

ВІДГУК

опонента на дисертаційну роботу
УВАРОВА Дмитра Вячеславовича
“Суперсиметричні моделі спінових частинок і струн
у викривлених та твісторних просторах”,
представленої на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика

Дисертаційна робота Дмитра Уварова “Суперсиметричні моделі спінових частинок і струн у викривлених та твісторних просторах” представляє результати досліджень в теорії релятивістських спінових частинок та струн в плоских та викривлених просторах різних розмірностей. Теорія струн як основа для об’єднання всі взаємодій, включно з гравітацією, в єдину квантову теорію зародилась у 1970-х роках і продовжує активно розвиватись до теперішнього часу. Тема дисертації Дмитра Уварова якраз присвячена різноманітним аспектам цієї теорії. Всі фізичні системи, що досліджувались в дисертації, розглядались, зокрема, з точки зору симетрії, яка часто мала геометричне походження та описувалась групами Лі, алгебрами та супералгебрами Лі. Значна частина дисертації присвячена вивченню суперструн у твісторному формалізмі Пенроуза та його узагальненнях.

Дисертаційна робота складається з великого вступного розділу, в якому зроблено історичний огляд розвитку теорії суперструн та описано тематику чотирьох основних розділів дисертації. Початок кожного з розділів містить свою коротку вступну частину, в якій більш детально описується контекст задач, що розв’язуються у відповідному розділі, а в кінці розділів перелічуються отримані у них результати. У заключному розділі “Висновки” підсумовуються основні результати, отримані у дисертації.

Основні розділи дисертаційної роботи мають наступну структуру.

Перший розділ дисертації присвячений вивченню теорії суперструн, які рухаються у 10-вимірному просторі $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$. Інтерес до теорії суперструн у цьому суперпросторі пов'язаний з тим, що для неї можна в явному вигляді побудувати дуальну калібрувальну теорію, яка є теорією Черна–Саймонса з полями матерії. Тому ця пара дуальних теорій є прикладом реалізації відомої гіпотези про AdS_4/CFT_3 дуальність, який допускає детальну перевірку в першу чергу завдяки їх широкій симетрії. Відомо, що динаміка струн описується за допомогою двовимірних сігма-моделей, в яких поля задають відображення світового листка у певний багатовимірний многовид. Сігма-модельний підхід допускає узагальнення для опису суперструн, в тому числі у викривлених суперпросторах. У цьому розділі, дисертантом було запропоноване нове представлення для лагранжіана $OSp(4|6)/(SO(1,3) \times U(3))$ сігма-моделі, яке включає форми Картана, що відповідають генераторам відповідної суперконформної алгебри Лі $osp(4|6)$. Також були знайдені загальні вирази в термінах форм Картана для густин ньотерових струмів, які відповідають інваріантності дії сігма-моделі відносно глобальної $D = 3, \mathcal{N} = 6$ суперконформної симетрії. Для елемента суперсиметричного фактор-простору $OSp(4|6)/(SO(1,3) \times U(3))$, параметризованого координатами Пуанкаре для простору AdS_4 та 24 грассмановими координатами, які є параметрами для генераторів $D = 3, \mathcal{N} = 6$ суперсиметрій Пуанкаре та спеціальних конформних суперсиметрій, були знайдені явні вирази для густин ньотерових струмів через ці координати та їх листові похідні. Крім цього, були обчислені варіації цих координат при інфінітезимальних перетвореннях $D = 3, \mathcal{N} = 6$ суперконформної симетрії.

У другому розділі дисертації вивчаються інтегровні системи, пов'язані з теорією суперструн в просторі $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$. Зокрема, знайдено явний вираз для лагранжіана та отримані рівняння $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$ суперструни у частковому калібруванні κ -симетрії, в якому, у секторі порушених, суперсиметрій залишається одна майоранівська спірна координата. Вона є параметром для генераторів порушених суперсиметрій Пуанкаре. Для рівнянь суперструни дисертантом було знайдено представлення нульової кривини, до якого входить листова 1-

форма, яка розширює зв'язність Лакса $OSp(4|6)/(SO(1,3) \times U(3))$ сігма-моделі лінійними та квадратичними членами за цією координатою та диференціалом. Також у цьому розділі було отримано рівняння безмасової суперчастинки в $OSp(4|6)/(SO(1,3) \times U(3))$ суперсиметричному фактор-просторі, представлено їх у формі рівняння Лакса і встановлено зв'язок між компонентами пари Лакса та зв'язністю Лакса сігма-моделі. Як узагальнення цих результатів здобувачем було доведено інтегровність рівнянь моделей безмасової суперчастинки та $D0$ -брани в просторі $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$.

Третій та четвертий розділи дисертації присвячені представленню в термінах (супер)твісторів лагранжіанів суперструн, початково сформульованих у просторі-часі. У третьому розділі розглядається модель суперструни у плоских просторах розмірностей $D = 4$, $D = 6$ та $D = 10$, а у четвертому розділі представлені результати дослідження теорії струн та частинок у викривлених (супер)просторах анти-де Сіттера. Також у четвертому розділі запропоноване нове формулювання безмасової спінової частинки у просторі анти-де Сіттера довільної розмірності та знайдено його узагальнення на випадок спінової струни з нульовим натягом.

Серед нових наукових результатів, отриманих дисертантом та представлених у третьому розділі є наступні: побудовано (супер)твісторні формулювання лагранжіанів бозонної струни та $\mathcal{N} = 1$ суперструни у розмірності $D = 4$ на основі формулювання І. Бандоса та О. Желтухіна; запропоновано редуковану супертвісторну модель та був розроблений її опис як гамільтонової системи з в'язями. Третій розділ також містить узагальнення отриманих результатів для $D = 4$ на розмірності $D = 6$ та $D = 10$. У заключному підрозділі цього розділу була розглянута відома модель твісторної струни Берковіца. Була доведена її інваріантність на класичному рівні відносно нескінченновимірної глобальної симетрії і показано, що на квантовому рівні з'являються аномалії, через які вона порушується до скінченновимірної $D = 4$ $\mathcal{N} = 4$ суперконформної симетрії.

В останньому, четвертому, розділі дисертації запропоноване нове твісторне формулювання моделі масивної частинки у просторі анти-де Сіттера, знайдено його зв'язок з раніше відомим твісторним формулюванням та проведено кванту-

вання за Діраком. Для моделі безмасової суперчастинки в $AdS_5 \times S^5$ суперпросторі було встановлено взаємозв'язок між суперпросторовим і супертвісторними формулюваннями та проведено квантування у одному із супертвісторних формулювань. Запропоноване нове формулювання безмасової спінової частинки у просторі анти-де Сіттера довільної розмірності та нову модель спінової струни з нульовим натягом у цьому просторі. Проведено аналіз їх симетрій на класичному та квантовому рівні.

До змісту дисертації є декілька питань та невеликих зауважень:

1. У другому розділі дисертаційної роботи зроблено новий крок у напрямку доведення інтегровності теорії суперструн в просторі $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$, а саме, відомий вираз для зв'язності Лакса $OSp(4|6)/(SO(1,3) \times U(3))$ сігма-моделі розширено внесками двох ступенів свободи сектора порушених суперсиметрій з 8 необхідних для доведення інтегровності рівнянь суперструни в $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$ суперпросторі. Чи можна узагальнити запропонований підхід для додавання, якщо не всіх 8 необхідних ступенів свободи, то хоча б ще деяких?
2. У другому розділі дисертації також доведено інтегровність системи динамічних рівнянь безмасової частинки $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$ суперпросторі. Чи можна використати цей результат для знаходження інтегралів руху для цієї частинки у явному вигляді?
3. Розділ 4 присвячений, зокрема, дослідженню супертвісторних формулювань для частинок у просторі $AdS_5 \times S^5$. Чи можна побудувати супертвісторне формулювання для суперструни у цьому просторі, а також у просторі $AdS_4 \times \mathbb{CP}^3$, який розглядався у перших двох розділах дисертації?
4. В дисертації, зокрема, вивчаються $D0$ -брани та безмасові частинки. Обидва об'єкти є нуль-вимірними (на відміну від струн та бран вищої розмірності). В чому полягає різниця між цими об'єктами?

Однак ці питання та зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи. Їх слід розглядати як можливі напрями для подальших

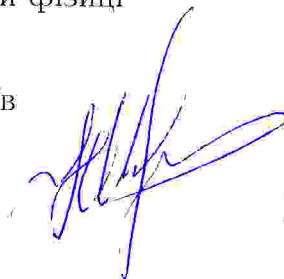
досліджень.

Усі результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи й виносяться на захист, одержані автором самостійно. Вони є новими і достовірними та пройшли достатню апробацію на наукових семінарах та конференціях. Основні результати роботи опубліковано у провідних наукових журналах, це 20 наукових статей (13 статей Q1, 6 статей Q2), які проіндексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus / Web of Science. Ці роботи є відомими серед науковців, що працюють у цих галузях, та добре цитуються. Все це дає достатні підстави для впевненості у відсутності академічного плагіату у дисертаційній роботі. Реферат вірно і повно відображає зміст дисертації.

Вважаю, що дисертація **“Суперсиметричні моделі спінових частинок і струн у викривлених та твісторних просторах”** містить нові важливі наукові результати в теорії суперструн та задовольняє всім вимогам до докторських дисертацій пп. 7–9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, а її автор **Дмитро Вячеславович Уваров** заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика.

Опонент

завідувач лабораторії теорії інтегровних систем
відділу математичних методів в теоретичній фізиці
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України, м. Київ
доктор фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник



Микола ІОРГОВ



Підпис *Миколи Іоргова*
засвідчую:
Зав. відділу кадрів *[Signature]*
20. вересня 2024