

УТВЕРЖДАЮ



и работе, к.ф.-м.н.

Баган Виталий
Анатольевич

_____ 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Диссертация «Зеркальная симметрия многообразий Калаби-Яу и $N=2$ суперконформные двумерные теории поля» выполнена в Физтех-кластере академической и научной карьеры (Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с 2021 г. по настоящее время соискатель **Еремин Борис Андреевич** работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) в должности младшего научного сотрудника.

В 2021 г. Еремин Б.А. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. С 2021 г. по настоящее время обучается в очной аспирантуре МФТИ по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 14 мая 2025 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН Белавин Александр Абрамович. Основное место работы – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт

теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, главный научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Зеркальная симметрия многообразий Калаби-Яу и $N=2$ суперконформные двумерные теории поля» *принято следующее заключение.*

Тема диссертации является актуальной для изучения зеркальной симметрии трехмерных комплексных многообразий Калаби-Яу различных типов, которые возникают при компактификации в теории суперструн. Теория суперструн является наиболее перспективным кандидатом на объединение стандартной модели и квантовой гравитации. Получение явных потенциалов, которыми задаются зеркальные партнеры для данного многообразия Калаби-Яу необходимо для описания эффективной теории супергравитации. Исследования $N=2$ суперсимметричных конформных теорий поля с центральным зарядом равным 9 и нахождение полного пространства взаимно-локальных полей этих теорий позволяют находить спектр безмассовых состояний в соответствующей модели суперструны.

Цели и задачи диссертации:

1. Явное построение зеркального партнера к многообразию Калаби-Яу, заданного нулями полинома из списка Берглунда-Хубша, на основании двух конструкций: Батырева и Берглунда-Хубша-Кравица. Проверка эквивалентности этих конструкций.
2. Построение спектра взаимно-локальных полей в моделях $N=2$ суперконформной теории поля с центральным зарядом равным 9 и с произвольным модулярным инвариантом из списка ADE.
3. Исследование зеркальной симметрии конформных теорий поля.
4. Изучение дуальности Калаби-Яу/Калибровочная линейная сигма модель (КЛСМ). Проверка зеркальной версии гипотезы Джокерса.

Основные результаты диссертации:

1. Доказана эквивалентность конструкций зеркальной симметрии Батырева и Берглунда-Хубша-Кравица (БХК) для орбифолдов Калаби-Яу, задаваемых общим обратимым, квази-однородным полиномом во взвешенном проективном пространстве;
2. Получены уравнения, связывающие мономы-деформации полиномов, задающие зеркальную пару орбифолдов Калаби-Яу;
3. Построены $N=2$ суперконформные теории поля с центральным зарядом равным 9 (модели Гепнера). Левые и правые примарные поля в этих теориях связаны согласно ADE классификации. Рассмотрены орбифолды произведений минимальных моделей соответствующие многообразиям Калаби-Яу заданных нулями полиномов, классифицированных согласно ADE. Явно описан спектр полей, удовлетворяющих требованию взаимной локальности.
4. Описан алгоритм построения киральных-киральных и анти-киральных-киральных примарных полей в моделях Гепнера с произвольным модулярным инвариантом. Доказана зеркальная симметрия на уровне конформных теорий поля.

5. Проверена зеркальная версия гипотезы Джокерса о равенстве статистической суммы некоторой двумерной калибровочной линейной сигма-модели и экспоненты кэлерова потенциала на пространстве модулей Калаби-Яу. Рассмотрен специальный случай многообразия Калаби-Яу, не относящегося к классу Ферма полиномов.

Все *результаты диссертации получены лично соискателем или в соавторстве с коллегами* при научном руководстве доктора физико-математических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Белавина А.А.

Научная новизна работы заключается в проверке эквивалентности конструкций зеркальной симметрии Батырева и Берглунд-Хубша-Кравица, которая предполагалась математиками и формулировалась в качестве гипотез в различных статьях. Однако до диссертации соискателя не предъявлялось явное уравнение, определяющее зеркального двойника, построенного по конструкции Батырева. Также явно построено отображение, связывающее зеркальную гиперповерхность во взвешенном проективном пространстве, построенную по конструкции Берглунда-Хубша-Кравица, и гиперповерхность в торическом многообразии, построенную по конструкции Батырева. Ранее модели Гепнера с недиагональными модулярными инвариантами рассматривались только в некоторых частных случаях, без конкретного описания спектра. В диссертационном исследовании соискателя был явно описан алгоритм нахождения спектра взаимно-локальных полей в компактном секторе моделей Гепнера с произвольным модулярным инвариантом.

Практическая ценность

Диссертационная работа сосредоточена на теоретических исследованиях, связанных с задачами, возникающими в теории суперструн. Исследования носят теоретический характер, которые в дальнейшем могут помочь в построении теории квантовой гравитации, согласованной со Стандартной моделью. Результаты исследования могут быть полезны другим научным группам при исследовании зеркальной симметрии и интегрируемых моделей конформной теории поля.

Достоверность (высокая степень точности измерений и объективности оценок) результатов исследования обеспечена:

- строгостью и корректностью математических доказательств и рассуждений;
- положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на международных и российских научных конференциях, и семинарах. Достоверность также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена:

- корректностью применения, апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата;
- подробными расчетами полученных выводов и закономерностей;
- подтверждением результатов экспертными оценками специалистов;

- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;
- публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Материалы диссертации опубликованы соискателем достаточно полно в следующих работах:

- 1) A. Belavin and B. Eremin. On the equivalence of Batyrev and BHK mirror symmetry constructions // Nuclear Physics B, 2020, 961, 115271;
- 2) A. Belavin and B. Eremin. Mirror pairs of Quintic orbifolds // JETP Letters, 2020, 112, 6, 370–375;
- 3) A. A. Belavin and B. A. Eremin. Multiple mirrors and the JKLMR conjecture // Theoretical and mathematical physics, 2022, 213, 1, 1441–1452;
- 4) A. Belavin and B. Eremin. Partition Functions of $N = (2, 2)$ Supersymmetric Sigma Models and Special Geometry on the Moduli Spaces of Calabi-Yau Manifolds // Theoretical and mathematical physics, 2019, 201, 2, 1606-1613;
- 5) A. Belavin, B. Eremin and S. Parkhomenko. Review on Special Geometry and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Manifolds (Brief Review) // JETP Letters, 2023, 118, 10, 701-709.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1-2] – Получен явный вид зеркального потенциала на основании конструкций зеркальной симметрии Батырева и Берглунда-Хубша-Кравица. Построено зеркальное отображение. Подход продемонстрирован на примере зеркальных пар орбифолдов квинтики. [3-4] вычислена статистическая сумма двумерной калибровочной линейной сигма-модели на сфере. Проверена зеркальная версия гипотезы Джокерса и соавторов о равенстве статистической суммы и экспоненты кэлера потенциала на пространстве модулей комплексных структур для широкого класса многообразий Калаби-Яу. [5] написана глава про зеркальную симметрию и про гипотезу Джокерса и соавторов.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Конференция «Интегрируемые системы и квантовая теория» (Санкт-Петербург, Россия, 2024).
2. Всероссийская 65-я научная конференция МФТИ (Долгопрудный, Россия, 2023).
3. Всероссийская 63-я научная конференция МФТИ (Долгопрудный, Россия, 2020).
4. Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (Москва, Россия, 2020).
5. Конференция “Interaction between Algebraic Geometry and QFT” (Долгопрудный, Россия, 2019).
6. Семинар Лаборатории 5 ИППИ РАН (Москва, Россия, 2024-2025).

Семинар Центра им. И.М. Кричевера, Сколтех (Москва, Россия, 2019-2024).

8. Доклад на ученом совете ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН (Черноголовка, Россия, 2020).

9. Семинар лаборатории алгебраической геометрии и гомологической алгебры МФТИ (Долгопрудный, Россия, 2020).

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности

1.3.3. Теоретическая физика, в частности, пунктам:

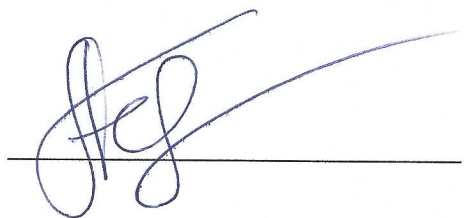
- п. 1. Классическая и квантовая теория поля. Теория фундаментальных взаимодействий. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Объединенные модели фундаментальных взаимодействий. Разработка математических методов теории поля. Супергравитация и теория суперструн, модели с дополнительными измерениями, AdS/CFT соответствие, голографические модели.

- п. 4. Стандартная модель фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и ее расширения, в том числе обусловленные проблемой темной материи, физикой нейтрино и другими феноменологическими проблемами.

- п. 6. Общие вопросы квантовой теории: основы, теория измерений, теория рассеяния, теория открытых квантовых систем. Теория многих взаимодействующих частиц. Квантовая теория физических явлений в ядрах, атомах и молекулах.

Диссертация «Зеркальная симметрия многообразий Калаби-Яу и $N=2$ суперконформные двумерные теории поля» **Еремина Бориса Андреевича** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности ***1.3.3. Теоретическая физика***.

Заключение принято на заседании Физтех-кластера академической и научной карьеры (Квантовая теория поля, теория струн и математическая физика), МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 5 человек. Результаты голосования: «за» – 5 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол б/н от 20 июня 2025 года.



Белавин Александр Абрамович,
профессор, д-р физ.-мат. наук,
чл.-корр. РАН, руководитель
образовательной программы
«Квантовая теория поля,
теория струн и математическая
физика» МФТИ