

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.04,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20 октября 2025 года № 50

О присуждении Галахову Дмитрию Максимовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Дефекты в суперсимметричных теориях поля и теории струн» по специальности 1.3.3. Теоретическая физика принята к защите 30 июня 2025 года (протокол заседания № 48) диссертационным советом 24.1.262.04, созданным 18 октября 2023 года приказом № 1975/нк на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), подведомственного Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Галахов Дмитрий Максимович, 05 февраля 1988 года рождения, работает старшим научным сотрудником в ФГБУН Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (ИППИ РАН).

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Дуальности в квантовой теории поля» защитил в 2014 году в диссертационном совете Д 201.002.01, созданном при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики».

Диссертация выполнена в Лаборатории №16 «Методы математической физики и теории информации» ФГБУН Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН.

Официальные оппоненты:

1. Арёфьева Ирина Ярославна, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник отдела теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук, г.Москва;

2. Кривонос Сергей Олегович, доктор физико-математических наук, начальник отдела современной математической физики Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна;

3. Решетихин Николай Юрьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник факультета математики и компьютерных наук Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г.Санкт-Петербург

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), город Москва, в своем положительном отзыве, составленном и подписанном доктором физико-математических наук, профессором кафедры теоретической физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Дмитрием Владимировичем Гальцовым, также подписанном доктором физико-математических наук, профессором, и. о. декана физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Белокуровым Владимиром Викторовичем и

утвержденном доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом Российской академии наук, проректором МГУ Федяниным Андреем Анатольевичем, указала, что результаты диссертации составляют крупное научное достижение в теоретической физике, предложенный подход позволяет рассматривать существенно непертурбативные эффекты в квантовых теориях поля и теории струн в присутствии суперсимметрии и представляет большой интерес в контексте исследований динамики эффективных моделей сильно взаимодействующих и скоррелированных систем, задачах описания фазовых переходов, а также разработке математического аппарата описания новых обобщенных категориальных симметрий в таких системах.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым действующим Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а автор диссертации Галахов Дмитрий Максимович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах. Соискателем были получены оригинальные результаты, позволившие дать непертурбативное описание основных состояний в суперсимметричных моделях с дефектами типа доменных стенок, а также описание алгебры рассеяния основных состояний в эффективной теории для D-бран в теории струн типа IIA на торических многообразиях Калаби-Яу. Помимо прочего, полученные результаты позволяют производить непертурбативные вычисления квантовых чисел основных состояний в струнных обобщениях трехмерной теории Черна-

Саймонса, что позволяет описывать расширенные инварианты трехмерных многообразий и зацеплений в них.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Galakhov D.**, Mironov A., Morozov A. $SU(2)/SL(2)$ knot invariants and Kontsevich-Soibelman monodromies // Theor. Math. Phys. — 2016. — Т. 187, № 2. — С. 678—694. — arXiv: 1510.05366 [hep-th].

2. **Galakhov D.** Why Is Landau-Ginzburg Link Cohomology Equivalent To Khovanov Homology? // JHEP. — 2019. — Т. 05. — С. 085. — arXiv: 1702.07086 [hep-th].

3. **Galakhov D.** BPS Hall Algebra of Scattering Hall States // Nucl. Phys. B. — 2019. — Т. 946. — С. 114693. — arXiv: 1812.05801 [hep-th].

4. **Galakhov D.**, Yamazaki M. Quiver Yangian and Supersymmetric Quantum Mechanics // Commun. Math. Phys. — 2022. — Т. 396, № 2. — С. 713—785. — arXiv: 2008.07006 [hep-th].

5. **Galakhov D.** On supersymmetric interface defects, brane parallel transport, order-disorder transition and homological mirror symmetry // JHEP. — 2020. — Т. 22. — С. 076. — arXiv: 2105.07602 [hep-th].

6. **Galakhov D.**, Li W., Yamazaki M. Shifted quiver Yangians and representations from BPS crystals // JHEP. — 2021. — Т. 08. — С. 146. — arXiv: 2106.01230 [hep-th].

7. **Galakhov D.**, Li W., Yamazaki M. Toroidal and elliptic quiver BPS algebras and beyond // JHEP. — 2022. — Т. 02. — С. 024. — arXiv: 2108.10286 [hep-th].

8. **Galakhov D.**, Li W., Yamazaki M. Gauge/Bethe correspondence from quiver BPS algebras // JHEP. — 2022. — Т. 11. — С. 119. — arXiv: 2206.13340 [hep-th].

9. **Galakhov D.** BPS states meet generalized cohomology // JHEP. — 2023. — Т. 07. — С. 059. — arXiv: 2303.05538 [hep-th].

10. **Galakhov D.**, Morozov A., Tselousov N. Super-Schur polynomials for Affine Super Yangian $Y(\mathfrak{gl}(1|1))$ // JHEP. — 2023. — Т. 08. — С. 049. — arXiv: 2307.03150 [hep-th].

11. **Galakhov D.**, Li W. Charging solid partitions // JHEP. — 2024. — Т. 01. — С. 043. — arXiv: 2311.02751 [hep-th].

12. **Galakhov D.**, Morozov A., Tselousov N. Towards the theory of Yangians // Phys. Rev. D. — 2024. — Март. — Т. 109, вып. 6. — С. 066001. — arXiv: 2311.00760 [hep-th].

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой научной квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации, полученными ими научными результатами мирового уровня и многолетним опытом проведения научных исследований по сходной тематике.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Вычислены волновые функции в двумерных моделях с $N=(2,2)$ суперсимметрией в пределе низких энергий и в присутствии дефектов типа «интерфейс», интерполирующих между различными точками в пространстве параметров теории. Показано, что в данных семействах моделей классификация калибровочно неэквивалентных волновых функций состояний, сохраняющих часть суперсимметрии теории (так называемых состояний Богомольного-Прасада-Зоммерфельда (БПЗ)), отвечает математической классификации в терминах объектов категорий. Показано, что Т-дуальность, спущенная на уровень волновых функций, приводит к гомологической зеркальной симметрии, связывающей категории Фукаи-Сайдела и (производные) категории когерентных пучков.

2. Предложена новая модель, где операторы дефектов отвечают элементам группы кос. Классификация волновых функций таких сплетающих дефектов отвечает классификации объектов в категориальной деформации Хованова-

Лауды-Рокира для алгебры Ли $sl(2)$. С помощью зеркальной симметрии, соответствующей также спектральной дуальности в данном контексте, установлена связь данной модели, реализованной, как сигма-модель на многообразии флагов (или колчанном многообразии в более общем случае), с иными высокоэнергетическими реализациями в терминах суперсимметричных моделей Ландау-Гинзбурга.

3. Предложена новая модель из семейства моделей Ландау-Гинзбурга, где операторы дефектов отвечают зацеплениям нитей в трехмерном пространстве. Показано, что из квантовых чисел состояний (фермионного числа и центрального заряда супералгебры) в данной модели в присутствии дефекта зацепления может быть восстановлен категориальный инвариант зацепления, предложенный М.Ховановым и обобщающий значение вакуумного среднего петель Вильсона в трехмерной теории Черна-Саймонса для калибровочной группы $SU(2)$. Также в работе предложены методы обобщения вычислений на случаи калибровочной группы $SU(n)$, n больше или равно 3.

4. Описаны молекуло-подобные низкоэнергетические состояния в эффективной модели D-бран в теории струн типа IIA, скомпактифицированной на многообразие Калаби-Яу. Непертурбативно вычислены элементы матрицы неупругого рассеяния таких состояний при нулевом импульсе. Показано, что эти элементы находятся во взаимно-однозначном соответствии со структурными константами кохомологической алгебры Холла, введенной М.Концевичем и Я.Сойбельманом для умножения эквивариантных кохомологий на многообразиях Калаби-Яу.

5. Предложен новый способ работы с сингулярными пространствами модулей представлений колчанов. Для этого в эффективных моделях D-бран на торических многообразиях Калаби-Яу, классифицируемых колчанами, вычислены квазиклассические волновые функции основных суперсимметричных состояний до второго порядка в теории возмущений в дуальной «кристаллической» фазе. Показано, что данные состояния подвержены действию операторов дефектов, добавляющих и убавляющих

элементарные D-браны. Вместе эта конструкция состояний и операторов, действующих на них, соответствует «кристаллическим» представлениям алгебр колчанных янгианов, которые обобщают обычные алгебры аффинных янгианов, построенных по аффинным диаграммам Дынкина для супер-алгебр Ли. Описана связь кохомологических алгебр Холла с алгебрами колчанных янгианов в терминах дуальности Кулона-Хиггса для физической модели D-бран.

6. В работе рассмотрены компактификации эффективных теорий D-бран на торических многообразиях Калаби-Яу (четырёхмерные $N=1$ суперсимметричные теории Янга-Миллса) на различные дополнительные пространства. Доказано, что таким образом можно получить обобщения колчанных янгианов, как алгебр рассеяния состояний БПЗ, на торические и эллиптические алгебры, отвечающие обобщению умножения Концевича-Сойбельмана на элементы K-теории и эллиптических кохомологий пространств модулей представлений колчанов. Предложены новые аргументы в пользу гипотезы, что компактификация на римановы поверхности старшего рода отвечает обобщенным кохомологическим теориям Эйленберга-Стиррода.

7. Вычислены суперсимметрические индексы дефектных операторов типа «интерфейс» в эффективных теориях D-бран на торических многообразиях Калаби-Яу. Соответствующие индексы отвечают матричным элементам R-матриц для алгебр колчанных янгианов с дополнительной структурой биалгебры Хопфа и удовлетворяют уравнениям Янга-Бакстера. Показано, что требования квантово-полевой согласованности соответствующей теории поля приводит к сужению разрешенного класса колчанных моделей на некиральные колчаны.

8. Показано, что методы работы с трёхмерными многообразиями Калаби-Яу не могут быть легко обобщены на четырёхмерные многообразия, а требуют нового развития. Предложено новое обобщенное определение зарядовой функции -- рациональной функции, чья полюсная структура однозначно определяется волновой функцией состояния БПЗ в «кристаллической» фазе. Показано, что в

отличие от трехмерного случая в четырехмерном случае зарядовая функция состоит из вкладов как отдельных узлов «кристалла», так и целых узловых кластеров.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. В работе впервые:

детально описаны БПЗ состояния в двумерных моделях с $N=(2,2)$ суперсимметрией (модели Ландау-Гинзбурга и линейные калибровочные сигма-модели) в присутствии дефектов типа «интерфейс», вычислены их квантовые числа: центральный заряд супералгебры и фермионное число

показано соответствие квантовых чисел БПЗ состояний в модели компактификации шестимерной теории, содержащей дефекты с носителем на зацеплении, категорифицированным инвариантам Хованова-Рожанского для соответствующих зацеплений

описано соответствие кохомологических алгебр Холла колчаных многообразий и алгебр рассеяния состояний БПЗ в соответствующих колчаных теориях

описаны алгебры колчаных аффинных янгианов

описаны условия соответствия колчаных аффинных янгианов и интегрируемых систем

предложено аналитическое выражение для зарядовой функции кристалло-подобных состояний БПЗ в модели компактификации D-бран на четырехмерные торические многообразия Калаби-Яу.

Значимость исследования обусловлена той большой ролью, которую теории с топологическими особенностями играют в современной теории поля. Эти исследования позволяют продвинуться в программе категорификации, построении новых инвариантов многообразий, а также в современной программе геометризации непертурбативных физических явлений.

Полученные результаты позволяют описывать сложные физические явления в сильно скореллированных системах в терминах современных

математических теорий и методологий, что, безусловно, способствует быстрому прогрессу в различных областях современной теоретической и математической физики.

Результаты работы могут быть использованы в научных и образовательных организациях, таких как Московский государственный университет им. Ломоносова, Московский физико-технический институт, Объединенный институт ядерных исследований, НИЦ «Курчатовский институт» и других российских и международных организациях, ведущих исследования, связанные с теоретической физикой высоких энергий и смежных областях теоретической и математической физики.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что построенная соискателем теория основана на известных фундаментальных физических законах.

Достоверность результатов не вызывает сомнений, так как все исследования базируются на принципах, которые можно назвать фундаментальными, и при дальнейшем развитии теории использовались строгие аналитические методы и физически обоснованные приближения. Показано согласие полученных результатов и предсказаний с другими современными теоретическими результатами, полученными другими группами исследователей иными методами, а также сводимость результатов в частных случаях к ранее установленным теоретическим результатам. Результаты, вошедшие в диссертацию, обсуждались на многих конференциях и семинарах.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном проведении научных исследований, построении теории исследуемых процессов и выполнении численных и аналитических расчетов, получении результатов и их апробации на научных конференциях и семинарах. Результаты из работ, опубликованных с соавторами, отражают личный вклад автора в эти работы.

В ходе защиты соискатель Галахов Д.М. полно и аргументированно ответил на заданные ему вопросы, а также на замечания ведущей организации и официальных оппонентов.

На заседании 20 октября 2025 года диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в теоретической физике, присудить Галахову Дмитрию Максимовичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **10** человек, из них **9** докторов наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **10** , против **0**, недействительных бюллетеней **0**.

Председатель диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент Российской академии наук

Арсеев Петр Иварович

И.о. ученого секретаря диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Губернов Владимир Владимирович

20 октября 2025 г.

Физический ИНСТИТУТ



имени

П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

П Р И К А З

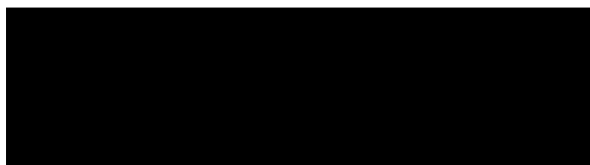
Дата 08.10.25 № 2025-10.08/1
Москва

На время проведения заседаний и подготовки документов по защите диссертации Чернышова Д.О. на соискание степени доктора физико-математических наук, поданной в диссертационный совет 24.1.262.04 приказываю:

- 1) На период с 08 октября 2025 года по 15 ноября 2025 года временно освободить от обязанностей ученого секретаря совета 24.1.262.04 Чернышова Дмитрия Олеговича
- 2) На тот же период возложить обязанности ученого секретаря совета 24.1.262.04 на члена совета Губернова Владимира Владимировича

Основание: Служебная записка председателя диссертационного совета 24.1.262.04 Арсеева П.И. от 06.10.2025

Директор ФИАН



Н.Н. Колачевский