории возмущений является размерная редукция [10], дополненная (модифицированными) минимальными вычитаниями, но в ней соотношение для НШВЗ β -функции не воспроизводится [11]. Хотя при этом и удалось в четырехпетлевом приближении найти связь между схемой минимальных вычитаний и схемой, в которой НШВЗ соотношение справедливо [12, 13], общего предписания для получения последней в размерной редукции до сих пор

нет. При этом некоторые надежды подаются вычисления с использованием регуляризации высшими ковариантными производными. С использованием такой регуляризации удалось во всех порядках теории возмущений строго показать, как возникает НШВЗ соотношение в абелевом случае [14, 15] для ренормгрупповых функций, определенных в терминах голой константы связи, и сформулировать перенормировочное предписание [16] для схемы, в которой оно выполняется для ренормгрупповых функций, определенных в терминах перенормированной константы связи. Случай общей $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса остается в этом смысле пока не исследованным, однако есть основания полагать, что метод высших ковариантных производных и здесь позволит связать точные соотношения и результаты, даваемые теорией возмущений.

Цели и задачи диссертации.

Целью работы является выявление связи между некоторыми точными соотношениями и входящими туда величинами и результатами явных вычислений по теории возмущений в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи.

1. Вычисление ренормгрупповых функций $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теорий Янга–Миллса с применением регуляризации высшими ковариантными производными до порядка, в котором проявляется их схемная зависимость.
2. Проверка справедливости некоторых предложенных точных соотношений между ними, сформулированных в терминах голых констант связи.
3. Поиск схемы вычитаний, в которой предложенные точные соотношения справедливы для ренормгрупповых функций, определенных в терминах перенормированных констант связи.
4. Попутная проверка гипотезы о структуре вкладов в β -функцию $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных неабелевых калибровочных теорий, а именно того, что

они даются интегралами от двойных полных производных в импульсном пространстве (при использовании регуляризации высшими производными).

5. Исследование калибровочной зависимости вычисляемых ренормгрупповых функций.

Научная новизна.

В ходе исследований были использованы новые методы и получены некоторые новые результаты, относящиеся к вычислениям по теории возмущений в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теориях.

1. Впервые удалось простым и естественным образом получить НШВЗ и НШВЗ-подобные соотношения в неабелевых теориях в тех порядках теории возмущений, где существенна схемная зависимость.
2. Впервые для многопетлевых вычислений по теории возмущений в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теориях была применена регуляризация высшими производными, сохраняющая БРСТ-инвариантность.
3. Был получен трехпетлевой вклад в D -функцию Адлера $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной КХД и исследована его схемная зависимость. Проверена связь трехпетлевой D -функции и двухпетлевой аномальной размерности суперполей материи.
4. С использованием БРСТ-инвариантной регуляризации высшими производными были получены трехпетлевые вклады в β -функцию $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, квадратичные по юкавским константам, и соответствующие им вклады в аномальные размерности квантовых суперполей.
5. Для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики, регуляризованной высшими производными, была исследована факторизация вкла-

дов, дающих β -функцию в трехпетлевом приближении, в интегралы от двойных полных производных.

6. На однопетлевом уровне исследована калибровочная зависимость поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, регуляризованной БРСТ-инвариантной версией регуляризации высшими производными.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты для D -функции Адлера могут быть использованы при сравнении феноменологических следствий суперсимметрии с экспериментальными данными, в частности, при анализе вкладов суперсимметричных частиц в аномальный магнитный момент мюона. Результаты, касающиеся β -функции $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса являются нетривиальной проверкой общего утверждения, связывающего β -функцию этой теории и аномальные размерности всех квантовых суперполей, пока строго не доказанного [17]. Результаты, полученные при исследовании калибровочной зависимости поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя, стали отправной точкой для более общей теоремы о перенормировке вершин с одной внешней линией квантового калибровочного суперполя и двумя внешними линиями духов Фаддеева–Попова [17]. При этом в работе используется метод регуляризации высшими ковариантными производными, который находит здесь свое применение не в теоретических построениях, а в явных трехпетлевых вычислениях по теории возмущений. Тем самым данная работа вносит вклад в развитие методов квантовой теории поля в общем и в исследование структуры суперсимметричных теорий на квантовом уровне в частности.

Достоверность и обоснованность результатов.

Работа находится в строгом соответствии с применяемой практикой вычислений по теории возмущений в квантовой теории поля и опирается на хорошо разработанную теорию перенормировок и теорему о перенормируемости супер-

симметричных калибровочных теорий. Полученные результаты находятся в соответствии с общими утверждениями, доказанными для суперсимметричных калибровочных теорий, включающими теоремы о неперенормировке и точные соотношения для ренормгрупповых функций.

Положения, выносимые на защиту.

1. В трехпетлевом приближении вычислена D -функция Адлера $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной КХД, регуляризованной высшими ковариантными производными, для нее проверено точное соотношение, связывающее ее с аномальной размерностью суперполей материи в случае, когда обе ренормгрупповые функции определены в терминах голой константы связи; найдено перенормировочное предписание, фиксирующее схему вычитаний, в которой точное соотношение для D -функции выполняется на перенормированном языке (НШВЗ-схему).
2. Для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса с материей, регуляризованной высшими ковариантными производными, вычислены вклады в β -функцию, квадратичные по юкавскому взаимодействию, для них проверено предполагаемое точное соотношение, сформулированное на языке голых констант связи, связывающее их с вкладами в аномальные размерности суперполей теории; в этом случае проверено предложенное перенормировочное предписание, фиксирующее НШВЗ-схему.
3. В однопетлевом приближении получено явное выражение для калибровочно-зависимой части поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса в случае использования БРСТ-инвариантной версии регуляризации высшими ковариантными производными.
4. В $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной КЭД, регуляризованной высшими производными, в трехпетлевом приближении проверено доказанное во всех поряд-

ках утверждение о факторизации вкладов в β -функцию в интегралы от двойных полных производных по петлевому импульсу; получены явные выражения для этих интегралов.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях.

1. International Workshop “Supersymmetries and Quantum Symmetries – SQS’2017”, ОИЯИ, Дубна, 31 июля – 5 августа 2017;
2. XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов–2017», МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 10–14 апреля 2017;
3. International conference “Quantum Field Theory and Gravity (QFTG’2016)”, Томский государственный педагогический университет, Россия, 1–7 августа 2016;
4. XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов–2016», МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 11–15 апреля 2016;
5. 17-я Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 20–26 августа 2015.

Результаты работы также были доложены 14 февраля 2018 г. на семинаре отдела теоретической физики Математического института им. В.А. Стеклова.

Личный вклад автора.

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, 5 приложений, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, из них 106

страниц текста, включающего 9 рисунков. Библиография содержит 94 наименования на 7 страницах.

Содержание работы

В первой главе приведено вычисление D -функции Адлера $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой хромодинамики в трехпетлевом приближении с использованием метода высших ковариантных производных. В разделе 1.1 приводится точная во всех порядках теории возмущений формула, полученная в работах [18, 19], связывающая D -функцию Адлера с аномальной размерностью суперполей кварков. При этом входящие в эту формулу функция Адлера и аномальная размерность определены в терминах голой константы связи. В разделе 1.2 описывается квантование и регуляризация с помощью высших ковариантных производных $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой хромодинамики с произвольной простой калибровочной группой и N_f суперполями материи в произвольном ее представлении. В разделе 1.3 приводится полное выражение для D -функции Адлера, определенной в терминах голой константы связи, в трехпетлевом приближении в виде интеграла от двойной полной производной. Такая структура интеграла позволяет легко избавиться от интегрирования по одному из петлевых импульсов; оставшиеся интегралы содержат не более двух интегрирований по петлевым импульсам. Раздел 1.4 посвящен вычислению аномальной размерности суперполей материи, определенной в терминах голой константы связи, в двухпетлевом приближении. На уровне петлевых интегралов показывается, что в трехпетлевом приближении справедливо предложенное в работах [18, 19] тождество. При определенном выборе регулятора полученные интегралы вычисляются аналитически и в результате получают выражения для D -функции и аномальной размерности, определенных в терминах голой константы связи, в трех- и двухпетлевом приближении соответственно. В разделе 1.5 осуществляется переход к языку перенормированных констант связи и

предлагается схема вычитаний, в которой схемо-зависимые D -функция и аномальная размерность, определенные в терминах перенормированной константы связи, также удовлетворяют точному во всех порядках теории возмущений соотношению. В разделе 1.6 справедливость выбора предложенной схемы вычитаний проверяется в трехпетлевом приближении. Кроме того, в указанной схеме в трехпетлевом приближении приводятся выражения для D -функции и аномальной размерности, определенных в терминах перенормированной константы связи. В разделе 1.7 по результатам первой главы делаются некоторые выводы.

Во второй главе вычисляются вклады в β -функцию $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса с кубическим суперпотенциалом, квадратичные по юкавским константам. В разделе 2.1 приводится новая форма соотношения для β -функции Новикова–Шифмана–Вайнштейна–Захарова, предложенная в работе [17]. По сравнению с оригинальной версией этого соотношения в его правую часть входят помимо аномальной размерности суперполей материи также аномальная размерность духов Фаддеева–Попова и квантового калибровочного суперполя (предполагается метод фонового поля, поэтому действие содержит классическое фоновое и квантовое калибровочные суперполя). При этом предполагается, что соотношение справедливо при использовании регуляризации высшими ковариантными производными и для ренормгрупповых функций, определенных в терминах голых констант связи. Кроме того, в том же разделе обсуждается перенормировочное предписание, позволяющее зафиксировать схему вычитаний, в которой предложенное соотношение будет выполняться и для ренормгрупповых функций, определенных в терминах перенормированной константы связи. В разделе 2.2 обсуждается квантование $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса с суперпотенциалом и ее регуляризация с помощью метода высших ковариантных производных. В разделе 2.3 приводятся выражения для диаграмм, дающих вклад в β -функцию в трехпетлевом приближении и содержащих две вершины юкавского взаимодействия. Эти выражения представ-

ляют собой интегралы от двойных полных производных по петлевым импульсам, а потому легко сводятся к интегралам не более чем с двумя интегрированиями. В разделе 2.4 в двухпетлевом приближении вычисляются вклады в аномальные размерности суперполей материи и квантового калибровочного суперполя от диаграмм с двумя юкавскими взаимодействиями. На уровне петлевых интегралов можно увидеть, что обсуждавшееся в разделе 2.1 соотношение между β -функцией и аномальными размерностями выполняется для полученных вкладов, если и β -функция, и аномальные размерности определены в терминах голых констант связи. В том же разделе при определенном выборе регуляторов полученные вклады в β -функцию и аномальные размерности, определенные в терминах голых констант связи, вычисляются аналитически. В разделе 2.5 для рассматриваемых вкладов применяется обсуждавшееся в разделе 2.1 перенормировочное предписание; оказывается, что оно действительно фиксирует схему вычитаний, в которой для рассматриваемых вкладов в β -функцию и аномальные размерности, определенные теперь уже в терминах перенормированных констант связи, выполняется соотношение, аналогичное новой форме соотношения Новикова–Шифмана–Вайнштейна–Захарова. В разделе 2.6 по результатам второй главы делаются некоторые выводы.

В третьей главе в однопетлевом приближении исследуется калибровочная зависимость поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя. В разделе 3.1 описывается квантование $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, при котором квадратичный по квантовому калибровочному супер полю член, фиксирующий калибровку, содержит нефиксированный калибровочный параметр. При этом теория регуляризуется с помощью метода высших ковариантных производных, при котором в действие вводятся полные ковариантные производные, что сохраняет калибровочную симметрию до фиксации калибровки. В разделе 3.2 в общей калибровке приводится результат для калибровочно зависимой части поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя. Здесь же обсуждаются некоторые однопетлевые

следствия полученного результата, как-то: перенормировка калибровочного параметра и теорема о неперенормировке для вершин с одной линией квантового калибровочного суперполя и двумя линиями духов Фаддеева–Попова. Раздел 3.3 содержит заключение по третьей главе.

Четвертая глава посвящена исследованию структуры вкладов в β -функцию $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики. В разделе 4.1 обсуждается полученный в работе [15] результат, утверждающий, что вклады в β -функцию $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики даются интегралами от двойных полных производных во всех порядках теории возмущений. При этом вклад в β -функцию в L -петлевом приближении может быть построен по вкладу в двухточечные функции Грина суперполей материи в $(L - 1)$ -петлевом приближении согласно тождеству, полученному с использованием уравнений Швингера–Дайсона. В разделе 4.2 обсуждается квантование и регуляризация $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики с помощью высших ковариантных производных. При этом в действие вводится вспомогательный параметр g , степень которого во вкладе диаграммы дает количество вершин с линиями квантового калибровочного суперполя. В том же разделе приводится указанное тождество, устанавливающее связь между двухточечными функциями Грина фонового калибровочного суперполя и киральных суперполей материи. В разделе 4.3 с использованием результатов работы [20] вычисляется вклад в β -функцию в трехпетлевом приближении для случая произвольного числа ароматов суперполей материи и не равного единице параметра g . При этом показывается, что вклад каждой из диаграмм дается интегралом от двойной полной производной в импульсном пространстве. Далее осуществляется проверка обсуждавшегося в разделах 4.1 и 4.2 тождества сначала в первом порядке по $\alpha_0 = e_0^2/4\pi$, а затем во втором. Проверка выявляет, что тождество справедливо и в самом деле позволяет получить вклады в β -функцию по вкладам в двухточечные функции Грина киральных суперполей. Наконец, после взятия интегралов от двойных полных производных для

β -функции, определенной в терминах голой константы связи, в трехпетлевом приближении получается выражение, согласующееся с результатом Новикова, Шифмана, Вайнштейна и Захарова. В разделе 4.4 по результатам главы делаются некоторые выводы.

Работа также содержит пять приложений. Приложения А, Б и В относятся к первой главе, в которой вычисляется D -функция Адлера $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой хромодинамики в трехпетлевом приближении. В Приложении А приводятся полные выражения для вкладов диаграмм в D -функцию Адлера в трехпетлевом приближении. Приложение Б содержит полные выражения для вкладов диаграмм в двухточечную функцию Грина суперполей кварков в двухпетлевом приближении. В Приложении В содержатся детали аналитического вычисления аномальной размерности суперполей кварков.

Приложения Г и Д относятся ко второй главе, где в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса вычисляются квадратичные по юкавским константам вклады в β -функцию в трехпетлевом приближении и аномальные размерности суперполей материи и квантового калибровочного суперполя в двухпетлевом приближении. Приложение Г содержит необходимые выражения для вкладов в двухточечную функцию Грина суперполей материи и квантового калибровочного суперполя. Приложение Д содержит детали вычисления аномальной размерности суперполей материи и квантового калибровочного суперполя.

Заключение

По результатам работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. В $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной КХД, регуляризованной высшими ковариантными производными, для D -функции Адлера, определенной в терминах голой константы связи, получено аналитическое выражение в трехпетлевом приближении, явно проверено точное соотношение, связывающее ее с аномальной размерностью суперполей материи, определенной

в терминах голой константы связи. Явно продемонстрирована факторизация вкладов в D -функцию в интегралы от двойных полных производных. Найдено перенормировочное предписание, фиксирующее во всех порядках схему вычитаний, в которой точное соотношение справедливо и для D -функции и аномальной размерности, определенных в терминах перенормированной константы связи. Найдено явное выражение для D -функции в этой НШВЗ-подобной схеме.

2. В $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, регуляризованной высшими ковариантными производными, вычислены квадратичные по юкавским константам вклады в β -функцию, определенную в терминах голых констант связи, в трехпетлевом приближении. Для полученного выражения проверено недавно предложенное точное соотношение, связывающее β -функцию с аномальными размерностями квантовых суперполей теории. Для полученных вкладов проверена работа предложенного перенормировочного предписания, фиксирующего схему, в которой точное соотношение справедливо и для ренормгрупповых функций, определенных в терминах перенормированных констант связи. Для рассматриваемых вкладов в β -функцию была проверена их факторизация в интегралы от двойных полных производных.
3. В однопетлевом приближении исследована калибровочная зависимость поляризованного оператора квантового калибровочного суперполя в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, регуляризованной БРСТ-инвариантной версией регуляризации высшими ковариантными производными.
4. Для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики, регуляризованной высшими производными, в трехпетлевом приближении проверено точное соотношение между двухточечными функциями Грина фонового

калибровочного суперполя и киральных суперполей, делающее явной факторизацию вкладов в β -функцию в интегралы от двойных полных производных. Получены явные выражения для интегралов от двойных полных производных в трехпетлевом приближении.

Список публикаций

Основные результаты диссертации были опубликованы в 4 статьях в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и RSCI:

1. Казанцев А.Е., Степаньянц К.В. Соотношение между двухточечными функциями Грина $\mathcal{N} = 1$ СКЭД с N_f ароматами, регуляризованной высшими производными, в трехпетлевом приближении // ЖЭТФ. — 2015. — Т. 147. — С. 714–728.
2. S.S. Aleshin, A.E. Kazantsev, M.B. Skoptsov, K.V. Stepanyantz. One-loop divergences in non-Abelian supersymmetric theories regularized by BRST-invariant version of the higher derivative regularization // JHEP. — 2016. — Vol. 05. — P. 014.
3. Kazantsev A.E., Skoptsov M.B., Stepanyantz K.V. One-loop polarization operator of the quantum gauge superfield for $\mathcal{N} = 1$ SYM regularized by higher derivatives // Modern Physics Letters A. — 2017. — Vol. 32. — P. 1705194.
4. Kataev A.L., Kazantsev A.E., Stepanyantz K.V. The Adler D -function for $\mathcal{N} = 1$ SQCD regularized by higher covariant derivatives in the three-loop approximation // Nucl. Phys. B. — 2018. — Vol. 926. — P. 295–320.

а также в тезисах докладов:

1. Казанцев А.Е. Применение БРСТ-инвариантной регуляризации высшими ковариантными производными для вычисления перенормировки квантового калибровочного поля в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса // XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2016». Секция «Физика». Сборник тезисов. — Т. 2. — Физический факультет МГУ, Москва, 2016. — С. 185–187.
2. Казанцев А.Е. Соотношение между расходимостями в двухточечных функциях Грина $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса в трехпетлевом приближении // XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2017». Секция «Физика». Сборник тезисов. — Физический факультет МГУ, Москва, 2017. — С. 285–287.

Список цитируемой литературы

1. Grisaru Marcus T., Siegel W., Rocek M. Improved Methods for Supergraphs // *Nucl. Phys.* — 1979. — Vol. B159. — P. 429.
2. Howe Paul S., Stelle K. S., Townsend P. K. Miraculous Ultraviolet Cancellations in Supersymmetry Made Manifest // *Nucl. Phys.* — 1984. — Vol. B236. — P. 125–166.
3. Sohnius Martin F., West Peter C. Conformal Invariance in $\mathcal{N} = 4$ Supersymmetric Yang–Mills Theory // *Phys. Lett.* — 1981. — Vol. 100B. — P. 245.
4. Mandelstam Stanley. Light Cone Superspace and the Ultraviolet Finiteness of the $\mathcal{N} = 4$ Model // *Nucl. Phys.* — 1983. — Vol. B213. — P. 149–168.
5. Jones D. R. T. More on the Axial Anomaly in Supersymmetric Yang–Mills Theory // *Phys. Lett.* — 1983. — Vol. 123B. — P. 45–46.
6. Novikov V. A., Shifman Mikhail A., Vainshtein A. I., Zakharov Valentin I. Exact

- Gell-Mann–Low Function of Supersymmetric Yang–Mills Theories from Instanton Calculus // [Nucl. Phys.](#) — 1983. — Vol. B229. — P. 381–393.
7. Novikov V. A., Shifman Mikhail A., Vainshtein A. I., Zakharov Valentin I. Beta Function in Supersymmetric Gauge Theories: Instantons Versus Traditional Approach // [Phys. Lett.](#) — 1986. — Vol. 166B. — P. 329–333. [Ядерная физика 43, 459 (1986)].
 8. Shifman Mikhail A., Vainshtein A. I., Zakharov Valentin I. Exact Gell-Mann–Low Function in Supersymmetric Electrodynamics // [Phys. Lett.](#) — 1986. — Vol. 166B. — P. 334.
 9. Hisano J., Shifman Mikhail A. Exact results for soft supersymmetry breaking parameters in supersymmetric gauge theories // [Phys. Rev.](#) — 1997. — Vol. D56. — P. 5475–5482. [arXiv:hep-ph/9705417](#).
 10. Siegel Warren. Supersymmetric Dimensional Regularization via Dimensional Reduction // [Phys. Lett.](#) — 1979. — Vol. 84B. — P. 193–196.
 11. Jack I., Jones D. R. T., North C. G. $\mathcal{N} = 1$ supersymmetry and the three-loop gauge β -function // [Phys. Lett.](#) — 1996. — Vol. B386. — P. 138–140. [arXiv:hep-ph/9606323](#).
 12. Jack I., Jones D. R. T., North C. G. Scheme dependence and the NSVZ β -function // [Nucl. Phys.](#) — 1997. — Vol. B486. — P. 479–499. [arXiv:hep-ph/9609325](#).
 13. Jack I., Jones D. R. T., Pickering A. The Connection between DRED and NSVZ // [Phys. Lett.](#) — 1998. — Vol. B435. — P. 61–66. [arXiv:hep-ph/9805482](#).
 14. Stepanyantz K. V. Derivation of the exact NSVZ β -function in $\mathcal{N} = 1$ SQED, regularized by higher derivatives, by direct summation of Feynman diagrams // [Nucl. Phys.](#) — 2011. — Vol. B852. — P. 71–107. [arXiv:hep-th/1102.3772](#).
 15. Stepanyantz K. V. The NSVZ β -function and the Schwinger-Dyson equations for $\mathcal{N} = 1$ SQED with N_f flavors, regularized by higher derivatives // [JHEP.](#) — 2014. — Vol. 08. — P. 096. [arXiv:hep-th/1404.6717](#).
 16. Kataev A. L., Stepanyantz K. V. NSVZ scheme with the higher derivative reg-

- ularization for $\mathcal{N} = 1$ SQED // *Nucl. Phys.* — 2013. — Vol. B875. — P. 459–482. [arXiv:hep-th/1305.7094](#).
17. Stepanyantz K. V. Non-renormalization of the $V\bar{c}c$ -vertices in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories // *Nucl. Phys.* — 2016. — Vol. B909. — P. 316–335. [arXiv:hep-th/1603.04801](#).
 18. Shifman M., Stepanyantz K. Exact Adler Function in Supersymmetric QCD // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 114, no. 5. — P. 051601. [arXiv:hep-th/1412.3382](#).
 19. Shifman M., Stepanyantz K. V. Derivation of the exact expression for the D function in $\mathcal{N} = 1$ SQCD // *Phys. Rev.* — 2015. — Vol. D91. — P. 105008. [arXiv:hep-th/1502.06655](#).
 20. Солошенко А. А., Степаньянц К. В. Трехпетлевая β -функция $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной электродинамики, регуляризованной высшими производными // *ТМФ*. — 2004. — Т. 140. — С. 437–459. [arXiv:hep-th/0304083](#).