

ВІДГУК

опонента на дисертаційну роботу

Уварова Дмитра Вячеславовича

«Суперсиметричні моделі спінових частинок

і струн у викривлених та твісторних просторах»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність теми дисертації визначається тим, що проблема побудови перенормовної теорії гравітації, сумісної зі Стандартною моделлю елементарних частинок, є однією з найскладніших проблем сучасної теоретичної фізики. Концептуальну основу для її розв'язання пропонують теорії суперсиметрії та струн. Застосування голографічного принципу в теорії струн створює передумови для досягнення певного прогресу у побудові такої об'єднаної теорії. Ефективність такого підходу найбільше проявилась при побудові квантової теорії гравітації у суперпросторах анти-де Сіттера завдяки їх високій симетрії та можливості опису голографічних теорій за допомогою відомих суперконформних калібрувальних теорій Янга-Міллса та Черна-Саймонса. У цьому зв'язку роботи Д.В. Уварова присвячені дослідженню динаміки і симетрій суперструн у цих просторах є актуальними і представляють значний інтерес. Застосування теорії твісторів у дисертації при побудові моделей суперчастинок і суперструн, в тому числі у просторах анти-де Сіттера, представляє особливий інтерес. Це пояснюється тим, що, як добре відомо, теорія твісторів пропонує альтернативний традиційному просторово-часовому підхід до формулювання теорій Янга-Міллса та гравітації. У твісторній програмі центральну роль відіграє конформна симетрія простору твісторів і його опис в термінах фундаментальних спінових координат, з яких будуються стандартні просторово-часові координати. Тому застосування твісторних методів у процесі розробки голографічного формулювання теорії струн відкриває нові можливості при побудові об'єднаної квантової теорії поля з включенням гравітації.

Актуальність дисертаційної роботи Д.В. Уварова також підтверджується тим, що її результати були здобуті при проведенні досліджень в рамках відомчих тем відділу «Статистичної фізики та квантової теорії поля» Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ НАН України у 2006-2021 роках, в яких дисертант був відповідальним виконавцем.

Структура дисертації відповідає діючим вимогам, включає всі необхідні елементи і дозволяє розкрити її тему – дослідження симетрій і динаміки суперсиметричних моделей релятивістських частинок і струн у викривлених та твісторних просторах.

У вступі наведено ґрунтовний огляд літератури за темою дисертації та критично проаналізовано результати попередніх досліджень. Також сформульовано мету та завдання, які вирішено в дисертації, пояснено новизну здобутих результатів та їх практичне значення, наведено дані про опублікувані статті та апробацію отриманих в них результатів.

У першому розділі основної частини вивчаються лагранжіве та гамільтонове формулювання моделі суперструни в $AdS_4 \times CP^3$ суперпросторі. Цей суперпростір належить до сімейства високо симетричних суперпросторів анти-де Сіттера, в яких активно досліджується можливість голографічного формулювання теорії струн на основі гіпотези AdS/CFT відповідності. Характерною рисою підходу дисертанта до розгляду зазначеної моделі є суперконформна реалізація групи симетрії $AdS_4 \times CP^3$ суперпростору, що має важливе значення з точки зору застосування здобутих результатів для перевірки цієї гіпотези. Автором здобуто формулювання лагранжіана суперструни у частковому калібруванні локальної k -симетрії, яке включає форми Картана у суперконформному базисі, та досліджено реалізацію відповідної суперконформної симетрії як глобальної симетрії дії суперструни. Окрім того введено нові калібрувальні умови світлового конуса та здобуто вирази для лагранжіана і гамільтоніана суперструни у запропонованому калібруванні.

У другому розділі дисертації Д.В.Уваровим досліджується надзвичайно складна та досі нерозв'язана проблема можливої класичної інтегровності рівнянь суперструни в $AdS_4 \times CP^3$ суперпросторі. Дисертантом запропоновано низку нових калібрувальних умов, які частково закріплюють свободу, пов'язану з k -симетрією. В одному із введених калібрувань знайдено представлення рівнянь суперструни у вигляді умови нульової кривизни для листового калібрувального поля, що є характерною рисою двовимірних інтегровних теоретикопольових моделей. У цьому ж розділі доведено класичну інтегровність рівнянь безмасової суперчастинки, які відповідають границі нульового натягу суперструни. Здобуті результати дають вагомий внесок у розв'язання проблеми встановлення інтегровної структури $AdS_4 \times CP^3$ суперструни.

Третій розділ присвячений формулюванню моделей суперструн з ненульовим натягом у плоских суперпросторах різних розмірностей в термінах супертвісторів. Для моделі струни Полякова у 4-вимірному просторі Мінковського дисертантом здобуто формулювання лагранжіана, яке включає відомі твістори Пенроуза, а для суперструни у 4-вимірному суперпросторі отримано формулювання, до якого входять суперсиметричні узагальнення твісторів Пенроуза. Це супертвісторне формулювання було розширено на випадок моделей суперструн у 6- та 10-вимірних суперпросторах. Автором знайдено необхідні умови для встановлення відповідності між компонентами супертвісторів та координатами суперпросторів вищих розмірностей, які узагальнюють умови на супертвістори для 4-вимірного суперпростору. Також проведено аналіз супертвісторного формулювання суперструни у 10-вимірному суперпросторі як гамільтонової динамічної системи з в'язями, що є важливим для дослідження її квантової динаміки та симетрій.

У заключному четвертому розділі основної частини дисертації розглядаються два підходи до формулювань моделей точкових та протяжних об'єктів з нульовим натягом у (супер)просторах анти-де Сіттера. А саме, (супер)твісторний підхід та відомий підхід Дірака, який пропонує розширення простору-часу додатковими вимірами. Спільною рисою цих підходів є лінійна реалізація групи симетрії (супер)простору анти-де Сіттера. Д.В. Уваровим

запропоновано нове твісторне формулювання моделі релятивістської частинки у 5-вимірному просторі анти-де Сіттера, встановлено його зв'язок з відомим твісторним формулюванням та проведено квантування в термінах амбітвісторів. Також були запропоновані співвідношення між компонентами супертвісторів та координатами $AdS_5 \times S^5$ суперпростору, за допомогою яких дисертанту вдалося встановити зв'язок між супертвісторними та суперпросторовим формулюваннями моделі безмасової суперчастинки у даному суперпросторі й вперше провести квантування цієї моделі в термінах супертвісторів. У двох заключних підрозділах автором запропоноване нове формулювання моделі безмасової спінової частинки, в тому числі у зовнішніх полях, та нову модель спінової струни з нульовим натягом. Визначальною властивістю цих моделей є реалізація простору анти-де Сіттера як дійсного проєктивного багатовиду. В результаті квантування зазначених моделей дисертантом здобуті різні представлення рівнянь для хвильової функції спінової частинки та доведено відсутність аномалій локальних симетрій у моделі спінової струни для довільної вимірності простору анти-де Сіттера.

У висновках підсумовано основні результати, які отримані у дисертації та виносяться на захист.

В цілому докторська дисертація Дмитра Вячеславовича Уварова представляє собою цілісну завершену наукову працю. **Наукові положення, висновки та рекомендації**, сформульовані у дисертації, є **обґрунтованими та впливають із здобутих результатів**. У свою чергу, достовірність результатів дисертації підтверджується використанням добре відомих методів класичної і квантової теорії поля та їх узгодженістю зі здобутими раніше результатами. Зміст реферату коректно відтворює основні положення дисертації.

У дисертації Д.В. Уварова здобуто цілу низку нових наукових результатів, які відповідають світовому рівню досліджень з теорії струн та суперсиметрії. Відповідні пункти дисертації та реферату повною мірою розкривають **новизну** здобутих результатів. У відгуку хотілося б виділити деякі з них, які, на мій погляд, найбільшою мірою підкреслюють високий рівень роботи, а саме:

- запропоновані нові калібрувальні умови світлового конуса в моделі суперструни в $AdS_4 \times CP^3$ суперпросторі та розв'язано технічно складну задачу встановлення явного вигляду її лагранжіану та гамільтоніану як функцій листових полів координат суперпростору у даному калібруванні;
- незважаючи на складну нелінійну форму рівнянь безмасової суперчастинки в $AdS_4 \times CP^3$ суперпросторі, вдалося представити їх у вигляді рівняння Лакса та довести класичну інтегровність;
- проведено гамільтонів аналіз запропонованого вперше дисертантом супертвісторного формулювання моделі суперструни у 10-вимірному суперпросторі, здобуто набори гамільтонових в'язей першого та другого роду і обчислено співвідношення в'язей першого роду на дужках Дірака, побудованих із в'язей другого роду;
- запропоновано нову модель спінової струни з нульовим натягом у просторі анти-де Сіттера та доведено відсутність аномалій локальних симетрій у цій моделі.

Здобуті у дисертації результати є важливими для подальшого пошуку розв'язку проблеми квантування гравітації на основі теорії суперструн у розширених суперпросторах. Також вони можуть бути використані для розробки феноменологічних моделей з метою пояснення результатів експериментів з фізики високих енергій, астрофізики та космології, які проводяться і плануються у майбутньому. Цим визначається наукове **значення** дисертаційної роботи Д.В. Уварова.

За темою дисертації автором одноосібно опубліковано 20 робіт у добре знаних міжнародних фахових виданнях, які проіндексовані у провідних наукометричних базах Scopus та Web of Science. 13 із цих робіт опубліковані у наукових журналах, які входять до першого квартиля за класифікацією SCImago Journal and Country Rank, а 6 робіт опубліковані у наукових виданнях, віднесених до другого квартиля. **Наукові результати**, які увійшли до дисертації, **повністю викладені** у цих роботах. Також результати дисертації доповідались автором на багатьох наукових заходах як в Україні, так і за кордоном, що засвідчує їх належну **апробацію**.

Уважно проаналізувавши текст дисертації та наукові публікації, зараховані за її темою, вважаю, що у них **відсутні ознаки академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації**. Використання наукових результатів інших авторів належним чином оформлене включенням до тексту дисертації посилань на їх роботи. Відтак, під час підготовки дисертаційної роботи Д.В. Уваров належним чином дотримувався принципів академічної доброчесності.

Разом із тим, необхідно відзначити певні недоліки у роботі:

1) при викладенні матеріалу автор вводить велику кількість символів з використанням багатьох математичних шрифтів для позначення величин, які зустрічаються у основній частині дисертації. Можливо було б варто у вступній частині зробити єдиний перелік введених позначень, до якого можна було б звертатись при читанні розділів основної частини. Разом із тим, подекуди у різних розділах одна і та ж величина або її індекси позначаються по-різному. Наприклад, індекси векторів на світовому листку струни у перших двох розділах позначаються латинськими літерами i, j , а у третьому розділі грецькими літерами μ, ν ;

2) у четвертому розділі рівняння для хвильової функції спінової частинки у внутрішніх координатах простору анти-де Сіттера виводяться лише у випадку її взаємодії із зовнішніми полями. Зрозуміло, що у границі обернення взаємодії на нуль, ці рівняння переходять у рівняння для хвильової функції вільної частинки. Однак, з точки зору послідовності викладення матеріалу було б логічно спочатку їх вивести при квантуванні вільної частинки, а потім узагальнити на випадок її взаємодії із зовнішніми полями:

3) у підпунктах 4.5.1.3 і 4.5.1.4 окремо розглядається взаємодія спінової частинки з електромагнітним полем та абелевими антисиметричними калібрувальними полями. При цьому, однак, ніде не відзначається, що у випадку $p=2$ відповідне

антисиметричне калібрувальне поле можна інтерпретувати як електромагнітне. Така інтерпретація підтверджується тим, що здобуто у підпункті 4.5.1.4 рівняння Дірака для хвильової функції частинки включає у цьому випадку член взаємодії, який має таку ж структуру як і паулієвський член. Як відомо паулієвський член вводиться для опису немінімальної електромагнітної взаємодії зарядженого поля зі спіном $\frac{1}{2}$ за рахунок його аномального магнітного моменту. Відтак константа такої немінімальної взаємодії у здобутому рівнянні Дірака представляє аномальний магнітний момент спінової частинки. Тоді об'єднання рівняння Дірака, здобутого у підпункті 4.5.1.3 для мінімальної взаємодії частинки, із рівнянням Дірака, здобутим у підпункті 4.5.1.4 для немінімальної взаємодії, приводить до рівняння, яке описує електромагнітну взаємодію зарядженої частинки зі спіном $\frac{1}{2}$ та аномальним магнітним моментом, як раніше відзначалось в роботах О.О. Желтухіна.

Однак, наведені зауваження не знижують високу загальну оцінку роботи і не ставлять від сумнів коректність її результатів та висновків.

На підставі викладеного, вважаю, що докторська дисертація «Суперсиметричні моделі спінових частинок і струн у викривлених та твісторних просторах» Д.В. Уварова представляє цілісну завершену наукову працю, яка відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика. За своїм рівнем, актуальністю, новизною, науковою цінністю робота повністю відповідає вимогам, які пред'являються до дисертацій п.7-9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, а Дмитро Вячеславович Уваров заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Завідувач кафедри квантової теорії
поля та космофізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Станіслав ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

ПІДПИС ЗАСВІД-
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТ
КАРАУЛЬНА
16.09.2021

