

С Т А Н О В И Щ Е

относно дисертационен труд за получаване на образователната и научна степен
„Доктор“
професионално направление 4.1. Физически науки
специалност 01.03.01 „Теоретична и математическа физика“

Автор на дисертационния труд: **Мирослав Владимиров Радомиров**
докторант във Физически факултет на Софийския университет
„Свети Климент Охридски“

Тема на дисертационния труд:
Конструкция и свойства на холографски модели

Научен ръководител:
професор дфзн Радослав Христов Рашков
Физически факултет на Софийския университет „Свети Климент Охридски“

Автор на рецензията — Председател на научното жури:
доцент д-р Димитър Магдалинов Младенов
Физически факултет на Софийския университет „Свети Климент Охридски“

1 Актуалност на темата на дисертацията

Теорията на струните възникна като най-обещаващият кандидат за квантова теория на всички известни досега взаимодействия, тоест в рамките на теорията на струните е поставена изключително амбициозната задача да бъдат обединени квантовата гравитация и калибровъчната теория на елементарните частици.

За повече от столетното си съществуване, повече от петдесет години, струнната теория претърпя три така наречени „струнни революции“. „Първата струнна революция“ се свързва с откритието на модела на Венециано и забележителното наблюдение, направено в работите на Намбу, Нилсен и Съскинд, че разсейването в модела на Венециано описва всъщност разсейване на едномерни протяжни обекти, наречени струни, или с други думи, амплитудата на Венециано се интерпретира в термини на струни на Намбу. „Втората струнна революция“ е свързана с откритото от Грийн и Шварц съкращаване на аномалиите. Или по-конкретно, изчисленията, проведени от Грийн и Шварц, показват, че суперструна от тип I с калибровъчна група, която може да бъде само $SO(32)$ или $E_8 \times E_8$, е свободна от аномалии.

Струнните теории биват няколко вида. Един от фундаменталните, и все още нерешени въпроси, е изборът на една или друга струнна теория, която да играе ролята

на единна теория. Именно в решението на този изключително фундаментален въпрос, в рамките на теорията на струните, е постигнат забележителен прогрес. Оказва се, че всички известни досега суперструнни теории са свързани с преобразования на дуалност. Това откритие, от своя страна, помогна да бъде разбран непертурбативният режим в динамиката на струните, свързан със съществуването на нов тип протяжни обекти, наречени D-брани. След откритието на дуалността беше издигната и хипотезата, че всички известни досега струнни теории са частен случай на една фундаментална теория, наречена M-теория, чиято пространствено-временна размерност е равна на 11, като на големи разстояния M-теорията описва 11-мерна супергравитация. Откритието на дуалността, както и необходимостта от проверка на хипотезата за съществуване на M-теорията, предизвикаха истински взрив на интерес към теорията на суперструните. Всичката тази тематика, по думите на Джон Шварц, определи „Третата струнна революция“.

Трябва да се отбележи обаче, че след повече от петдесет години след своето създаване, което, съгласно съвременните критерии за темпове на развитие на една физична теория, е цяла вечност, струнната теория, поне засега, не е предсказала нито едно ново физично явление, което да бъде наблюдавано на експеримент. Това, така казано, не звучи много добре за една съвременна физична теория, но тук искам да кажа, че въпреки това, в рамките на струнната теория вече бяха получени изключително ценни за физиката резултати, а именно в рамките на струнната теория беше решен, например, знаменитият проблем за ултравиолетовите разходимости в квантовата теория на полето, който много дълги години мъчеше физиците-теоретици. Също така, теорията на струните обогати съвременната физика и със следните забележителни резултати. Беше получена от първи принципи формулата на Бекенщайн-Хоукинг за ентропия на черни дупки; беше построена теорията на Зайберг-Уитън, която ни позволява (супер)калибровъчните теории да бъдат изследвани с помощта на теорията на (супер)струните; беше открита холографска връзка между теория на струни, задени върху пространство на анти-де Ситер и конформна теория на полето в граница на големи N. Като се оценява струнната теория, непременно трябва да се отбележи и това, че, именно и само в нейната парадигма, беше възможно да бъдат включени в единна схема квантовата гравитация и известните ни досега калибровъчни теории, описващи физиката на елементарните частици.

Холографската връзка беше открита през 1997 година от Хуан Малдасена. В изследванията на Малдасена е показано, че физични теории от различен тип са свързани с преобразования на дуалност, а именно, от едната страна на съответствието, често обозначавано като AdS/CFT съответствие, се намират гравитационни теории, формулирани в рамките на теорията на струните (пространството анти-де Ситер играе определена роля в квантовата гравитация, затова е присъствието на аббревиатурата AdS), а от другата страна на AdS/CFT съответствието се намират квантовополеви теории с конформна симетрия.

AdS/CFT съответствието е забележително по следните причини. Дуалността, която възниква при AdS/CFT съответствието, всъщност е силна-слаба дуалност, тоест тя свързва теории с малка константа на връзката с такива, константата на връзката на които е голяма. Например, използвайки AdS/CFT съответствието можем да изследваме квантовополеви теории с голяма константа на връзката с помощта

на гравитационни теории с малка константа на връзката, тоест това дава възможност квантовополеви теории със силна връзка да бъдат изучавани пертурбативно с помощта на гравитационни теории със слаба връзка. Също така, AdS/CFT съответствието е реализация на холографския принцип, въведен в съвременната физика от Жерар т' Хофт, който ни казва, че свойствата на дадена физична теория, зададена в някой обем, всъщност са закодирани в границата на обема, която има по-ниска размерност.

Очевидно е, че AdS/CFT съответствието представлява изключително мощно средство за изучаване на физични теории и засега е много далече от своето пълно разбиране. Дадената дисертацията е посветена на изследвания в областта на теория на струните. Задачите, които са поставени в нея имат за цел да бъде прояснен статусът на AdS/CFT съответствието, като вместо обичайно разглежданите досега релативистки квантовополеви модели с конформна симетрия да бъдат изучени и нерелативистки конформни квантови теории на полето. Нерелативистки квантовополеви модели с конформна симетрия естествено възникват, например, във физиката на кондензираното състояние, физиката на атомите и молекулите и ядрената физика. Тези факти дават основание да смятаме, че изследванията в областта на нерелативистката холография (така се нарича AdS/CFT съответствието когато разглежданите полеви модели са нерелативистки) са доста интересни и нужни за съвременната физика.

Или кратко казано, дадената дисертация е посветена на изследвания, които могат да бъдат причислени към фундамента на теорията на струните и които условно спадат към „Третата струнна революция“. А именно, в дисертацията се изучават разни аспекти на холографията, или по-конкретно на нерелативистката холография. Дори и минимални прояснения в тази фундаментална част от теорията на струните биха били много полезни за очертаването на контурите на крайната картина. Всичко това определя тематиката на дисертацията като особено актуална и интересна.

2 Структура на дисертацията

Дисертационният труд е написан на български език и се състои от 120 страници, разпределени в 9 глави, първата от които представлява увод, а последната е заключение. Научните приноси, на които се основава дисертационният труд, са включени в заключението. В дисертацията са представени две приложения. Списъкът на използваната в дисертацията литература съдържа 82 заглавия, подредени по ред на цитиране в текста. Накрая дисертацията завършва със списък на публикациите, на които се основава дисертационният труд, както и са отбелязани конференциите, на които са докладвани получените в дисертацията резултати. За онагледяване на представения в дисертацията материал в нея са включени 5 фигури.

Материалът, обхванат в дисертацията, както беше отбелязано по-горе, е разпределен в девет глави. Първите шест глави са уводни, като в тях са изложени предварителни сведения, необходими при изследванията в областта на дисертацията, което прави текста до известна степен самосъгласуван, минимизира обръщението към други източници и помага за разбиране на получените научни резултати. По-конкретно,

в уводните глави е представен доста разнообразен материал, който включва сведения по теория на калибровъчните полета, конформната симетрия, суперсиметрията, кратък увод в теорията на струните, увод в геометрията на пространството на анти-де Ситер, основни сведения за AdS/CFT съответствието и пространството на Шродингер, както и някои факти, касаещи динамиката на струни в $AdS \times S^5$ пространство.

В **Седма и Осма глава** са представени оригиналните резултати, включени в дисертацията.

Девета глава представлява заключение, в което кратко и ясно са резюмирани научните приноси на дисертационния труд.

В **Приложение А** и **Приложение Б** за удобство са събрани на едно място важни, от гледна точка на получените в дисертацията резултати, формули.

3 Основни приноси

В дадената дисертация се изучават разни аспекти на холографията, или по-конкретно на нерелативистката холография. А именно, изследвана е класическата и квантова динамика на пулсиращи струни в подходящи, достатъчно симетрични фонове пространства. Нерелативистки конформни модели възникват в нискоенергетичен предел в разни модели във физиката на кондензираното състояние, физиката на атомите и молекулите и ядрената физика, за които има надежда, че предсказанията на теорията могат да бъдат, евентуално, проверени на практика.

Основните приноси на дисертацията могат да бъдат резюмирани по следния начин:

- Основна задача, поставена в дисертацията, е изследване на динамиката на струни, разпространяващи в достатъчно симетрични пространства от определен тип. По-конкретно, изучена е динамиката на затворена бозонна струна, зададена в многообразието $Schr_5 \times M^5$, където $Schr_5$ е 5-мерно многообразие, чиято метрика има за група на изометриите групата на Шродингер, а M^5 е 5-мерната сфера S^5 или регулярното многообразие на Сасаки-Айнщайн $T^{1,1}$. За този модел е получен е Лагранжианът, който има сигма-моделен вид, както и уравненията на движението.
- Изследването на динамика на струната в многообразието $Schr_5 \times M^5$ в общия случай е много сложна задача. Затова, за по-нататъшно изследване на системата, е използван определен анзац. В този случай е получен Лагранжианът и, съответно, класическите уравнения за движение. Тук трябва да отбележа, че полученият Лагранжиан все още има доста сложен вид, и съответно класическите уравнения на движение са много сложни. Въпреки това обаче, за този модел, в дисертацията са получени точни решения, които описват определени струнни конфигурации, описващи пулсиращи струни. Точните решения се изразяват чрез елиптичните функции на Якоби.
- Моделът $Schr_5 \times M^5$ с анзац пулсираща струна е квантуван в квазикласическо приближение, като са получени уравнението на Шродингер и в явен вид е получена и вълновата функция на модела.

- От условията за квантуване е получен спектърът на енергията на пулсиращата струна.

4 Научни публикации. Цитиране на научните трудове

Общият брой на представените в дисертацията публикации е 4, като в това число:

A. В реферирани списания — 4

A1. Journal of High Energy Physics — 1

A2. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical — 1

A3. Journal of Physics and Technology — 2

B. Публикации в материали на конференции, сборници и архиви — 0

5 Автореферат

В даденият случай авторефератът представлява просто съкратена форма на дисертацията и поради тази причина напълно правилно и точно отразява научното ѝ съдържание.

Писал съм го и на други места, споменавам и тук, че според мен в автореферата, особено когато се касае за такава изключително сложна научна област като съвременната теория на струните, материалът трябва да бъде представен така, че получените научни резултати би трябвало някак по-релефно спрямо останалия текст да бъдат описани и разяснени. Което, според мен, ще спомогне истинската цел на автореферата да бъде осъществена по-пълно, а именно получените резултати да бъдат разбрани и осмислени от възможно най-широк кръг от физици.

6 Забележки

Съществени критични бележки по дисертацията нямам.

Имам по-скоро някои препоръки и забележки по оформлението на дисертационния труд, които с необходимост изразяват само личното ми мнение.

В текста на дисертацията присъстват известно количество печатни, граматически и смислови грешки. Искам да кажа обаче, че в повечето от случаите много добре се разбира какво се има предвид, но има и няколко места, в които изложението би било хубаво да бъде корегорано и уточнено. Тук няма да посочвам явно тези места, тъй изложението в дисертацията е по-неформално, а и това не влияе на получените научни резултати.

Изложението в уводните глави е стандартно и, бих казал, малко схематично, но може да се използва за бързи справки, предимно за използваните означения. Според мен, ако вече е решено да се включва в дисертацията глава, посветена на определена тема, то би следвало да се дава по-подробно и по-информативно изложение, което

не остава в рамките на началните дефиниции и методи. Това е обаче въпрос на стил и личен вкус и не влияе на качеството на дисертацията.

Тук искам да подчертая, че лично аз приветствам не много строгия стил на изложение, тъй като съвременната струнна теория е изключително сложна и напълно прецизното изложение на материала ще направи текста много тежък за разбиране, даже и от изследователи, работещи в относително близки научни области.

7 Обща характеристика на дисертацията

- Дисертационният труд на Мирослав Радомиров е посветен на една от най-актуалните и сложни области на съвременната теоретична физика, а именно на струнната теория.
- Целите, поставени в дисертацията, са да се изучават разни аспекти на холографията, или по-конкретно на нерелативистката холография. В дисертацията се изследва класическата и квантова динамика на пулсиращи струни в подходящи, достатъчно симетрични фонове пространства.
- При решението на поставените в дисертацията задачи, съдейки по голямата сложност на използваните формули, доста активно е използван софтуеър за аналитични изчисления. Това отдавна е станало характерна особеност при изследвания в съвременната струнна теория.
- Научните резултати са публикувани в най-високо реномирани международни списания, такива като, например, **Journal of High Energy Physics** и **Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical**, както и в набиращи все по-голяма популярност и международен авторитет национални списания като **Journal of Physics and Technology**.
- Тук бих искал да отбележа някои неща, които, лично аз, смятам за важни. В наши дни за да се започне успешна научна работа в теория на струните се изисква доста солидна начална подготовка в много области на съвременната теоретична и математическа физика, както и в някои дялове на съвременната математика. Или малко по-конкретно, съвременният начинаещ изследовател трябва да има солидна подготовка в такива области като квантовата теория на полето, гравитацията, суперсиметрията, супергравитацията, трябва да знае доста факти от математическия апарат на квантовата теория на полето, а също така и поради това, че съвременното състояние в теорията на струните се характеризира с все по-интензивно използване на някои от най-абстрактните дялове на съвременната математика, непременно са необходими и знания в такива области като алгебрична геометрия, диференциална геометрия, некомутативна геометрия, суперанализ, теория на представянията на афинни алгебри и (супер)алгебри на Ли.

По-голямата част от тези знания не могат да бъдат получени, ако се следват предимно курсовете, предвидени в нашите физически факултети. Затова

началото на научните изследвания в областта на съвременната теоретична и математическа физика, и в частност в теорията на струните, като правило е много трудно.

Използвам това място да отправя апел към колегията да не преставаме да мислим как да оптимизираме подготовката на начинаещите физици-теоретици, така че те при старта си да са достатъчно добре подготвени за започване на успешна изследователска работа. Знам, че това не е никак лесна задача, а и всеки от нас вече е мислил и правил усилия за нейното решаване, но тука просто напомням.

Но в случая на тази дисертация се вижда, че дисертантът успешно е навлязъл в една много модерна, а както беше вече отбелязано и изключително трудна, научна област, каквато е съвременната струнна теория, като при това е овладял доста сложни методи и техники. Тоест, успял е успешно да преодолее повечето от трудностите, които се срещат при научните изследвания в областта на теорията на струните.

Дадената дисертация напълно удовлетворява изискванията, отразени в Закона за развитие на академичния състав в Република България, както и вътрешните, специфични изисквания на Физически факултет на Софийския университет „Свети Климент Охридски“.

8 Заключение

Вземайки предвид всичко казано досега, без колебание, препоръчвам на многоуважаемото жури да присъди на Мирослав Владимиров Радомиров образователната и научна степен „**Доктор**“.

С уважение:

доцент д-р Димитър М. Младенов

18 юли 2021 година
София