

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

Автор на дисертационния труд: Цветан Иванов Вецов,
докторант във Физическия факултет на Софийски университет „Св. Кл. Охридски“

Научно направление: 4.1 Физически науки (01.03.01 Теоретична и математична физика)

Тема на дисертационния труд: „Струнен подход към калибровъчните теории“

Научен ръководител: проф. дфзн Радослав Христов Рашков (ФзФ-СУ)

Рецензент: проф. дфзн Стойчо Стоянов Язаджиев (ФзФ-СУ)

Обща характеристика

Теорията на струните е най-популярният опит да се обединят фундаменталните физически теории на квантово ниво. Независимо от бурното развитие на струнната теория през последните десетилетия, тя все още не е дала предсказание, което да се провери експериментално. Една идея, която дава надежди за експериментална проверка на теория на струните, е хипотеза на Малдасена за "дуалност" между струнна теория в пространство, което е произведение на Анти- де Ситер с компактно пространство (например пет-мерна сфера) и супер- Янг-Милс теория в (3+1) измерения. Най-интересно е, че има еквивалентност между калибровъчни теории и струни, дефинирани в различни по размерност пространства, като двете теории са дуални. Това означава, че когато едната теория се разглежда при силна константа на връзката, другата е при слаба константа на връзката и може да се третира пертурбативно. Различни форми на споменатата дуалност изненадващо намериха приложения в много други области като кварк-глюонна плазма, релятивистка хидродинамика на силно корелирани квантови системи, елементи от космологията, конденсираната материя и други. Едно от най-основните направления в тази област е изучаване на калибровъчните теории и елементарните частици при силна константа на връзката. В това направление попада и квантовата хромодинамика, чието разбиране е все още твърде далеч от желаното.

Дисертацията на Цветан Вецов е мотивирана от AdS/CFT съответствието и по-конкретно от приложението му към калибровъчните теории. Изследванията се базират на струнния подход към калибровъчните теории. Основната цел на дисертацията е по-подробно да се изучат аспектите на взаимното съответствие между струни и калибровъчни теории като е наблегнато най-вече на методите от струнната страна на съответствието. От една страна се търсят квази-квантовите флуктуации на конфигурации от пробни D-брани в глобална геометрия на Пилх-Уорнър, а от друга страна се търси вида на операторите в калибровъчните теории, дуални на флуктуациите на D-браните.

Квантовата хромодинамика (QCD) е SU(3) калибровъчна теория на Янг-Милс, която дава адекватно описание на силното взаимодействие. При ниски енергии теорията е с голяма константа на връзката, което означава, че силата на взаимодействие между кварките нараства значително с увеличаване на разстоянието между тях. В този случай кварките се стремят да образуват адрони – феномен известен като „конфайнмънт“. При

ниски енергии стандартната теория на пертурбациите е неприложима, което естествено извиква нуждата от създаването на нови алтернативни непетурбативни методи за смятане. Такива непетурбативни техники възникват в теория на суперструните в контекста на AdS/CFT съответствие то, където свойствата на суперсиметрични системи на Янг-Милс могат да се изучават чрез изследване на динамиката на различни конфигурации от D-брани и струни, и обратно.

Оригиналната версия на хипотезата на Малдасена за съответствие между струни и калибровъчни теории се фокусира върху твърдението, че тип IIB суперструнна теория, живееща в 10-мерното $AdS_5 \times S^5$ пространство, е дуална на $\mathcal{N} = 4$ суперконформна теория на Янг-Милс, живееща на четири-мерната асимптотична граница на това пространство, и обратно. В тази форма хипотезата за съответствие не е приложима за описание на квантовата хромодинамика, тъй като $\mathcal{N} = 4$ суперконформната теория на Янг-Милс съдържа твърде много симетрии, а както знаем QCD не е нито суперсиметрична, нито конформна теория.

За да получим по-реалистичен струнен подход към калибровъчните теории и в частност към QCD, се нуждаем от последователно разширение и обобщение на първоначалното AdS/CFT съответствие. Най-естествено би било да намерим начин да намалим суперсиметрията и конформната симетрия. Това може да се постигне чрез деформирането на първоначалния $AdS_5 \times S^5$ супергравитационен фон, или да се търсят нови фонови решения на уравненията на 10-мерната супергравитацията, съдържащи значително по-малко суперсиметрия. Този подход е възприет и в настоящата дисертация, където е разгледано супергравитационното решение на Пилх и Уорнър, което е дуално на $\mathcal{N} = 1$ калибровъчна теория на Лей-Страслер.

В оригиналната версия на AdS/CFT съответствието геометрията на $AdS_5 \times S^5$ пространството се генерира ефективно от N_c на брой паралелни D3-мембрани. Когато разглеждаме ниско-енергетичната динамика на тези мембрани забелязваме, че състоянията на отворените струни, чиито краища са закрепени върху мембраните, се трансформират само по присъединеното представяне на калибровъчната група. Това означава, че в теорията липсва фундаментална материя като кварките. Този проблем се преодолява като към снопът от N_c паралелни D3-брани се добави нов сноп от N_f на брой D-мембрани с по-висока размерност. В този случай краищата на струните могат да се закрепят върху мембрани от различни снопове, което поражда състояния трансформирани се и по фундаменталното представяне на калибровъчната група.

Изследванията в настоящия дисертационен труд са направени в граница на пробната брана. Това означава, че когато броят N_c на цветните D3-брани е много по-голям от броя N_f на ароматните D5- или D7-брани, то снопът от D3-браните можем ефективно да го заменим с пространствено-времевият фон, който генерира, и да пренебрегнем гравитационното влияние върху фона идващо от ароматните мембрани. Така ефективно можем да разглеждаме ароматните D5- и D7-брани като пробни мембрани потопени в геометрията на фона, генериран от цветните D3-брани. Сега състоянията на струни закачени върху ароматните мембрани се трансформират под фундаменталното представяне на глобалната ароматна калибровъчна група $SU(N_f)$. Ниско-енергетичните флуктуации на ароматните D5- и D7-брани около класическото им влагане отговарят на мезонни моди в дуалната калибровъчна теория.

Въпреки, че подходящо струнно описание на квантовата хромодинамика все още не е намерено, то търсенето продължава и се очаква скоро да бъдат построени реалистични струнни модели описващи калибровъчни теории близки до QCD. Изследванията на скаларните флуктуации на пробни D-брани в геометрия на Пилх и Уорнър и получените мезонни спектри е стъпка в това направление.

Вторият клас от задачи изследвани в дисертацията е свързан с пресмятането на някои три-точкови корелационни функции от определен тип калибровъчни оператори в рамките на оригиналната версия на AdS/CFT съответствието. Това е от изключителна важност за теорията, тъй като с методи разработени в класическата теория на суперструните и супергравитацията можем да пресмятаме величини в дуалната калибровъчна теория при силна константа на връзката, където принципно е трудно да се извършват каквито и да било изчисления. Приетият в дисертацията подход е квазикласически подход, който позволява да се изследват нови три- и четири-точкови корелационни функции в $\mathcal{N} = 4$ суперсиметричната теория на Янг-Милс посредством класически струнни решения в $AdS_5 \times S^5$ пространството.

Третият клас от задачи разгледан в дисертационният труд е свързан с получаването и изследването на спектралните криви на определен клас от струнни решения в $AdS_5 \times S^5$ пространството чрез наскоро разработен алгебричен метод, избягващ досегашния труден анализ с оператор на монодромията.

Дисертационният труд е изложен на 184 страници и съдържа: Увод, 6 глави и заключение. Библиографската справка се състои от 178 заглавия. Първите три глави имат уводно-обзорен характер, като те дават кратко, но достатъчно пълно описание на областта, задачите които се поставят и решават, а така също и някои специфични идеи и техники. В тези глави се дефинират в общ вид проблемите, които се изследват в дисертацията. В глави 5, 6 и 7 се излагат оригиналните резултати получени от докторанта. В глава 8 се дискутират приносите и се дават насоки за възможни бъдещи изследвания. Библиографията е достатъчно пълна и отразява добре както развитието на проблематиката през годините, така и последните достижения в областта.

Авторефератът съдържа 55 страници и правилно отразява съдържанието на дисертационния труд.

Приноси

Приносите в дисертационния труд на Цветан Вецов могат да се групират в 3 главни направления:

1) Изследване на скаларните флукуации на различни D-брани и съответстващите им мезонни спектри в граница на пробната брана в глобална геометрия на Пилх-Уорнър. Това означава, че когато броят N_c на цветните D3-брани е много по-голям от броя N_f на ароматните D5- или D7-брани, то снопът от D3-браните можем ефективно да го заменим с пространствено-времевия фон, който генерира, и да пренебрегнем гравитационното влияние върху фона идващо от ароматните мембрани. Така ефективно можем да разглеждаме ароматните D5- и D7-брани като пробни мембрани потопени в геометрията на фона, генериран от цветните D3-брани. Приносите са изложени основно в 5-та глава на дисертацията, като най-съществените резултати са следните:

а) Изследвани са капа-симетричните вложения на пробни D5- и D7-брани в глобална геометрия на Пилх-Уорнър.

б) Намерен е видът на матриците на капа-симетрия за двете пробни D-брани.

в) Чрез анализ на капа-симетрията е намерено класическо влагане на D5- и D7-браните в супергравитационния фон на Пилх и Уорнър в глобални координати.

Получените класически вългания са съвместими с уравненията на движение на мембраните.

г) Освен това е показано, че капа-симетрията запазва точно половината от спинорните степени на свобода върху мировия обем на пробните D-брани.

д) Разгледани са скаларните флуктуации около класическите капа-симетрични вългания на D5 и D7 пробните мембрани в глобална геометрия на Пилх-Уорнър. Анализът на скаларните флуктуации на пробните D-брани и съответстващите им мезонни спектри е проведен напълно аналитично.

2) Получаване и изследване на нови три-точкови корелационни функции в $\mathcal{N} = 4$ суперсиметричната теория на Янг-Милс посредством класически струнни решения в $AdS_5 \times S^5$ фонова геометрия. Известно е, че конформната симетрия фиксира вида на три-точковите корелационни функции с точност до структурна константа, която при определени условия може да се определи в рамките на AdS/CFT съответствието. Едно от следствията на дуалността е, че планарните корелатори на първичните конформни оператори в калибровъчната теория са свързани с корелаторите на съответстващите им вертексни оператори върху мировия лист на затворената струна. В граница на голяма константа на 'т Хофт $\bar{\lambda}$ поведението на корелационните функции на такива оператори се определя от квази-класическите струнни траектории. Основните приноси в това направление са изложени в 6-та глава на настоящата дисертация. Резултатите получени тук са следните:

а) Пресметната е три-точкова корелационни функция с два "тежки" оператора и един лек дилатонен оператор в $\mathcal{N} = 4$ суперсиметричната теория на Янг-Милс при силна константа на връзката.

б) Пресметната е три-точкова корелационни функция с два "тежки" оператора и един лек суперконформен първичен скаларен оператор в $\mathcal{N} = 4$ суперсиметричната теория на Янг-Милс при силна константа на връзката.

в) Пресмятанията са извършени за решение на пръчковидна струна с три спина в $AdS_5 \times S^5$ фонова геометрия (един в AdS и два еднакви спина в 5-сферата).

г) Също така са получени няколко гранични случая, които физически мотивират пресмятанията.

3) Получаване и изследване на свойствата на спектралните криви на определен клас струнни решения в $AdS_5 \times S^5$ с помощта на локална конструкция, която не използва оператора на монодромии. Новата процедура значително опростява намирането на Лаксовия оператор и може лесно да се приложи към определен клас от решения на струнния сигма модел върху групови многообразия. Приносите в това направление са изложени в 7-ма глава и могат да се обобщят по следния начин:

а) Изследвани са Лаксовите оператори и съответстващите им алгебрични криви за въртящи се кръгови струнни върху групови подмногообразия на $AdS_3 \times S^3$.

б) Изследвани са Лаксовите оператори и съответстващите им алгебрични криви за въртящи се кръгови струнни в различни подпространства на $AdS_5 \times S^5$.

в) Също така са изследвани различни специални случаи на получените алгебрични криви.

Значимост на приносите за науката и практиката

Главната ценност на изследванията на докторанта се състои в третирането на непертурбативните теории в контекста на фундаменталната концепция за „холографска“ дуалност между струнна теория от една страна, и различни типове калибровъчни полеве теории описващи физиката в подпространства на обемното многомерно пространство-време, от друга страна.

В категорията на теории попадащи в тази област са квантовата хромодинамика (силно свързани кварки, стълкновения на тежки йони, кварк-глюонна плазма, мезонни и барионни модели, квантова теория на полето при крайна температура), релятивистката хидродинамика (динамика на квантови вискозни флуиди) и физиката на кондензираните среди („холографски“ свръхпроводници, „холографски“ метали, квантов ефект на Хол).

Публикации и тяхното отражение в литературата

Дисертационният труд е основан на 4 публикации: 1 статия в International Journal of Modern Physics A, 1 статия в Bulg. J. Phys. и 2 електронни препринта.

Резултати са докладвани и публикувани в пълен текст в сборници трудове на 3 международни конференции състояли се в България.

В системата INSPIRE HEP в Станфорд досега са забелязани 32 цитирания на статията в International Journal of Modern Physics A.

Считам, че дисертантът има равностоен и съществен принос във всичките му съвместни трудове с останалите съавтори. Основания за такова твърдение са декларациите от страна на самия научен ръководител.

Лични впечатления

Познавам Цветан Вецов като отличен студент. Две последователни години като докторант той водеше упражненията към моя курс по векторен и тенорен анализ, откъдето също имам отлични впечатления.

Забележки

Нямам критични забележки по същество и по отношение на резултатите в дисертацията. Единствено бих отбелязал някои правописни грешки в текста и незначителни езикови неточности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Няма съмнение, че приносите на дисертацията напълно отговарят и дори надвишават обичайните изисквания за присъждане на образователната и научна степен „доктор”.
Въз основа на казаното по-горе убедено препоръчвам на високоуважаемото жури да присъди на Цветан Иванов Вецов образователната и научна степен „доктор”.

25. 04. 2015 г.
София

проф. дфзн Стойчо Язаджиев