

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Степаньянц Константин Викторович

**Точная β -функция $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных
калибровочных теорий и регуляризация
высшими ковариантными производными**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

МОСКВА — 2021

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

Официальные оппоненты:

Арефьева Ирина Ярославна

доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУН Математический
Институт имени В.А.Стеклова РАН,
ведущий научный сотрудник

Горбунов Дмитрий Сергеевич

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
ФГБУН Институт Ядерных Исследований
РАН, главный научный сотрудник

Казаков Дмитрий Игоревич

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
Объединенный Институт Ядерных
Исследований, директор Лаборатории
теоретической физики имени Н.Н.Боголюбова

Защита состоится 24 ноября 2021 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.06 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 2, физический факультет, ауд. 4-46.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/389790539/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

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

П.А. Поляков

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования

Точная β -функция Новикова, Шифмана, Вайнштейна и Захарова (NSVZ) [51–54] представляет собой соотношение между β -функцией $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий и аномальной размерностью киральных суперполей материи. В явном виде для теории с калибровочной группой G и одной калибровочной константой связи α она записывается как

$$\frac{\beta(\alpha, \lambda)}{\alpha^2} = -\frac{3C_2 - T(R) + C(R)_i^j (\gamma_\phi)_j^i(\alpha, \lambda)/r}{2\pi(1 - C_2\alpha/2\pi)}, \quad (1)$$

где λ обозначает юкавские константы,

$$\begin{aligned} \text{tr}(T^A T^B) &\equiv T(R) \delta^{AB}; & (T^A T^A)_i^j &\equiv C(R)_i^j; \\ f^{ACD} f^{BCD} &\equiv C_2 \delta^{AB}; & r &\equiv \dim G = \delta^{AA}, \end{aligned} \quad (2)$$

а T^A — генераторы представления R , в котором лежат киральные суперполя материи. Формула (1) является важным ограничением на структуру расходимостей теории и тесно связана с такими вопросами, как теоремы о неперенормировке в теориях с расширенной суперсимметрией, структурой квантовых поправок в теориях с мягко нарушенной суперсимметрией, структурой квантовых поправок в суперсимметричных расширениях Стандартной модели и даже с построением конечных $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теорий. Однако, несмотря на то, что соотношение NSVZ известно с 1983 года, до появления работ, лежащих в основе диссертации, отсутствовал его вывод с помощью прямого суммирования ряда теории возмущений. Кроме того, полностью открытым оставался вопрос о том, в какой схеме перенормировки оно справедлива. Решение этих вопросов безусловно представляет собой интересную и актуальную задачу.

Цели и задачи исследования

Целью диссертации является построение вывода точной NSVZ β -функции во всех порядках теории возмущений с помощью непосредственного суммирования ряда теории возмущений для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий, регуляризованных высшими ковариантными производными, построение всепетлевого перенормировочного предписания, дающего NSVZ схему, а также исследование ряда смежных вопросов.

Методология и методы исследования

В диссертации используются стандартные строгие методы квантовой теории поля [55], прежде всего, метод континуального интеграла [56] для построения ряда теории возмущений. Кроме того, используется техника $\mathcal{N} = 1$ суперпространства (см., например, обзоры [57, 58] и книги [59–62], а также ссылки в них), которая позволяет проводить квантование и вычисление квантовых поправок явно $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричным образом. В Главе 11 для исследования теорий с расширенной суперсимметрией также используется $\mathcal{N} = 2$ гармоническое суперпространство [63], см. также обзор [64] и книгу [65].

Особенно необходимо отметить важнейшую роль, которую в диссертационном исследовании играет метод регуляризации высшими ковариантными производными [66, 67], дополненный регуляризацией Паули–Вилларса для устранения остаточных однопетлевых расходимостей [68], в суперсимметричной формулировке [69, 70]. Именно его применение позволило дать ответы на вопросы, которые ранее их не имели. В ряде случаев также использовался метод проведения вычислений во всех порядках теории возмущений, основанный на уравнениях Швингера–Дайсона. Также существенную роль в диссертации сыграло использование различных тождеств Славнова–Тейлора [71, 72].

Положения выносимые на защиту

1. Доказано, что во всех порядках теории возмущений β -функция $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий, определенная в терминах голых констант связи, задается интегралами от двойных полных производных по петлевым импульсам в случае, если теория регуляризована высшими ковариантными производными.

2. Предложен метод получения β -функции для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий, регуляризованных высшими ковариантными производными, который требует только вычисления специальным образом модифицированных вакуумных суперграфов.

3. Для $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теорий во всех порядках теории возмущений доказана теорема о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин, в которых одна из внешних линий соответствует квантовому калибровочному суперполю, а две оставшиеся — духам Фаддеева–Попова.

4. С помощью теоремы о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин в неабелевом случае точная NSVZ β -функция записана в виде соотношения

$$\frac{\beta(\alpha, \lambda)}{\alpha^2} = -\frac{1}{2\pi} \left(3C_2 - T(R) - 2C_2\gamma_c(\alpha, \lambda) - 2C_2\gamma_V(\alpha, \lambda) + \frac{1}{r} C(R) i^j (\gamma_\phi)_j^i(\alpha, \lambda) \right), \quad (3)$$

которое связывает β -функцию с аномальными размерностями квантового калибровочного суперполя, духов Фаддеева–Попова и суперполей материи.

5. Показано, что NSVZ соотношения (1) и (3) справедливы во всех порядках теории возмущений для ренормгрупповых функций (РГФ), определенных в терминах голой константы связи, в случае, если теория регуляризована высшими ковариантными производными, и отношение масс суперполей Паули–Вилларса к размерному параметру регуляризации не зависит от констант связи.

6. Во всех порядках теории возмущений доказано, что для РГФ, определенных в терминах перенормированных констант связи, одна из NSVZ схем получается с помощью предписания HD+MSL, когда теория регуляризована высшими производными, а для устранения расходимостей используется схема минимальных вычитаний логарифмов, когда в константы перенормировки включаются только степени $\ln \Lambda/\mu$.

7. Доказана точная формула для D -функции Адлера в $\mathcal{N} = 1$ СКХД, которая связывает ее с аномальной размерностью суперполей материи. Установлено, что она справедлива для РГФ, определенных в терминах голой константы связи, при использовании регуляризации высшими ковариантными производными, и для РГФ, определенных в терминах перенормированной константы связи, в HD+MSL схеме.

8. Доказано, что точная формула для перенормировки массы фотино в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной электродинамике (СКЭД) с мягко нарушенной суперсимметрией справедлива для РГФ, определенных в терминах голой константы связи, во всех порядках теории возмущений при использовании регуляризации высшими производными, а для РГФ, определенных в терминах перенормированной константы связи, — в HD+MSL схеме.

Научная новизна

Все результаты, полученные в диссертации являются новыми, хотя ряд близких вопросов обсуждался в литературе.

Регуляризация высшими ковариантными производными была впервые применена к исследованию многопетлевых квантовых поправок в суперсимметричных теориях в работах, лежащих в основе диссертационного

исследования. Ранее такая регуляризация использовалась только для вычисления однопетлевой β -функции в несуперсимметричном случае, см. работу [73], а также работы [74, 75], в которых была исправлена ошибка, допущенная в [73]. Кроме того, можно указать ряд работ, в которых вычислялся однопетлевой эффективный потенциал в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теориях, содержащих высшие производные [76–82].

Аргументы, свидетельствующие о факторизации интегралов, определяющих β -функцию $\mathcal{N} = 1$ СКЭД, в интегралы от двойных полных производных при использовании регуляризации высшими производными, приводились в работе [83]. Однако строгое доказательство этого факта было дано только в работе [12]. В неабелевом случае такое доказательство сделано впервые в работе [31].

Метод вычисления β -функции с помощью вакуумных суперграфов в абелевом случае был предложен в работе [83]. В неабелевом случае аналогичный результат ранее известен не был.

Теоремы, аналогичные теореме о неперенормировке тройных духовокалибровочных вершин, ранее были известны только в калибровке Ландау для несуперсимметричной теории Янга–Миллса [84] и $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, сформулированной в терминах компонентных полей в калибровке Весса–Зумино [85]. В общей ξ -калибровке и для суперполевого описания такая теорема впервые получена в работе [25].

Несмотря на то, что определения РГФ как в терминах голых констант связи, так и в терминах перенормированных констант связи использовались в литературе, посвященной NSVZ β -функции, различие между ними никогда не отмечалось. Также не отмечалась и связь между этими определениями.

Несмотря на большое количество работ, посвященных выводу формулы NSVZ, как правило, это делалось на основе некоторых общих утверждений, которые, строго говоря, также нуждаются в доказательствах. К этим утверждениям относятся ренорминвариантность инстантонных вкладов [51, 53, 86], аргументы, основанные на аномалиях [52, 54, 87], и неперенормировка топологического слагаемого [88]. Строгий вывод методами теории возмущений никогда не делался. Именно поэтому в течение длительного времени открытым оставался вопрос о построении схемы перенормировки, в которой справедливо NSVZ соотношение, который был впервые и полностью решен в работах, лежащих в основе диссертационного исследования. Тем не менее, необходимо отметить, что в ряде работ [89–93] NSVZ схема строилась с помощью точной подстройки калибровочной константы связи в каждом порядке теории возмущений.

Схема HD+MSL была впервые предложена в работах, лежащих в основе диссертационного исследования.

Точная всепетлевая формула для D -функции Адлера ранее известна не была.

Схема перенормировки, в которой справедливо NSVZ-подобное соотношение для массы фотино, ранее известна не была.

Одна из версий регуляризации высшими ковариантными производными для теорий с $\mathcal{N} = 2$ обсуждалась в работе [94], однако, слагаемое с высшими производными, инвариантное относительно преобразований $\mathcal{N} = 2$ суперсимметрии, в ней построено не было.

Достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждается многочисленными явными вычислениями в низших (одно-, двух- и трехпетлевым) порядках теории возмущений. Также достоверность результатов подтверждается их согласием с результатами работ других авторов и рядом общих теорем о структуре квантовых поправок.

Работы, в которых были получены результаты, лежащие в основе диссертации, были опубликованы в ведущих мировых и российских научных журналах с высоким импакт-фактором. Результаты, лежащие в основе диссертации, неоднократно докладывались автором на различных международных конференциях и рабочих совещаниях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Основная теоретическая значимость работы заключается в том, что теперь становится понятным почему, как и в какой схеме перенормировки получается точная NSVZ β -функция. Этот результат может в перспективе оказаться полезным при исследовании конечных $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теорий и теорий с мягко нарушенной суперсимметрией. Не исключено, что он также будет полезен при решении глобальной проблемы существования ультрафиолетовых расходимостей в квантовой теории поля.

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации докладывались на следующих международных конференциях и рабочих совещаниях:

1. “Application of higher derivative regularization to calculation of quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories.”, 13th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 23 — 29 августа 2007.

2. “Some interesting features of quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories”, 15th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2008, Сергиев Посад, Россия, 23 — 29 мая 2008.

3. “Revealing structure of quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories using the Schwinger-Dyson equations”, 14th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 19 — 25 августа 2009.
4. “Quantum corrections in supersymmetric theories with cubic superpotential, regularized by higher covariant derivatives”, International Workshop “Supersymmetries & Quantum Symmetries - SQS’09”, Дубна, Россия, 29 июля — 3 августа 2009.
5. “Quantum corrections in supersymmetric theories with the higher covariant derivative regularization”, The 16th International Seminar Quarks 2010, Коломна, Россия, 6 — 12 июня 2010.
6. “Higher covariant derivative regularization for calculations in supersymmetric theories”, International Conference “Gauge Fields. Yesterday, Today, Tomorrow” dedicated to the 70-th anniversary of Andrei Alekseevich Slavnov, Москва, Россия, 19 — 24 января 2010.
7. “Application of the higher derivative regularization to calculations in supersymmetric theories”, International Conference “Quantum Field Theory and Gravity” (QFTG 2010), Томск, Россия, 5 — 9 июля 2010.
8. “Multiloop calculations in supersymmetric theories with the higher covariant derivative regularization”, 14 International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Аксбридж, Лондон, Великобритания 5 — 9 сентября 2011.
9. “Derivation of the exact NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED, regularized by higher derivatives, by direct summation of Feynman diagrams”, The International Workshop “Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS’2011”, Дубна, Россия, 18 — 23 июля 2011.
10. “Derivation of the exact NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives by summation of Feynman diagrams”, 7th International Conference on Quantum Theory and Symmetries (QTS7), Прага, Чехия, 2 — 6 августа 2011.
11. “Derivation of the NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives by summation of diagrams”, 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 18 — 24 августа 2011.
12. “Derivation of the NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives by summation of Feynman diagrams”, 14-th Russian Gravitational Conference — International Conference on Gravitation, Cosmology and Astrophysics, Ульяновск, Россия, 27 июня — 2 июля 2011.

13. “Schwinger-Dyson equations and NSVZ beta-function in supersymmetric theories”, International Conference on Integrable Systems and Quantum symmetries (ISQS-20), Прага, Чехия, 17 — 23 июня 2012.
14. “Derivation of the NSVZ beta-function using effective diagrams”, International Conference "Quantum Field Theory and Gravity (QFTG'12) Томск, Россия, 31 июля — 4 августа 2012.
15. ”The renormalization scheme, producing the NSVZ beta-function for $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives”, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 22 — 28 августа 2013.
16. “NSVZ scheme and the regularization by higher derivatives”, International conference "Quantum Field Theory and Gravity"(QFTG'14), Томск, Россия, 28 июля — 3 августа 2014.
17. “Construction of the NSVZ scheme for Abelian supersymmetric theories, regularized by higher derivatives”, 18th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2014, Суздаль, Россия, 2 — 8 июня 2014.
18. “NSVZ relation and higher derivatives”, The International Workshop “Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS'2015”, Дубна, Россия, 3 — 8 августа 2015.
19. “Renormalization of the coupling constant and the HD regularization in supersymmetric theories”, 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 20 — 26 августа 2015.
20. “Higher covariant derivative regularization in supersymmetric theories”, 3rd International Conference “Higher Spin Theory and Holography” HSTH-3, Москва, Россия, 23 — 25 ноября 2015.
21. “Some aspects of $\mathcal{N} = 1$ SYM renormalization”, 19th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2016, Санкт-Петербург, Россия, 29 мая — 4 июня 2016.
22. “Renormalization of supersymmetric theories with the higher derivative regularization”, Quantum Field Theory and Gravity (QFTG'2016), Томск, Россия, 1 — 7 августа 2016.
23. “Finiteness of the triple ghost-gauge vertices in $\mathcal{N} = 1$ SYM theories”, 5th International Conference “Higher Spin Theory and Holography” HSTH-5, Москва, Россия, 30 ноября — 2 декабря 2016.
24. “Renormalization of supersymmetric theories with the higher derivative regularization”, The XXV-th International Conference on Integrable Systems and Quantum Symmetries, Прага, Чехия, 6 — 10 июня 2017.

25. “Structure of quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric gauge theories”, The twentieth workshop “What comes beyond the standard models”, Блед, Словения, 10 — 16 июля 2017.

26. “NSVZ relation in supersymmetric theories regularized by higher derivatives”, International Workshop “Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS’2017”, Дубна, Россия, 31 июля — 5 августа 2017.

27. “Supersymmetry, quantum corrections, and the higher derivative regularization”, 20th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2018, Валдай, Россия, 27 мая — 2 июня 2018.

28. “How to construct the NSVZ and NSVZ-like schemes”, Quantum Field Theory and Gravity (QFTG’2018), Томск, Россия, 30 июля — 5 августа 2018.

29. “The NSVZ relation and the NSVZ scheme for $\mathcal{N} = 1$ non-Abelian supersymmetric theories, regularized by higher covariant derivatives”, The XXVI-th International Conference on Integrable Systems and Quantum Symmetries (ISQS-26), Прага, Чехия, 8 — 12 июля 2019.

30. “NSVZ with higher derivatives”, 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Москва, Россия, 22 — 28 августа 2019.

31. “NSVZ relation and NSVZ scheme in non-Abelian supersymmetric gauge theories”, International Bogolyubov conference “Problems of theoretical and mathematical physics” (dedicated to the 110th anniversary of the birth of N.N. Bogolyubov (1909-1992)), Москва и Дубна, Россия, 9 — 13 сентября 2019.

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 36 статьях в ведущих международных и российских журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science (WoS), РИНЦ (RSCI), ВАК, большинство из которых также были опубликованы в виде ArXiv-препринтов. Также диссертация основана на еще 14 работах, вышедших в материалах международных конференций и рабочих совещаний.

Работы, описывающие вывод NSVZ соотношения и NSVZ схемы для неабелевых калибровочных теорий [25,31,34,35], а также и ряд других работ, были сделаны автором полностью самостоятельно и опубликованы без соавторов. В частности, в публикациях без соавторов был дан вывод NSVZ соотношения в $\mathcal{N} = 1$ СКЭД для РГФ, определенных в терминах голой константы связи, [12], а также вычислена двухпетлевая β -функция для произвольной перенормируемой $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной калибровочной теории с простой калибровочной группой, регуляризованной высшими ковариантными производными без нарушения BRST-инвариантности, [32].

В других работах, на которых основана диссертация, вклад автора является либо определяющим, либо очень существенным. Автор принимал участие в постановках задач, разработке методов их решения и непосредственном проведении вычислений. Для подавляющего большинства этих работ им были написаны черновые варианты текстов, выполнены отсылки в ArXiv и редакции журналов, осуществлялась переписка с редакторами и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из 11 глав, первая из которых является введением, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации — 317 страниц, число рисунков — 33, список литературы включает 244 ссылки.

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 11 глав (включая введение), заключения и списка литературы.

Глава 1 представляет собой **Введение**. В ней описываются существующие в настоящее время косвенные экспериментальные указания на существование суперсимметрии в физике элементарных частиц, а также характерные особенности ультрафиолетовых свойств суперсимметричных теориях, к которым, в частности, относится NSVZ соотношение. После этого кратко объясняются основные идеи, которые в диссертации используются для всепетлевого вывода формулы NSVZ методами теории возмущений и построения NSVZ схемы во всех порядках теории возмущений. Также во Введении приводится общая характеристика диссертационной работы. В частности, дается обоснование актуальности темы исследования, описываются его цели и задачи, используемые методы, формулируются положения, выносимые на защиту, обсуждается научная новизна, достоверность, практическая и теоретическая значимость результатов работы, а также личный вклад автора в их получение. Кроме того указывается, на каких конференциях были доложены результаты исследования, и описывается структура диссертации.

В **Главе 2** с использованием регуляризации высшими производными NSVZ соотношение исследуется для наиболее простой суперсимметричной калибровочной теории, а именно, $\mathcal{N} = 1$ СКЭД с N_f ароматами. Сначала для этой теории приводятся явные выражения для β -функции и аномальной размерности суперполей материи, определенных в терминах голой константы связи, в трех- и двухпетлевом приближениях соответственно. При этом демонстрируется, что β -функция определяется интегралами от

двойных полных производных, и что такая структура приводит к связи между трехпетлевой β -функцией и двухпетлевой аномальной размерностью. После этого дается всепетлевой вывод NSVZ соотношения с помощью явного суммирования ряда теории возмущений. В частности, в процессе этого вывода доказывається, что во всех порядках β -функция определяется интегралами от двойных полных производных, после вычисления которых получается формула NSVZ для РГФ, определенных в терминах голых констант связи. Также показано, что следствием этого является то, что NSVZ соотношение оказывается справедливым для РГФ, определенных в терминах перенормированной константы связи, в HD+MSL схеме во всех порядках теории возмущений.

Глава 3 посвящена доказательству NSVZ-подобного соотношения, описывающего перенормировку массы фотино, в мягко нарушенной $\mathcal{N} = 1$ СКЭД с N_f ароматами, регуляризованной высшими производными. Это делается с использованием обобщения метода, описанного в Главе 2. С его помощью во всех порядках теории возмущений доказывається справедливость (нескольких вариантов) формулы, связывающей РГФ, описывающей перенормировку массы фотино, с аномальной размерностью суперполей материи в жесткой теории, в случае если обе РГФ определены в терминах голой константы связи. При этом показано, что причиной возникновения этого точного соотношения является факторизация интегралов, определяющих перенормировку массы фотино, в интегралы от двойных полных производных по петлевому импульсу. Полученные результаты проверяются явным вычислением двухпетлевой перенормировки массы фотино с использованием регуляризации высшими производными и сравнением результата с однопетлевой аномальной размерностью суперполей материи в жесткой теории. Также доказано, что для РГФ, определенных в терминах перенормированной константы связи, различные формы точного соотношения для перенормировки массы фотино справедливы в HD+MSL схеме во всех порядках теории возмущений.

В **Главе 4** напоминаются основные сведения о неабелевых суперсимметричных калибровочных теориях. При этом, в частности, описывается, как осуществляется их регуляризация с помощью метода высших ковариантных производных и квантование, а также дается краткий вывод тождеств Славнова–Тейлора. Далее рассматриваются особенности перенормировки таких теорий, и приводятся два различных определения РГФ — в терминах перенормированных констант связи и в терминах голых констант связи. При этом демонстрируется, что оба этих определения с точностью до переобозначения аргумента дают одни и те же функции в схеме HD+MSL.

В **Главе 5** точно во всех порядках теории возмущений выводится все-

петлевое NSVZ-подобное выражение для D -функции Адлера в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной КХД, взаимодействующей с абелевым калибровочным суперполем. Это соотношение связывает D -функцию Адлера с аномальной размерностью суперполей материи в $\mathcal{N} = 1$ СКХД. Показано, что оно является справедливым для РГФ, определенных в терминах голой константы связи, в случае если теория регуляризована высшими ковариантными производными, а также для РГФ, определенных в терминах перенормированных констант связи, в HD+MSL схеме.

Глава 6 посвящена теореме о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин и ее следствиям. Вначале теорема формулируется, а затем доказывается с помощью метода, основанного на тождествах Славнова–Тейлора и правилах вычисления супердиаграмм. После этого выводится соотношение между константами перенормировки, следующее из этой теоремы. Затем утверждение теоремы проверяется с помощью явного однопетлевого вычисления, которое полностью подтверждает ее справедливость. В заключительном разделе этой главы с помощью теоремы о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин выводится новая форма NSVZ соотношения, которая используется в последующих разделах для вывода формулы NSVZ.

В **Главе 7** доказывается, что в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных калибровочных теориях, регуляризованных высшими ковариантными производными, β -функция (определенная в терминах голых констант связи) во всех порядках теории возмущений представляет собой сумму интегралов от двойных полных производных по петлевым импульсам. На базе идей этого доказательства формулируется метод построения таких интегралов, который основан на вычислении специальным образом модифицированных вакуумных суперграфов и многократно упрощает нахождение квадратур, определяющих β -функцию. Эти интегралы отличны от 0 из-за сингулярных вкладов, которые получаются при действии двойных полных производных на квадраты импульсов в минус первой степени, возникающих из безмассовых пропагаторов.

Точное выражение для NSVZ β -функции вычисляется в **Главе 8** с помощью непосредственного суммирования ряда теории возмущений. Для этого производится суммирование всех сингулярных вкладов, которые естественным образом делятся на три части, в зависимости от того, на пропагатор какого суперполя действуют двойные полные производные. В результате получается точное выражение для β -функции, определенной в терминах голых констант связи, которое связывает ее с аномальными размерностями квантового калибровочного суперполя, духов Фаддеева–Попова и суперполей материи. С использованием теоремы о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин из него также получается

и стандартная форма NSVZ соотношения. Кроме того, в Главе 8 демонстрируется, что одна из NSVZ схем для РГФ, определенных в терминах перенормированных констант связи, во всех порядках теории возмущений дается HD+MSL предписанием.

В **Главе 9** общие утверждения, доказанные в предыдущих главах, проверяются явными вычислениями в низших порядках теории возмущений. В частности, с использованием метода построения интегралов от двойных полных производных, описанного в Главе 7, вычисляется двухпетлевая β -функция для произвольной перенормируемой $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной калибровочной теории с простой калибровочной группой. При этом показано, что результат не зависит от калибровочного параметра ξ_0 и удовлетворяет NSVZ соотношению. Также с помощью этого метода вычисляется часть трехпетлевого вклада в β -функцию, содержащая юкавские константы, и демонстрируется, что интегралы, определяющие ее, полностью совпадают с интегралами, полученными с помощью стандартного вычисления.

Глава 10 посвящена исследованию NSVZ соотношения в теориях с расширенной суперсимметрией, сформулированных на языке $\mathcal{N} = 1$ суперпространства. При этом показано, что, вообще говоря, из NSVZ соотношения не следует конечность $\mathcal{N} = 2$ суперсимметричных теорий за рамками однопетлевого приближения. Это связано с тем, что в рамках рассматриваемого формализма только $\mathcal{N} = 1$ суперсимметрия является явной симметрией эффективного действия, в то время как скрытая суперсимметрия может нарушаться из-за $\mathcal{N} = 2$ несуперсимметричного квантования.

В **Главе 11** регуляризация высшими ковариантными производными строится в гармоническом суперпространстве, использование которого позволяет сделать $\mathcal{N} = 2$ суперсимметрию явной на всех этапах вычисления квантовых поправок. Использование этой регуляризации позволяет построить предписание, которое гарантирует конечность теории вне рамок однопетлевого приближения в полном согласии с предсказанием формулы NSVZ при условии $\mathcal{N} = 2$ суперсимметричного квантования. С помощью построенной регуляризации в данной главе также вычисляются однопетлевые квантовые поправки и демонстрируется, что однопетлевая β -функция определяется интегралами от двойных полных производных.

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

Список литературы содержит 244 ссылки.

Заключение

Основным результатом диссертационного исследования является всепетлевой вывод NSVZ β -функции с помощью прямого вычисления квантовых поправок и построение всепетлевого предписания, дающего одну из NSVZ схем.

Точная NSVZ β -функция (1) и ее аналоги являются важнейшими соотношениями, которые ограничивают структуру расходимостей суперсимметричных теорий (а также теорий с мягко нарушенной суперсимметрией), рассматриваемых в настоящее время как наиболее вероятная основа для описания физики за пределами Стандартной модели.

Несмотря на то, что точная NSVZ β -функция известна с 1983 года, до недавнего времени было неясно, как получить ее непосредственным суммированием квантовых поправок во всех порядках теории возмущений. Более того, было даже неизвестно, при использовании какого перенормировочного предписания она справедлива. В работах, на которых основана диссертация, обе эти проблемы были полностью решены.

Ключевую роль при пертурбативном выводе NSVZ β -функции и построении всепетлевого перенормировочного предписания, дающего NSVZ схему, сыграло использование регуляризации высшими ковариантными производными, предложенной Андреем Алексеевичем Славновым, в суперсимметричной версии. Как описано в диссертации, при использовании такой регуляризации NSVZ β -функция и NSVZ-подобные соотношения справедливы для РГФ, определенных в терминах голых констант связи. Это утверждение справедливо вне зависимости от схемы перенормировки, дополняющей регуляризацию высшими ковариантными производными, поскольку такие РГФ зависят только от регуляризации, но не зависят от выбора перенормировочного предписания при фиксированной регуляризации. Как следствие, стандартные РГФ, определенные в терминах перенормированных констант связи, удовлетворяют NSVZ (или NSVZ-подобным) соотношениям в HD+MSL схеме, где HD означает использование регуляризации высшими ковариантными производными, а MSL — минимальные вычитания логарифмов, когда в константы перенормировки включаются только степени $\ln \Lambda/\mu$. При этом Λ обозначает размерный параметр регуляризации высшими производными, а μ — точку перенормировки.

Для доказательства вышеуказанных утверждений также был получен ряд вспомогательных новых результатов. В частности, была доказана теорема о неперенормировке тройных духово-калибровочных вершин в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричных теориях, а NSVZ соотношение было переписано в ранее неизвестной форме (3). Было установлено, что NSVZ и NSVZ-подобные

соотношения возникают из-за факторизации петлевых интегралов, определяющих β -функцию (или же другие РГФ в случае NSVZ-подобных соотношений), в интегралы от двойных полных производных по петлевым импульсам, что было доказано во всех порядках теории возмущений. Также был проведен анализ следствий NSVZ соотношения для теорий с расширенной суперсимметрией, и установлен способ вычисления квантовых поправок, при котором будут справедливы теоремы о неперенормировке в теориях с расширенной суперсимметрией.

Общие утверждения, представленные в диссертации, были проверены явными вычислениями в низших (вплоть до трехпетлевого) порядках теории возмущений. При этом многие явные вычисления были проведены в таких приближениях, где существенна схемная зависимость, благодаря чему проведенные проверки являются существенно нетривиальными.

Публикации автора

в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, SCOPUS, RSCI

- [1] Pronin P. I. and Stepanyantz K. V. One loop counterterms for the dimensional regularization of arbitrary Lagrangians. // Nucl. Phys. B. — 1997. — Vol. 485. — P. 517. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*
- [2] Pronin P. I. and Stepanyantz K. One loop counterterms for higher derivative regularized Lagrangians. // Phys. Lett. B. — 1997. — Vol. 414. — P. 117. **ИФ WoS: 4.162.** *WoS, SCOPUS.*
- [3] Солошенко А. А. и Степаньянц К. В. Двухпетлевая β -функция $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики, регуляризованной при помощи высших ковариантных производных. // ТМФ. — 2002. — Т. 131. — С. 135;
Soloshenko A. A. and Stepanyantz K. V. Two-loop beta-function of $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric quantum electrodynamics regularized using higher covariant derivatives. // Theor. Math. Phys. — 2002. — Vol. 131. — P. 558. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [4] Солошенко А. А. и Степаньянц К. В. Двухпетлевая аномальная размерность $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной квантовой электродинамики,

- регуляризованной при помощи высших ковариантных производных. // ТМФ. — 2003. — Т. 134. — С. 430;
- Soloshenko A. A. and Stepanyantz K. V. Two-loop anomalous dimension of $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric quantum electrodynamics regularized using higher covariant derivatives. // Theor. Math. Phys. — 2003. — Vol. 134. — P. 377. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [5] Славнов А. А. и Степаньянц К. В. Универсальная инвариантная перенормировка для суперсимметричных теорий. // ТМФ. — 2003. — Т. 135. — С. 265;
- Slavnov A. A. and Stepanyantz K. V. Universal invariant renormalization for supersymmetric theories. // Theor. Math. Phys. — 2003. — Vol. 135. — P. 673. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [6] Славнов А. А. и Степаньянц К. В. Универсальная инвариантная перенормировка для суперсимметричной теории Янга–Миллса. // ТМФ. — 2004. — Т. 139. — С. 179;
- Slavnov A. A. and Stepanyantz K. V. Universal invariant renormalization of supersymmetric Yang-Mills theory. Theor. Math. Phys. — 2004. — Vol. 139. — P. 599. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [7] Солошенко А. А. и Степаньянц К. В. Трехпетлевая β -функция $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной электродинамики, регуляризованной высшими производными. // ТМФ. — 2004. — Т. 140. — С. 437;
- Soloshenko A. A. and Stepanyantz K. V. Three loop beta function for $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric electrodynamics, regularized by higher derivatives. // Theor. Math. Phys. — 2004. — Vol. 140. — P. 1264. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [8] Степаньянц К. В. Исследование проблемы аномалий в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной электродинамике. // ТМФ. — 2005. — Т. 142. — С. 37;
- Stepanyantz K. V. Investigation of the anomaly puzzle in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric electrodynamics. // Theor. Math. Phys. — 2005. — Vol. 142. — P. 29. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [9] Степаньянц К. В. и Шевцова Е. С. Структура двухточечной функции Грина калибровочного поля в $\mathcal{N} = 1$ суперсимметричной теории Янга–Миллса, регуляризованной высшими ковариантными производными. // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. — 2003. — N 5. — С. 13;

- Shevtsova E. S. and Stepanyantz K. V. Structure of the two-point green function of the gauge field for $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric Yang-Mills theory regularized by higher covariant derivatives. // Moscow University Physics Bulletin. — 2009. — Vol. 64. — No. 5. — P. 485. **ИФ WoS: 0.580.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [10] Pimenov A. B., Shevtsova E. S. and Stepanyantz K. V. Calculation of two-loop beta-function for general $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric Yang-Mills theory with the higher covariant derivative regularization. // Phys. Lett. B. — 2010. — Vol. 686. — P. 293. **ИФ WoS: 4.162.** *WoS, SCOPUS.*
- [11] Stepanyantz K. V. Factorization of integrals, defining the β -function, into integrals of total derivatives in $\mathcal{N} = 1$ SQED, regularized by higher derivatives. // Int. J. Theor. Phys. — 2012. — Vol. 51. — P. 276. **ИФ WoS: 1.121.** *WoS, SCOPUS.*
- [12] 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. B. — 2011. — Vol. 852. — P. 71. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*
- [13] Степаньянц К. В. Регуляризация высшими ковариантными производными для вычислений в суперсимметричных теориях. // Труды Математического института им. В.А.Стеклова РАН. — 2011. — Т. 272. — N 1. — С. 266;
 Stepanyantz K. V. Higher covariant derivative regularization for calculations in supersymmetric theories. // Proc. Steklov Inst. Math. — 2011. — Vol. 272. — No.1 — P. 256. **ИФ WoS: 0.700.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [14] Stepanyantz K. V. Quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories with cubic superpotential, regularized by higher covariant derivatives. // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2011. — Vol. 8. — P. 321. **SJR: 0.288.** *SCOPUS.*
- [15] Stepanyantz K. V. Multiloop calculations in supersymmetric theories with the higher covariant derivative regularization. // J. Phys. Conf. Ser. — 2012. — Vol. 368. — P. 012052. **SJR: 0.210.** *SCOPUS.*
- [16] Stepanyantz K. V. Derivation of the exact NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives by summation of Feynman diagrams. // J. Phys. Conf. Ser. — 2012. — Vol. 343. — P. 012115. **SJR: 0.210.** *SCOPUS.*

- [17] Kataev A. L. and Stepanyantz K. V. NSVZ scheme with the higher derivative regularization for $\mathcal{N} = 1$ SQED. // Nucl. Phys. B. — 2013. — Vol. 875. — P. 459. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*
- [18] Kataev A. L. and Stepanyantz K. V. Scheme independent consequence of the NSVZ relation for $\mathcal{N} = 1$ SQED with N_f flavors. // Phys. Lett. B. — 2014. — Vol. 730. — P. 184. **ИФ WoS: 4.162.** *WoS, SCOPUS.*
- [19] Buchbinder I. L. and Stepanyantz K. V. The higher derivative regularization and quantum corrections in $\mathcal{N} = 2$ supersymmetric theories. // Nucl. Phys. B. — 2014. — Vol. 883. — P. 20. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*
- [20] 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. 1408. — P. 096. **ИФ WoS: 5.833.** *WoS, SCOPUS.*
- [21] Катаев А. Л. и Степаньянц К. В. Бета-функция Новикова-Шифмана-Вайнштейна-Захарова в суперсимметричных теориях при различных регуляризациях и перенормировочных предписаниях. // ТМФ. — 2014. — Т. 181. — С. 475;
Kataev A. L. and Stepanyantz K. V. The NSVZ beta-function in supersymmetric theories with different regularizations and renormalization prescriptions. // Theor. Math. Phys. — 2014. — Vol. 181. — P. 1531. **ИФ WoS: 0.901.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [22] Shifman M. and Stepanyantz K. Exact Adler Function in Supersymmetric QCD. // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Vol. 114. — P. 051601. **ИФ WoS: 9.227.** *WoS, SCOPUS.*
- [23] Shifman M. and Stepanyantz K. V. Derivation of the exact expression for the D function in $\mathcal{N} = 1$ SQCD. // Phys. Rev. D. — 2015. — Vol. 91. — P. 105008. **ИФ WoS: 4.368.** *WoS, SCOPUS.*
- [24] Buchbinder I. L., Pletnev N. G. and Stepanyantz K. V. Manifestly $\mathcal{N} = 2$ supersymmetric regularization for $\mathcal{N} = 2$ supersymmetric field theories. // Phys. Lett. B. — 2015. — Vol. 751. — P. 434. **ИФ WoS: 4.162.** *WoS, SCOPUS.*
- [25] Stepanyantz K. V. Non-renormalization of the $V\bar{c}c$ -vertices in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories. // Nucl. Phys. B. — 2016. — Vol. 909. — P. 316. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*

- [26] Nartsev I. V. and Stepanyantz K. V. Exact renormalization of the photino mass in softly broken $\mathcal{N} = 1$ SQED with N_f flavors regularized by higher derivatives. // JHEP. — 2017. — Vol. 1704. — P. 047. **ИФ WoS: 5.833.** *WoS, SCOPUS.*
- [27] Нарцев И. В. и Степаньянц К. В. NSVZ-подобная схема для массы фотино в мягко нарушенной $\mathcal{N} = 1$ СКЭД, регуляризованной высшими производными. // Письма ЖЭТФ. — 2017. — Т. 105. — N 2. — С. 57;
Nartsev I. V. and Stepanyantz K. V. NSVZ-like scheme for the photino mass in softly broken $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives. // JETP Lett. — 2017. — Vol. 105. — No.2. — P. 69. **ИФ WoS: 1.412.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*
- [28] Shakhmanov V. Y. and Stepanyantz K. V. Three-loop NSVZ relation for terms quartic in the Yukawa couplings with the higher covariant derivative regularization. // Nucl. Phys. B. — 2017. — Vol. 920. — P. 345. **ИФ WoS: 3.185.** *WoS, SCOPUS.*
- [29] Shakhmanov V. Y. and Stepanyantz K. V. New form of the NSVZ relation at the two-loop level. // Phys. Lett. B. — 2018. — Vol. 776. — P. 417. **ИФ WoS: 4.162.** *WoS, SCOPUS.*
- [30] Stepanyantz K. V. NSVZ Relation in Supersymmetric Theories Regularized by Higher Derivatives. // Phys. Part. Nucl. — 2018. — Vol. 49. — No.5. — P. 908. **ИФ WoS: 0.549.** *WoS, SCOPUS.*
- [31] Stepanyantz K. V. The β -function of $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric gauge theories regularized by higher covariant derivatives as an integral of double total derivatives. // JHEP. — 2019. — Vol. 1910. — P. 011. **ИФ WoS: 5.833.** *WoS, SCOPUS.*
- [32] Степаньянц К. В. Регуляризация высшими ковариантными производными как средство для выявления структуры квантовых поправок в суперсимметричных калибровочных теориях. // Труды Математического института им. В.А.Стеклова РАН. — 2020. — Т. 309. — С. 304;
Stepanyantz K. The higher covariant derivative regularization as a tool for revealing the structure of quantum corrections in supersymmetric gauge theories. // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2020. — Vol. 309. — P. 284. **ИФ WoS: 0.700.** *WoS, SCOPUS, RSCI.*

- [33] Stepanyantz K. The NSVZ relation and the NSVZ scheme for $\mathcal{N} = 1$ non-Abelian supersymmetric theories, regularized by higher covariant derivatives. // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1416. — P. 012037. **SJR: 0.210. SCOPUS.**
- [34] Stepanyantz K. V. The NSVZ β -function for theories regularized by higher covariant derivatives: the all-loop sum of matter and ghost singularities. // JHEP. — 2020. — Vol. 2001. — P. 192. **ИФ WoS: 5.833. WoS, SCOPUS.**
- [35] Stepanyantz K. The all-loop perturbative derivation of the NSVZ β -function and the NSVZ scheme in the non-Abelian case by summing singular contributions. // Eur. Phys. J. C. — 2020. — Vol. 80. — P. 911. **ИФ WoS: 4.843. WoS, SCOPUS.**
- [36] Степаньянц К. В. NSVZ-соотношение и NSVZ-схема в $\mathcal{N} = 1$ неабелевых суперсимметричных калибровочных теориях. // ЭЧАЯ. — Т. 51. — N 4. — С. 687.
- Stepanyantz K. V. NSVZ Relation and NSVZ Scheme in $\mathcal{N} = 1$ Non-Abelian Supersymmetric Gauge Theories. // Phys. Part. Nucl. — 2020. — Vol. 51. — No.4. — P. 599. **ИФ WoS: 0.549. WoS, SCOPUS.**

Публикации автора

в материалах конференций и рабочих совещаний

- [37] Stepanyantz K. Application of higher derivative regularization to calculation of quantum corrections in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories. // Particle physics on the eve of LHC. / Ed. by Studenikin A. I. — *Proceedings, 13th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, August 23 – 29, 2007.* — World Scientific Pub. Singapore, 2009 — P. 390.
- [38] Stepanyantz K. V. Some interesting features of quantum correction in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories. // *Proceedings, 15th International Seminar on High Energy Physics (Quarks 2008): Sergiev Posad, Russia. May 23 – 29, 2008.* — INR, Moscow, 2008.
- [39] Stepanyantz K. V. New identity for Green functions in $\mathcal{N} = 1$ supersymmetric theories. // *Supersymmetries and Quantum Symmetries (SQS'07): Proceedings of the International Workshop (Dubna, July 30 – August 4, 2007)* — Dubna: JINR, 2008. — P. 298.

- [40] Stepanyantz K. Revealing Structure of Quantum Corrections in $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetric Theories Using the Schwinger–Dyson Equations. // Particle Physics at the Year of Astronomy /Ed. by Studenikin A. I. — *Proceedings of the Fourteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics*. — World Scientific Pub. Singapore, 2010 — P. 385.
- [41] Stepanyantz K. V. Quantum corrections in supersymmetric theories with the higher covariant derivative regularization. // *Proceedings, 16th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS 2010): Kolomna, Russia, June 6 — 12, 2010*. — INR Moscow, Russia, 2010.
- [42] Stepanyantz K. V. Derivation of the exact NSVZ β -function using effective diagrams. // TSPU Bulletin. — 2012. — Vol. 128. — No. 13. — P. 149. **ИФ ПИИЦ: 0.336. БАК РФ**.
- [43] Stepanyantz K. Derivation of the NSVZ beta-function in $\mathcal{N} = 1$ SQED regularized by higher derivatives by summation of diagrams. // Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov / Ed. by Studenikin A. I. — *Proceedings, 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Moscow, Russia, August 18 — 24, 2011*. — World Scientific Pub. Singapore, 2013. — P. 412.
- [44] Kataev A. L. and Stepanyantz K. V. Construction of the NSVZ scheme for Abelian supersymmetric theories, regularized by higher derivatives. // *Proceedings, 18th International Seminar on High Energy Physics (Quarks 2014): Suzdal, Russia, June 2 — 8, 2014*. — INR Moscow, Russia, 2015. — P. 95.
- [45] Stepanyantz K. V. NSVZ scheme and the regularization by higher derivatives. // TSPU Bulletin. — 2014. — Vol. 153. — No. 12. — P. 238. **ИФ ПИИЦ: 0.336. БАК РФ**.
- [46] Stepanyantz K. Some aspects of $\mathcal{N} = 1$ SYM renormalization. // *Proceedings, 19th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2016): Pushkin, Russia, May 29 — June 4, 2016*. EPJ Web Conf. — 2016. — Vol. 125. — P. 05014.
- [47] Stepanyantz K. Renormalization of the Coupling Constant and the HD Regularization in Supersymmetric Theories. // Particle physics at the Year of Light / Ed. by Studenikin A. I. — *Proceedings, 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Moscow, Russia, August 20 — 26, 2015*. — World Scientific Pub. Singapore, 2017. — P. 491.

- [48] Stepanyantz K. V. Structure of Quantum Corrections in $\mathcal{N} = 1$ Supersymmetric Gauge Theories. // *Proceedings to the 20th Workshop What Comes Beyond the Standard Models, Bled, Slovenia, July 9 – 20, 2017*. Bled Workshops Phys. — 2017. — Vol. 18. — No.2. — P. 197.
- [49] Stepanyantz K. Supersymmetry, quantum corrections, and the higher derivative regularization. // *Proceedings, 20th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2018): Valday, Russia, May 27 – June 2, 2018*. EPJ Web Conf. — 2018. — Vol. 191. — P. 06002.
- [50] Stepanyantz K. NSVZ with higher derivatives. // Particle Physics at the Year of 150th Anniversary of the Mendeleev’s Periodic Table of Chemical Elements, / Ed. by Studenikin A. I. — *Proceedings, 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Moscow, Russia, August 22 – 28, 2019*. — World Scientific Pub. Singapore, 2021. — P. 536.

Цитируемая литература

- [51] Novikov V. A., Shifman M. A., Vainshtein A. I. and Zakharov V. I. Exact Gell-Mann-Low Function of Supersymmetric Yang-Mills Theories from Instanton Calculus. // *Nucl. Phys. B.* — 1983. — Vol. 229. — P. 381.
- [52] Jones D. R. T. More on the Axial Anomaly in Supersymmetric Yang-Mills Theory. // *Phys. Lett. B.* — 1983. — Vol. 123. — P. 45.
- [53] Novikov V. A., Shifman M. A., Vainshtein A. I. and Zakharov V. I. Beta Function in Supersymmetric Gauge Theories: Instantons Versus Traditional Approach. // *Phys. Lett. B.* — 1986. — Vol. 166. — P. 329;
Вайнштейн А. И., Захаров В. И., Новиков В. А. и Шифман М. А. Ядерная Физика. — 1986. — Т. 43. — С. 459.
- [54] Shifman M. A. and Vainshtein A. I. Solution of the Anomaly Puzzle in SUSY Gauge Theories and the Wilson Operator Expansion. // *Nucl. Phys. B.* — 1986. — Vol. 277. — P. 456;
Solution of the problem of anomalies in supersymmetric gauge theories, and the operator expansion. // *ЖЭТФ.* — 1986. — Т. 91. — С. 723;
J. Exp. Theor. Phys. — 1986. — Vol. 64. — No. 3. — P. 428.

- [55] Пескин М. и Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. // Пер. с англ. — Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. — 784 с.;
- Peskin M. E. and Schroeder D. V. An Introduction to quantum field theory. // CRC Press, 2019. — 866 p.
- [56] Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. // М.: Наука, 1988. — 272 с.;
- Faddeev L. D. and Slavnov A. A. Gauge Fields. Introduction To Quantum Theory. // Front. Phys. — 1980. — Vol. 50. — P. 1. [Front. Phys. — 1991. — Vol. 83. — P. 1].
- [57] Sohnius M. F. Introducing Supersymmetry. // Phys. Rept. — 1985. — Vol. 128. — P. 39.
- [58] Fayet P. and Ferrara S. Supersymmetry. // Phys. Rept. — 1977. — Vol. 32. — 249.
- [59] Уэст П. Введение в суперсимметрию и супергравитацию. // Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 328 с.;
- West P. C. Introduction to supersymmetry and supergravity. // Singapore: World Scientific, 1990 — 425 p.
- [60] Весс Ю. и Беггер Дж. Суперсимметрия и супергравитация. // Пер. с англ. — ИО НФМИ, Новокузнецк, 1998 — 178 с.;
- Wess. J. and Bagger J. Supersymmetry and supergravity. // Princeton, Princeton University Press, 1992. — 272 p.
- [61] Gates S. J., Grisaru M. T., Rocek M. and Siegel W. Superspace Or One Thousand and One Lessons in Supersymmetry. // Front. Phys. — 1983. — Vol. 58. — P. 1.
- [62] Buchbinder I. L. and Kuzenko S. M. Ideas and methods of supersymmetry and supergravity: Or a walk through superspace. // Bristol, UK: IOP, 1998. — 656 p.
- [63] Galperin A., Ivanov E., Kalitzin S., Ogievetsky V. and Sokatchev E. Unconstrained $\mathcal{N} = 2$ matter, Yang-Mills and supergravity theories in harmonic superspace. // Class. Quant. Grav. — 1984. — Vol. 1. — P. 469, Erratum: [Class. Quant. Grav. — 1985. — Vol. 2. — P. 127].

- [64] Бухбиндер Е. И., Оврут Б. А., Бухбиндер И. Л., Иванов Е. А. и Кузенко С. М. Низкоэнергетическое эффективное действие в $\mathcal{N} = 2$ суперсимметричных теориях поля. // ЭЧАЯ. — 2001. — Т. 32. — С. 1222;
 Buchbinder E. I., Ovrut B. A., Buchbinder I. L., Ivanov E. A. and Kuzenko S. M. Low-energy effective action in $N = 2$ supersymmetric field theories. // Phys. Part. Nucl. — 2001. — Vol. 32. — P. 641.
- [65] Galperin A. S., Ivanov E. A., Ogievetsky V. I. and Sokatchev E. S. Harmonic superspace. // Cambridge, UK: University Press, 2001. — 306 p.
- [66] Slavnov A. A. Invariant regularization of nonlinear chiral theories. // Nucl. Phys. B. — 1971. — Vol. 31. — P. 301.
- [67] Славнов А. А. Инвариантная регуляризация калибровочных теорий. // ТМФ. — 1972. — Т. 13. — С. 174;
 Slavnov A. A. Invariant regularization of gauge theories. // Theor. Math. Phys. — 1972. — Vol. 13. — P. 1064.
- [68] Славнов А. А. Регуляризация Паули–Вилларса для неабелевых калибровочных групп. // ТМФ. — 1977. — Т. 33. — С. 210;
 Slavnov A. A. The Pauli-Villars Regularization for Nonabelian Gauge Theories. // Theor. Math. Phys. — 1977. — Vol. 33. — P. 977.
- [69] Кривошеков В. К. Инвариантная регуляризация для суперсимметричных калибровочных теорий. // ТМФ. — 1978. — Т. 36. — С. 291;
 Krivoshchekov V. K. Invariant Regularizations for Supersymmetric Gauge Theories. // Theor. Math. Phys. — 1978. — Vol. 36. — P. 745.
- [70] West P. C. Higher Derivative Regulation Of Supersymmetric Theories. // Nucl. Phys. B. — 1986. — Vol. 268. — P. 113.
- [71] Taylor J. C. Ward Identities and Charge Renormalization of the Yang-Mills Field. // Nucl. Phys. B. — 1971. — Vol. 33. — P. 436.
- [72] Славнов А. А. Тождества Уорда в калибровочных теориях. // ТМФ. — 1972. — Т. 10. — С. 153;
 Slavnov A. A. Ward Identities in Gauge Theories. // Theor. Math. Phys. — 1972. — Vol. 10. — P. 99.

- [73] Martin C. P. and Ruiz Ruiz F. Higher covariant derivative Pauli-Villars regularization does not lead to a consistent QCD. // Nucl. Phys. B. — 1995. — Vol. 436. — P. 545.
- [74] Asorey M. and Falceto F. On the consistency of the regularization of gauge theories by high covariant derivatives. // Phys. Rev. D. — 1996. — Vol. 54. — P. 5290.
- [75] Bakeyev T. D. and Slavnov A. A. Higher covariant derivative regularization revisited. // Mod. Phys. Lett. A. — 1996. — Vol. 11. — P. 1539.
- [76] Gomes M., Nascimento J. R., Petrov A. Y. and da Silva A. J. On the effective potential in higher-derivative superfield theories. // Phys. Lett. B. — 2009. — Vol. 682. — P. 229.
- [77] Gama F. S., Gomes M., Nascimento J. R., Petrov A. Y. and da Silva A. J. On the higher-derivative supersymmetric gauge theory. // Phys. Rev. D. — 2011. — Vol. 84. — P. 045001.
- [78] Gama F. S., Nascimento J. R. and Petrov A. Y. Effective superpotential in the generic higher-derivative three-dimensional scalar superfield theory. // Phys. Rev. D. — 2013. — Vol. 88. — P. 065029.
- [79] Gama F. S., Gomes M., Nascimento J. R., Petrov A. Y. and da Silva A. J. On the one-loop effective potential in the higher-derivative four-dimensional chiral superfield theory with a nonconventional kinetic term. // Phys. Lett. B. — 2014. — Vol. 733. — P. 247.
- [80] Bezerra de Mello E. R., Gama F. S., Nascimento J. R. and Petrov A. Y. One-loop effective potential in nonlocal supersymmetric theories. // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 95. — P. 025028.
- [81] Gama F. S., Nascimento J. R., Petrov A. Y. and Porfirio P. J. One-loop effective potential in the nonlocal supersymmetric gauge theory. // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 96. — P. 105009.
- [82] Gama F. S., Nascimento J. R. and Petrov A. Y. Supersymmetric gauge theories with higher derivatives and nonlocal terms in the matter sector. // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 101. — P. 105018.
- [83] Smilga A. V. and Vainshtein A. Background field calculations and nonrenormalization theorems in 4d supersymmetric gauge theories and their low-dimensional descendants. // Nucl. Phys. B. — 2005. — Vol. 704. — P. 445.

- [84] Dudal D., Verschelde H. and Sorella S. P. The Anomalous dimension of the composite operator A^{**2} in the Landau gauge. // Phys. Lett. B. — 2003. — Vol. 555. — P. 126.
- [85] Capri M. A. L., Granado D. R., Guimaraes M. S., Justo I. F., Mihaila L., Sorella S. P. and Vercauteren D. Renormalization aspects of $\mathcal{N} = 1$ Super Yang-Mills theory in the Wess-Zumino gauge. // Eur. Phys. J. C. — 2014. — Vol. 74. — P. 2844.
- [86] Shifman M. A. and Vainshtein A. I. Instantons versus supersymmetry: Fifteen years later. // In Shifman, M.A.: ITEP lectures on particle physics and field theory, vol. 2, 1999, — P. 485.
- [87] Arkani-Hamed N. and Murayama H. Holomorphy, rescaling anomalies and exact beta functions in supersymmetric gauge theories. // JHEP. — 2000. — Vol. 0006. — P. 030.
- [88] Kraus E., Rupp C. and Sibold K. Supersymmetric Yang-Mills theories with local coupling: The Supersymmetric gauge. // Nucl. Phys. B. — 2003. — Vol. 661. — P. 83.
- [89] Jack I., Jones D. R. T. and North C. G. $\mathcal{N} = 1$ supersymmetry and the three loop gauge Beta function. // Phys. Lett. B. — 1996. — Vol. 386. — P. 138.
- [90] Jack I., Jones D. R. T. and North C. G. Scheme dependence and the NSVZ Beta function. // Nucl. Phys. B. — 1997. — Vol. 486. — P. 479.
- [91] Jack I., Jones D. R. T. and Pickering A. The Connection between DRED and NSVZ. // Phys. Lett. B. — 1998. — Vol. 435. — P. 61.
- [92] Harlander R. V., Jones D. R. T., Kant P., Mihaila L. and Steinhauser M. Four-loop beta function and mass anomalous dimension in dimensional reduction. // JHEP. — 2006. — Vol. 0612. — P. 024.
- [93] Mihaila L. Precision Calculations in Supersymmetric Theories. // Adv. High Energy Phys. — 2013. — Vol. 2013. — P. 607807.
- [94] Krivoshchekov V. K. Invariant Regularization For $\mathcal{N} = 2$ Superfield Perturbation Theory. // Phys. Lett. B. — 1984. — Vol. 149. — P. 128.