



## Научном већу Института за физику

### Предлог за Годишњу награду за научни рад Института за физику

Са посебним задовољством предлажемо др Бојана Николића, вишег научног сарадника, за годишњу награду Института за физику за научни рад за његов допринос разумевању *T-дуализације бозонске струне и суперструне типа II*. Наведени резултати остварени су у периоду од 01.01.2018. до 31.12.2019. године у оквиру пројекта ОИ 171031 „Физичке импликације модификованог простор-времена” на Институту за физику у Београду.

**Тема истраживања.** Основна тема истраживачког рада Бојана Николића односи се на *теорију струна*. Ова теорија настала је 60-их година 20. века као теорија јаких интеракција. Са појавом квантне хромодинамике теорија струна губи на значају. Убрзо након тога, када су физичари почели са покушајима прављења једне теорије која уједињује све интеракције, појавили су се проблеми са уједињењем гравитације и осталих интеракција. Један од путева решавања тог проблема је и теорија струна у којој се појављује поље спина 2, што би могао бити гравитон, квант гравитационог поља. Пошто у природи постоји јединство бозона и фермиона а и сама бозонска теорија струна садржи тахионе, у садржај теорије струна улази и суперсиметрија и тако добијамо теорије суперструне. Постоји 5 конзистентних теорија суперструна и оне су повезане мрежом Т- и С-дуалних трансформација. У том смислу можемо говорити о једној теорији и она је у литератури позната као *M*-теорија. Боље разумевање Т-дуалних трансформација очигледно води ка бољем разумевању *M*-теорије као јединствене теорије свих познатих интеракција.

Тополошки гледано струна има отворених и затворених. Отворена струна има слободне крајеве, тако да када варирамо дејство, поред једначина кре-

тања, добијамо и граничне услове. Третирањем једначина кретања и граничних услова (решавањем једначина кретања развојем у Фуријеов ред, решавањем граничних услова или увођењем Диракових заграда), добија се да су крајеви отворене струне, већ у случају константних позадинских поља, некомутативни. Како је у другим анализама показано да на крајевима отворених струна "живе" честице интеракција (бозони), долазимо до резултата који се масовно испитује у оквиру некомутативних формулација квантне теорије електрослабих интеракција. С друге стране, затворена струна нема крајеве па у присуству константних позадинских поља теорија остаје комутативна. Међутим, комбинацијом Т-дуалних трансформација и координатно зависних позадинских поља може се постићи некомутативност. Међутим, сада параметар некомутативности зависи од координате, па је у општем случају, теорија и неасоцијативна, али и негеометријска (нема стандардну геометријску интерпретацију). Координатно зависна поља и Т-дуалност се испитују тренутно у оквиру бозонске теорије струна, док су константна позадинска поља и Т-дуалност сасвим добро изучене и на примерима бозонске и на примерима суперструне.

Т-дуалност је математички реализована у оквиру Бушерове процедуре. Ова процедура је применљива за Т-дуализацију дуж праваца од којих позадинска поља не зависе, тј. дуж изометријских праваца. Локализацијом транслационе симетрије (увођење коваријантних извода) дуж изометријског правца, уз услов да су новоуведена калибрациона поља нефизички степени слободе (члан са Лагранжевим множителем), добијамо помоћно дејство у којем можемо фиксирати калибрациони услов због уочене симетрије. На тај начин добијамо тзв. фиксирано дејство из којег на једначинама кретања за Лагранжеве множитеље (Т-дуалне координате) добијамо почетно дејство, док на једначинама кретања за калибрациона поља добијамо Т-дуално дејство. Комбинацијом ових једначина кретања добијају се Т-дуални трансформациони закони који повезују иницијалне и Т-дуалне координате. Међутим, у случају координатно зависних поља стандардну Бушерову процедуру је немогуће применити. У таквим случајевима се примењује генералисана Т-дуализациона процедура која садржи још једна корак у поређењу са стандардном процедуром. Поред, коваријантних извода и члана са Лагранжевим множителем, у дејству се координата мења инваријантном (коваријантном) координатом. Даље је процедура иста - фиксирање калибрационог услова и варирање добијеног дејства како бисмо добили Т-дуалну теорију и трансформационе законе.

У случају координатно зависних поља трансформациони закони су такви да извод (мисли се на извод дуж параметара светске површи) Т-дуалне координате зависи, у оквиру канонског приступа, како од канонског импулса иницијалне теорије тако и од координата иницијалне теорије. Како је иницијална теорија геометријска (координате и импулси задовољавају стандардну Поасонову алгебру), Т-дуална теорија је некомутативна и неасоцијативна. У два од четири

рада са којима кандидат конкурише за награду обрађен је специјални случај са тзв. слабо закривљеним позадинским пољима - метрика је константна а Калб-Рамоново поље је линеарно зависно само од једне координате са бесконачно малом јачином поља.

БушEROва процедура се сматра дефиницијом Т-дуализације. Т-дуализација се може репрезентовати и у удвострученим просторима. Удвостручени простор је простор "разапет" над координатама иницијалног и Т-дуалног простора. Т-дуализација у таквом окружењу је у ствари пермутациона симетрија. Закони трансформације се запишу у удвострученом простору и захтева се да је облик трансформација исти након Т-дуализације. Одатле се одмах добијају Т-дуална позадинска поља у функцији иницијалних позадинских поља. Т-дуализација аналитичким путем и преко удвостручених простора тип II суперструне је обрађена у друга два рада са којима др Бојан Николић конкурише за Годишњу награду.

**Опис резултата и личног доприноса кандидата.** Др Бојан Николић је у сарадњи са проф. др Браниславом Саздовићем разматрао Т-дуализацију суперструне типа II. С једне стране у раду

B. Nikolic, B. Sazdovic, Simultaneous T-dualization of type II pure spinor superstring, Eur. Phys. J. C 78, 1030 (2018)

разматрана је парцијална Т-дуализација тип II суперструне. Инспирација за ову анализу је био рад

E. Bergshoeff, C.M. Hull, T. Ortin, Nucl.Phys. B451 (1995) 547-578,

у коме је разматрана Т-дуализација поменуте теорије суперструна али са становишта ефективне теорије. Ефективна теорија је теорија у 10-то димензионом простору добијена из услова која морају да задовоље позадинска поља у процесу квантизације.

Др Бојан Николић је у сарадњи проф. др Браниславом Саздовићем разматрао исти проблем али са становишта теорије на светској површи (дводимензиона површ коју коју "исцртава" струна током кретања). У раду је извршена целовита и детаљна анализа процеса парцијалне Т-дуализације или како се у литератури може срести, колективна Т-дуализација (више праваца истовремено). У литератури се најчешће презентује Т-дуализација дуж једног правца која је технички много мање захтевна. Пошто се два кирална сектора теорије трансформишу различито, постоје два сета vielbein-а и гама матрица који су повезани локалном Лоренцовом трансформацијом. Нађена је њена спинорска репрезентација за случај парцијалне Т-дуализације и константних позадинских поља као и израз за трансформацију дилатонског поља. Такође, о оквиру овог приступа, показано је да свака појединачна Т-дуализација (дуализација

дуж једног правца) ”пребацује” тип IIВ у тип IIА и обратно. Из облика Т-дуалних поља и спинорске трансформације локалне Лоренцове трансформације добија се да јачине поља из R-R (Рамон-Рамон) сектора добијају једну имагинарну јединицу после Т-дуализације дуж временске координате, тј. у ефективној теорији чланови који су квадрати јачина поља постају негативни. Таква теорија, добијена након Т-дуализације дуж временског правца, назива се тип II<sup>\*</sup> теорија.

Приступ удвостручених простора сликовито репрезентује Т-дуализацију и у оквиру једне теорије јер у оквиру једне теорије, до на одређену пермутацију координата, имамо обједињене све тип II теорије суперструне - тип IIА, IIВ и II<sup>\*</sup>. Оно што је уочено и урађено у

B. Nikolic, B. Sazdovic, Advantage of the second-order formalism in double space T-dualization of type II superstring, Eur. Phys. J. C 79, 819 (2019)

јесте да уколико проинтегралимо фермионске канонске импулсе, добијамо теорију другог реда - квадратичну по изводима бозонских и фермионских координата. Таква теорија обезбеђује да када се примени приступ удвостручених простора можемо релативно лако добити сва Т-дуална позадинска поља као и везу међу тип II суперструна. Без преласка са теорије првог реда на теорију другог реда не бисмо могли да добијамо Т-дуално R-R позадинско поље. Оно се тада добија постављањем додатних услова ван формализма удвостручених простора.

У претходна два рада теорија која је разматрана је са константним позадинским пољима тако да је примењивана стандардна БушEROVA процедура Т-дуализације. У раду

D. Andriot, M. Larfors, D. Lust, P. Patalong, (Non-)commutative closed string on T-dual toroidal backgrounds, JHEP 06 (2013) 021,

разматрана је бозонска струна у три димензије у присуству константне метрике и Калб-Рамоновог поља које има само једну ненулту компоненту,  $B_{xy} = Hz$ , где је  $H$  јачина поља која је бесконачно мала величина. Т-дуализација је рађена само дуж праваца  $x$  и  $y$  који су изометријски у апроксимацији линеарно по  $H$ . Као резултат се добија негеометријска ( $Q$ -flux theory) теорија која је некомутативна али уз нетривијалне услове намотавања.

Др Бојан Николић је у сарадњи са својим докторандом Данијелом Обрићем у радовима

B. Nikolic, D. Obric, Noncommutativity and nonassociativity of closed bosonic string on T-dual toroidal backgrounds, Fortschritte der Physik (2018) 1800009,

B. Nikolic, D. Obric, Directly from H-flux to the family of three nonlocal R-flux theories, JHEP 03 (2019) 136,

анализирао исти модел, али примењујући генерализовану процедуру Т-дуализације уз тривијалне услове намотавања. Основна разлика у односу на рад немачке групе је та што је Т-дуализовано дуж свих праваца, правац по правац. Прво је дуализовано  $x$  па дуж  $y$  правца. После прве Т-дуализације добијен је комутативни геометријски простор ("уврнути торус"), док друга Т-дуализација производи негеометријску комутативну теорију. Ту је разлика са радом немачке групе јер су они добили некомутативност после друге Т-дуализације уз нетривијалне услове намотавања. Оно што је новитет у овом раду је и урађена Т-дуализација дуж  $z$  правца која за резултат има некомутативну и неасоцијативну теорију познату у литератури као  $R$ -флукс теорија. Параметри некомутативности и неасоцијативности су пропорционални јачини поља  $H$ . Параметар некомутативности линеарно зависи од координате док је параметар неасоцијативности константан. Добијена теорија после три Т-дуализације је нелокална јер се као аргумент позадинских поља појављује променљива која је дефинисана као линијски интеграл. У другом раду је испитана зависност резултата (некомутативност, неасоцијативност, нелокалност) од редослада Т-дуализације што се у принципу свело на то да полазну теорију прво дуализујемо дуж  $z$ , па дуж  $y$  и на крају дуж  $x$  правца. Оно што је резултат јесте да су све три теорије нелокалне ( $R$  флукс теорије), с тим што је прва комутативна и асоцијативна, друга некомутативна и асоцијативна, а трећа некомутативна и неасоцијативна. Дејство после три Т-дуализације је исто што значи да не зависи од редослада Т-дуализација, али параметри некомутативности и неасоцијативности се разликују за фактор  $(-1)$  у односу на редослед Т-дуализација  $x \rightarrow y \rightarrow z$ .

Резултати објављени у поменута 4 рада су у потпуности остварени на Институту за физику у Београду.

#### **Статистика радова и импакт резултата на научну област.**

У току календарске 2017. и 2018. године др Бојан Николић је објавио 4 рада (горе набројани), сви из категорије M21, који су до сада цитирани 5 пута према бази InSpire. Укупан импакт фактор радова је **18,782**. Значај добијених резултата се огледа у квалитету часописа. Значај радова др Николића односи се на разумевање процеса Т-дуализације и његовог места у разумевању М-теорије.

Др Бојан Николић је руководилац докторске дисертације Данијела Обрића, а био је руководилац два мастер рада одбрањена 2017. и 2018. године. Својим радом и развијеном међународном сарадњом др Николић доприноси препознатљивости Групе за гравитацију, честице и поља Института за физику.

Због свега наведеног сматрамо да је др Бојан Николић постигао изузетне научне резултате у последње две године у области теорије струна и задовољство нам је да га предложимо за Годишњу награду Института за физику.

Београд, 23.03.2020. год.



проф. др Бранислав Саздовић  
научни саветник у пензији  
Институт за физику у Београду



др Марко Војиновић  
виши научни сарадник  
Институт за физику у Београду