

ОБОБЩЕН НАУЧЕН ОТЧЕТ

ПО ДОГОВОР ДФНИ Т02/6 от 12.12.2014 г.

Тема: Нови парадигми за фундаменталната структура на материята

През отчетния период са публикувани или предстоят да бъдат публикувани общо **111** научни труда [1-111] на участниците в Договор ДФНИ Т-02/6 с Националния Фонд "Научни изследвания" съгласно работната програма. Трудовете се разпределят както следва:

- (а) **52** публикации в списания с импакт фактор;
- (б) **17** публикации в списания без импакт фактор;
- (в) **20** публикации на доклади в пълен текст в трудове на международни конференции (proceedings, някои с импакт ранг), от които 2 са приети за печат ;
- (г) **2** дисертации за "доктор на науките";
- (д) **20** препринти (предстоящи за публикуване).

Освен това има и **4** публикации в научно-популярни издания.

Списъкът на всички работи подредени според импакт-фактора им е приложен в отделен файл.

Отчетът е построен последователно по секции, всяка съответстваща на една или няколко тясно свързани задачи от работната програма .

А. ОСНОВНИ НАУЧНИ РЕЗУЛТАТИ

I. Задачи № 1 и № 2 от работната програма

Участници: **С. Язаджиев, Д. Донева, П. Недкова**

[5,8,9,10,11,12,13,15,16,17,18,19,20,21,22,31,85,87,92,94,96,97,103,104]

(А) Структура, свойства, универсални съотношения и осцилации на неутронни звезди в общата теория на относителността и модифицираните гравитационни теории - работи [5, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 22, 92, 103].

С помощта на най-съвременни числени методи са конструирани решения описващи въртящи се неутронни звезди в общата теория на относителността

и масивните скаларно-тензорни теории на гравитацията, включващи и R^2 гравитацията [9, 10, 11, 92]. Изследвани са свойствата на въртящите се неутронни звезди като съотношенията маса-радиус-ъглов момент, инерчен момент (I) и квадруполен момент (Q) [9, 10, 11, 92]. Изследвани са също и универсалните съотношения, т.е. такива които не зависят от уравнението на състоянието на материята. Показано е, че подходящо нормираните зависимости $Q(I)$ и $I(C)$, където C е компактността на звездата, са наистина универсални и не зависят от свойствата на материята изграждаща звездата [10, 11, 16, 17, 18]. В [5, 9] е изследвано и електромагнитното излъчване от акреционни дискове около въртящи се неутронни звезди в общата теория на относителността и споменатите модифицирани теории на гравитацията. Показано е как чрез електромагнитното лъчение от акреционните дискове могат да се тестват гравитационните теории. В [17, 21] са пресметнати честотите на осцилациите за голям набор от въртящи се неутронни звезди в алтернативните теории на гравитацията и са определени количествените и качествените отклонения от общата теория на относителността. Построени са областите на нестабилност за млади, масивни и бързо въртящи се неутронни звезди в алтернативните теории на гравитацията и са намерени областите на нестабилност генериращи силно излъчване на гравитационни вълни. В [15] са построени нов вид астеросейсмологични съотношения между честотите и времената на затихване на гравитационните вълни от осцилиращи неутронни звезди. Тези съотношения зависят много слабо от уравнение на състоянието на ядрената материя и могат да бъдат използвани за определянето на параметрите на звездите, когато в бъдеще гравитационни вълни от подобни обекти бъдат регистрирани.

(Б) Класификация на решенията описващи компактни обекти с фотонна сфера и пространствени тунели (wormholes) в теории, в които тъмната енергия се описва с фантомно скаларно поле - работи [12, 22, 31, 94].

Използвайки основни аргументи базирани на теоремата за положителност на гравитационната енергия и функционалната зависимост между метричните и електромагнитните потенциали, са доказани класификационни теореми за решения описващи пространствени тунели с две асимптотически плоски области и компактни обекти с фотонна сфера. В хода на доказателствата са изведени също и фундаментални неравенства между асимптотичните заряди на пространствените тунели и фотонните сфери.

(В) Деформирани черни дупки и тяхната термодинамика [8, 13, 20, 85].

Тези работи са посветени на определен клас точни решения на уравненията на Айнщайн, известни като деформирани черни дупки. Такива решения се прилагат за описанието на квази-стационарни системи от черни дупки и гравитираща материя. Тяхното разглеждане се мотивира от факта, че астрофизичните кандидати за черни дупки не са изолирани обекти, а взаимодействат с определен тип материя, като акреционни дискове и звездни компоненти в двойни системи, т.е., черните дупки са потопени в гравитационното поле на външната материя, която ги деформира. В работа [20] за първи път са получени точни решения, които представляват черни дупки взаимодействащи както с външно материално разпределение, така и с външен източник на магнитно поле. Свойствата на тези деформирани решения са изучени в детайли.

(Г) Черни дупки в разширените скаларно-тензорни теории на гравитацията с Гаус-Боне член в действието [104].

В [104] е показано, че черните дупки на Шварцшилд са неустойчиви в рамките на разширените скаларно-тензорни теории на гравитацията с член на Гаус-Боне в действието. Тази неустойчивост се наблюдава при малки черни дупки с голяма кривина на хоризонта и води до фазов преход към нов тип черни дупки, които са числено конструирани в [104].

(Д) Заредени въртящи се черни дупки в Айнщайн-Максуел-дилатонната гравитация и тяхната термодинамика [96].

В работа [96] се разглежда клас от точни решения в рамките на Айнщайн-Максуел-дилатонната гравитация описващи въртящи се заредени черни дупки. Решенията са получени в резултат на прилагане на Калуца-Клайн трансформация върху съответното вакуумно решение. Изследвани са връзките между физическите характеристики на вакуумното и зареденото решение (маса, ъглов момент, заряд, електромагнитни потенциали) и са изведени определени общи съотношения.

(Е) Работа [87] е поканена обзорна глава на тема “Universal Relations and Alternative Gravity Theories” в заключителната книга "Physics and Astrophysics of Neutron Stars" на NewCompStar COST Action 1304, която ще бъде публикувана в престижната “Springer book collection on Astronomy and Astrophysics Library”.

II. Задачи № 3 и № 4 от работната програма

Участници: **Е. Нисимов, С. Пачева, М. Стоилов**

Публикации по задачи №3 и №4 от втория етап, и задачи №2 и №10 от първия етап: [4,6,32,38,41,48,54,60,64,66,70,71,75,76,93, 111]

(А) Единно описание на еволюцията на ранната и "късната" (от съвременната епоха) Вселена - работи [48, 54, 70, 111] по тематиката на задача №4 от работната програма за втория етап.

Тук е предложен нов клас модели на гравитация + материя в термини на две независими не-Риманови форми на обем върху пространство-времето многообразие. Първоначалното действие е построено така, че да бъде инвариантно относно глобални Вайлово-машабни трансформации. В резултат на динамично спонтанно нарушение на глобалната Вайлово-машабна симетрия и след преминаване към физическата Айнщайнова система намираме следните забележителни ефекти:

(i) Получен е ефективен потенциал за „инфлатона“ ("космологичното" скаларно поле) с две безкрайно дълги плоски области, което позволява единно описание както на ерата на "инфлация" в ранната вселена, така и днешната епоха на "тъмната енергия";

(ii) За определена област на параметрите на модела намираме не-сингулярно решение на "изплуваща" вселена ("emergent universe"), което описва начална фаза на несингулярно - без "голям взрив"! - начало/раждане на вселената, която фаза предшества "инфлационната" фаза.

Едно от главните достойнства на новия подход в космологията предложен в работи [48, 54,70,111] е предсказанието (при разумни минимални предположения) на стойностите на фундаментални за теорията на еволюцията на Вселената величини като енергийният машаб на ерата на "инфлацията" и енергийният машаб на съвременната епоха на доминантност на "тъмната енергия", които се потвърждават от неотдашните нашумели експериментални данни на голямата международна астрофизическа колаборация "Планк".

(Б) Обединително описание на динамиката на "тъмната енергия" и "тъмната материя" - работи [4, 6, 41,75, 93] по тематиката на задача №3 от работната програма за втория етап.

С помощта на метода на не-Римановите (не зависещи от метриката) пространствено-времени форми на обем е построен нов неканоничен космологичен модел на гравитация взаимодействаща с единствено скаларно поле, което дава в явен вид единно описание на "тъмната енергия" като динамично генерирана космологична константа, и "тъмната материя" като "прахообразен" флуид течащ по пространствено-времени геодезически линии, обединявайки ги като точна сума от приноси в съответния тензор на енергията-импулса. Също така е открита забележителна дуалност между гореописаната система от гравитация взаимодействаща с единствено скаларно поле с неканонично лагранжево действие, от една страна, и специален тип квадратичен чисто кинетичен космологичен модел от известния клас "k-essence" ("quintessential inflation" models) в стандартния смисъл на дуалност като "слаба-срещу-силна-връзка".

По-нататък, в работа [41] подробно са разгледани следствията на "k-essence" теорията от работа [6] за космологията. Изследвани са областите на валидност на параметрите, от които зависи теорията и зависимостта на плътността на енергията от тях. В различните области са получени както Вселена без, така и Вселена със, фазов преход на еволюцията ѝ. Използвани са данните за супернови от тип Ia за да бъде получено съответствие на модела с наблюденията.

(В) Динамично спонтанно нарушение на суперсиметрията - работа[71] по тематиката на задача №10 от работната програма за първия етап.

Това е по-нататъшно развитие на предложението от нас качествено нов механизъм за динамично спонтанно нарушение на суперсиметрията - суперсиметричен ефект на Brout-Englert-Higgs. По-специално ние разглеждаме нова модифицирана формулировка на стандартната минимална $N=1$ супергравитация с помощта на въвеждане на не-Риманова форма на обем (общо-координатно-ковариантна мяра на интегриране) върху съответното пространствено-времево многообразие. Тази нова формулировка естествено води до появата на динамично генерирана космологична константа като произволна интеграционна константа при решение на уравненията за движение за допълнителните гореспоменати тензорни калибровъчни полета. Наличието на динамично генерираната космологична константа именно означава спонтанно (динамично) нарушение на суперсиметрията.

По-нататък, прилагайки същия формализъм към анти-де Ситерова $N=1$ супергравитация ние успяваме чрез подходящ избор на споменатата по-горе произволна интеграционна константа да получим едновременно много малка физически наблюдаема космологична константа заедно с много голяма

наблюдаема физическа маса за гравитиното точно както се изисква в съвременните космологични сценарии за бавно разширяващата се вселена от днешната епоха.

(Г) Електро-вакуумни гравитационни "чували" - работа [38] по тематиката на задача №4 от работната програма за втория етап.

Тук предложеният в работи [48, 54, 70, 111] нов клас модели на гравитация + материя в термини на две независими не-Риманови форми на обем върху пространство-времето многообразие е разширен посредством включване на допълнително взаимодействие със специален нестандартен тип нелинейна електродинамика съдържаща квадратен корен от стандартния Максвелов лагранжиан за електромагнитното поле. Последната в плоско пространство-време (при отсъствие на гравитация) описва "удържане" (confinement) на електрически товари аналогично на кварковото "удържане" в квантовата хромодинамика. В присъствие на гравитация (и скаларно "дилатонно" поле) намираме нови физически интересни ефекти: (i) нетривиална фазова структура - фази на "удържане" (confinement) на товари и фази на "освобождение" (deconfinement) на товари; (ii) възникване на електровакуумни гравитационни "чували" със свойства аналогични на известните "MIT bags" и солитонните модели на "съставните кварки" (constituent quarks) във феноменологичните теории на кварковото "удържане".

(Д) Вселени със светоподобни пространствено-времеви "портали" (вселенски "тунели"/"червиеви дупки") = light-like thin-shell wormholes - работи [64, 76] по тематиката на задача №2 от работната програма за първия етап и задача №4 от работната програма за втория етап.

Работи [64, 76] са съществено развитие на предходни наши трудове, в които са пръв път в литературата е открит значим пропуск (след повече от 70 години) в класическата статия на Айнщайн и Розен от 1935 год., където е предложен знаменитият вселенски "мост на Айнщайн-Розен" (Einstein-Rosen "bridge") - исторически първият пример на "проходим" пространствено-времеви "портал" (traversable wormhole). Именно, ние показваме, че математически коректната формулировка на класическия "мост на Айнщайн-Розен" изисква на "портала" между двете вселени да бъде разположена специален вид "екзотична материя", която е светоподобна мембрана - частен пример от разработения от нас общ клас на светоподобни мембрани. Този резултат отсъства в класическата статия от 1935 год.

Същественият прогрес в работи [64, 76] се състои в явно построяване на разширението по Крускал-Пенроуз на пространствено-времето

многообразие на "моста" на Айнщайн-Розен като специфичен пример на "проходим" пространствено-времеви "портал" ("червеева дупка") с едно "гърло". Този резултат след това е обобщен за случая на физически още по-интересен "проходим" пространствено-времеви "портал" от "тръбовиден" тип с две "гърла", т.е., две некомпактни вселени свързани чрез една "тръбовидна" вселена с краен пространствен размер. Двете "гърла" са заети от две противоположно електрозаредени светоподобни мембрани, при което целият електричен поток е "заклучен" в средната тръбовидна вселена между двете мембрани - ефект напълно аналогичен на "удържането" на кварките в квантовата хромодинамика.

В работа [64] подробно е изследвана динамиката на пробни частици в "моста" на Айнщайн-Розен, с което не само е демонстрирана проходимостта му (т.е., безпрепятствено преминаване на „пътуващ наблюдател“ между двете „вселени“ за крайно собствено време на последния), но и е открит в явен вид наличието на затворена времениподобна траектория означаваща „пътуване назад във времето“. Последното свойство, типично за голям клас решения от тип „червееви дупки“, е един от най-крупните неразрешени парадокси в съвременната наука.

(Е) *Гравитационно индуцирано динамично спонтанно нарушение на калибровъчната симетрия в електрослабите взаимодействия - работи [32, 60] по тематиката на задача №4 от работната програма за втория етап.*

Тези трудове са експлицитна реализация на забележителна идея на Я. Бекенщайн в негова класическа работа от 1986 г. относно възможността за индуцирано от гравитацията спонтанно нарушение от Хиггсов тип на електрослабата калибровъчна симетрия във физиката на елементарните частици при високи енергии. Нашият резултат е постигнат благодарение на нетривиална модификация на стандартния модел на взаимодействие между гравитация и бозонния сектор на електрослабите полета с помощта на въведения от нас нов общ метод на не-Риманови форми на обем върху пространствено-времето многообразие.

Показано е, че в епохата на „късната“ Вселена благодарение на нетривиалното взаимодействие с гравитацията се поражда динамично ефективен скаларен потенциал от Хиггсов тип водещ до поява на нетривиално вакуумно средно на Хиггсовото поле – характеристичния белег за спонтанното нарушение на електрослабата калибровъчна симетрия, докато в епохата на „ранната“ Вселена Хиггсовото поле остава безмасово и там отсъства спонтанно нарушение.

Работа [32] е удостоена с honorable mention in *2016 Gravity Research Foundation Competition for Essays on Gravitation* (http://www.gravityresearchfoundation.org/pdf/2016_Awards.pdf).

(Ж) Стабилизация на космологичната динамика чрез нетривиална модификация на стандартната Айнщайнова теория на относителността - работа [66] по тематиката на задача №4 от работната програма за втория етап.

Класът от неканоничните разширени отвъд стандартната Айнщайнова теория на относителността теории на гравитацията взаимодействаща със скаларно „инфлатонно“ поле и полетата от бозонния сектор на електрослабите взаимодействия, изследвани в работи [6, 32, 60, 75] са обобщени по-нататък в работа [66] чрез добавяне на нетривиално взаимодействие на скаларния „инфлатон“, отговорен за единното описание на космологичната еволюция на Вселената (от „ранната“ към съвременната „късна“ епоха), с т.н. топологична плътност на Гаус-Боне. Присъствието на последната води до драматична модификация на ефективния скаларен потенциал на „инфлатона“ и Хиггсо-подобното изодублетно поле:

(i) полегат локален максимум при отрицателни стойности на „инфлатонното“ поле съответстващ на т.н. механизъм на “hill-top” („спускане от върха“) инфлация в „ранната“ Вселена и без спонтанно нарушение на електрослабата калибровъчна симетрия;

(ii) локален минимум при положителни стойности на „инфлатона“ съответстващ на стабилизация на динамиката в „късната“ Вселена с много малка стойност на ефективната космологична константа и с динамично породен механизъм на Хиггс.

III. Задача № 5 от работната програма

Участници: **П. Божилов, В. Петкова, М. Станишков**

Публикации: **[1,2,3,7,39,40,45,89,98,108]**

В работи [1] и [45] са построени основни величини за клас представяния на 2-мерна конформна теория с висок ранг – Тода теория, със симетрия $W(\mathfrak{sl}(4))$ - алгебра, която се получава с редукция от афинната $\mathfrak{sl}(4)$ Кац-Муди алгебра. Това са триточкови функции, свързани с произведения на локални оператори, фундаментална сплитаща матрица и 4-точкови функции, за които е намерено явно интегрално представяне. Забелязана е изненадваща връзка с

корелатори и сплитачи матрици на конформна теория на Вирасоро с нестандартен централен товар. Намерената фундаментална сплитача матрица се очаква да намери приложение в изследване на квазикласическото поведение на 3-точкови функции за тежки товари в суперсиметрични сигма модели. Изследвана е класическата граница на леки товари, възпроизвеждаща за 3-точковите функции изразите, намерени в струнна реализация на BPS полета в дуалната калибровъчна N=4 суперсиметрична 4-мерна теория в рамките на AdS₅/CFT калибровъчно/гравитационното съответствие.

В работа [7] е изведена 3-точковата корелационна функция за две тежки струнни състояния от тип гигантски магнони и лекия дилатонен оператор с нулев импулс в η -деформираното пространство-време AdS₅×S⁵, валидно за всички стойности на запазващия се струнен ъглов момент J и на деформационния параметър η в квазикласическа граница.

В работа [39] са пресметнати някои структурни константи (три-точкови корелационни функции) в η -деформираното пространство AdS₅ × S⁵ в рамките на квазикласическия струнен подход. Това е направено за случаите, когато „тежките“ струнни състояния са от тип „гигантски магнони“ с краен размер, съответстващи на магنونните възбуждения в дуалната полева теория. Те се комбинират с три типа „леки“ състояния: първични скаларни оператори, дилатонен оператор с ненулев импулс и синглетни скаларни оператори върху висши струнни нива. В работа [98] резултатите получени в [39] са използвани за получаване на водещите корекции дължащи се на крайния размер на „гигантските магнони“ в термини на запазващи се величини.

В работа [108] са намерени струнни решения също от тип „гигантски магнони“ за случая на Sch₅ × S⁵ пространство-време (нерелавистична конформна симетрия). Смята се че, тя е дуална на „dipole-deformed N=4 super Yang-Mills theory“.

В работа [40] са изследвани струни движещи се в пространство AdS₃×S³×S³×S¹ с ненулево B-поле и е получен е клас от решения.

В работа [89], представляваща пълният текст на дисертация за получаване на научната степен "доктор на науките", са представени част от изследванията, свързани с динамиката на p-брани и Dp-брани, дуалността между струнните теории/M-теорията и (конформните) полеви теории, както и някои квазикласически резултати за триточкови корелационни функции, отчитащи влиянието на крайния размер.

Трудове [2,3,90] се отнасят до намиране, изследване и използване на симетрии в двумерна конформна теория на полето и свързани с тях интегрируеми теории.

В работи [2,3] е изследван потока на ренормгрупата в специфични двумерни модели.

В представените статии са намерени бета-функцията, аномалните размерности и матрицата на смесване в т.нар двумерни $su(2)$ косет модели, пертурбирани от най-малко „релевантното“ поле (най-бавно променящо се в потока на ренормгрупата). Тези величини са пресметнати по два различни начина. Оказва се че матрицата на смесване е крайна и една и съща за всички тези теории и, в този смисъл, универсална.

В работа [90] са представени част от изследванията в областта на двумерните конформни теории, в частност такива с $N=1$ и $N=2$ суперсиметрия, както и техни обобщения. Представено е също изследване и възможно приложение на допълнителни симетрии в свързани интегрируеми модели.

В случая на $N=1$ и $N=2$ суперконформни теории са разгледани както рационални модели (с краен брой полета) така и теорията на супер-Лиувил като пример за нерационална теория. Намерени са корелационните функции и структурните константи в тези теории. Друг интересен проблем е разширяването на тези разглеждания за теории, дефинирани в двумерно пространство с граница, зададена от гранично условие, което запазва суперконформната симетрия. Като естествено обобщение са разгледани и така наречените косет теории и е представен метод за конструирането им за произволен ранг като (проективно) произведение на модели с по-нисък такъв. Изследвани са също симетриите и техните приложения за определени интегрируеми модели. Двумерната интегрируема теория на полето е класическа или квантова теория на полето, която притежава безкраен брой комутиращи интегрални на движение.

Тази

симетрия обаче не позволява намирането на интересните величини на системата поради

своя абелев характер. Най-простият пример за интегрируема теория е самата двумерна

КТП, инвариантна спрямо алгебрата на Вирасоро. Бидейки неабелева, тази симетрия

позволява намирането на диференциални уравнения за корелационните функции, пресмя-

тането на структурните константи на операторните разлагания и т.н.

IV. Задачи № 6 и № 16 от работната програма

Участници: **Р. Рашков, Х. Димов, Ц. Вецов, С. Младенов**

Публикации: [14,23,30,33,55,57,58,59,67,68,91,99]

Изследванията в тази група от трудове се фокусира върху широк кръг от съвременни проблеми свързани с важни конкретните задачи на холографската дуалност, но същевременно са и от концептуално значение за областта. Основните резултати от изследванията могат да се резюмират както следва:

(а) В работа [14] са пресметнати триточковата корелационна функция за два “струнни” оператора в контекста на пулсиращи струни, и един “гравитационен, използвайки холографската дуалност с калибровъчните теории. Тези корелационни функции съответстват на оператори при силна константа на връзката в теория на Янг-Милс с $N=4$ суперсиметрия.

(б) Друг клас от проблеми са посветени на идентифициране на дуалните физически наблюдаеми величини. Изследванията отразени в работи [57,67,91] . В тези работи за пръв път се конструират модели на мезони в специфичен гравитационен фон – фон на Пилх-Уорнър. Мезоните в този подход (работа [67]) се конструират с помощта на влагане на високо-мерни мембрани в гравитационния фон. Изследваните скаларни флуктуации водят до отместване в основните състояния, което е нов ефект в подобни изследвания. Резултатите са много важни за по-нататъшното развитие на холографското съответствие и изучаването на калибровъчните теории при силна константа на връзката. Те са сред малкото работи правещи първи стъпки в холографското съответствие при по-ниска или нарушена суперсиметрия.

(в) Аномалните размерности на операторите в дадена конформна полева теория са едни от основните величини необходими за пресмятането на корелационните функции. Тъй като не разполагаме с методи за тяхното пресмятане при силна константа на връзката, в работа [57] е използвана дуалността между струни и калибровъчни теории. Намирането на спектъра на аномалните размерности е от изключителна важност при определянето на физически релевантните оператори и пресмятането на корелационните функции.

(г) За коректното построяване на дуалността в моделите, използвани в работи [57] и [67], е необходимо да се удовлетворява стриктно така наречената капа-симетрия при влагането на Д7-браните в моделите. В работа [91] са намерени капа-симетричните влагания, което е сложна и трудоемка задача дори в далече по-прости конструкции.

(д) Холографска дуалност: деформирани холографски модели [33,58]. Най-реалистичните холографски модели притежават редуцирани симетрии, включително суперсиметрии. В работите [33,58] е построен такъв модел изхождайки от модел с известен супергравитационен фон, а именно супергравитационно решение на Пилх-Уорнър. За целта е обобщена неабелевата Т-дуалност приложена към този сложен, но важен от физическа гледна точка фон. Намерени са дуалната метрика и дву-формата на полетата на Невьо-Шварц откалибрирайки неабелевата изометрия на гравитационния фон. Сложният въпрос за намирането на дуалните полета на Рамон е решен с помощта на преобразованието на Фурие-Мукаи, познато от алгебричната геометрия. Разгледани са граници, в които теорията е интегрируема на класическо и квантово ниво. Такава граница е границата на Пенроуз при която теорията добива вида на полева теория във фон на паралелни плоски вълни. Изследвани в детайли са две такива граници. Тъй като границата на паралелни плоски вълни за оригиналната теория е известна, беше изучен въпросът за комутативността на двете операции – неабелевата Т-дуалност и границата на Пенроуз. Показано е, че тези операции комутират, като отбелязваме че твърдението е нетривиално поради факта, че трансформациите са неабелеви и необратими в общия случай.

(е) Холографска дуалност: висши производни и свойства на холографския модел на Пилх-Уорнър [30,59]

Работи [30,59] третират въпроса с появата на осцилаторни системи с висши производни в холографското съответствие. За да пристъпи към количествено изследване на класическите и квантови свойства на холографски модели чрез осцилатори с висши производни, в работите е изследвана ентропията на заплитане на система от свързани осцилатори на Паис-Уленбек. За целта е използван формализма на термо-полета. Следваща стъпка е влагането на такава система от осцилатори с висши производни в уравненията на квазикласическа струна във фон на Пилх-Уорнър, като нестабилностите на тези осцилатори е закодирана в критическите стойности на магнитното поле в холографския модел. Детайлното изследване на свързани системи от осцилатори, т. нар. Quivers, дава възможност за качествено и количествено изследване на холографски модели с критически параметри. От гледна точка

на теорията на информационните пространства, построена е метриката на Фишер, която е основна величина в характеризирани на физическите системи с нетривиална ентропия на заплитане.

(ж) Холографска дуалност: локални и глобални свойства [23,68,30,99]

Холографското съответствие през поледното десетилетие беше изучавано предимно в посока от обемащото пространство към полевата теория на асимптотичната му граница. Изследванията в обратната посока обаче все още представляват голямо предизвикателство. За целта данните от калибровъчната теория, като аномални размерности, корелационни функции и други характеристики, би следвало да могат дадат възможност за реконструкция на струнната/гравитационната теория в обемащото пространство. Една от ключовите характеристики за това е ентропията на заплитане на области на теорията върху границата, която в холографското съответствие е (частично) асоциирана със специфична минимална повърхнина в обемащото пространство (хипотеза на Риу-Такаянаги). В работи [23,68] е намерена разширената ентропия на заплитане в случай на бозонна струна във фон на плоски паралелни вълни. Този фон е характерен с това, че теорията е точно решима на класическо и квантово ниво. За целта е използван метода на термо полетата. Намерена е метриката на Фишер което по същество дава възможност за построяване на информационното пространство на теорията. Друг аспект на метриката на Фишер е, че дава възможност да се изследва фазовата структура на равновесни системи. Разглежданията и резултатите имат голяма общност, което е демонстрирано на примера на няколко модела а така също и някои модели от кондензираната материя и обобщение за някои неравновесни модели с дисипация.

В работа [99] отново е разгледан проблема за намиране на ентропията на заплитане на възбудените състояния в двумерни конформни полевы теории. Намерена е ентропията на заплитане до всички порядъци в три различни подхода – инвариантите на Грунски, полиномите на Фабер и, използвайки последните, чрез тау-функцията набездисперсионната йерархия на Тода. Тези резултати са от особена важност той като а) дават нови методи за пресмятане на ентропията на заплитане до произволен порядък и б) дават неочаквана връзка между ентропията на заплитане и интегрируемите йерархии.

(з) Лекционни курсове и работа с млади учени: Лекционния курс подготвен в този етап, а така също и курсът подготвен в предходния етап, спомогнаха за привличането на млади учени и студенти последна година за работа по

задачите на проекта. В резултат от тази дейност бяха защитени 3 магистърски тези, както следва:

- Васил Годоринов: „Базис в пространството от модули на неабелеви вортексни струни”
 - Иво Илиев: “Conformal Field Theory, Boundary States & D-branes”
 - Мирослав Радомиров: “Класически и квантови аспекти на вортекси и техните информционни пространства”
- Една докторска дисертация е пред защита.

V. Задача № 7 от работната програма

Участници: **Л. Ангелова**

Публикации: [26,27,56,63,77,102]

Поставени са основите на изучаването на композитни инфлационни модели чрез методите на калибровъчно-гравитационната дуалност. В работа [26] са намерени нови класове решения в ПВ супергравитацията, които са релевантни за изучаването на силно-взаимодействащия режим на определени калибровъчни теории в пространство на де Ситер. Това е от значение заради наличието на положителна космологична константа във Вселената. В работа [56] е разгледана модификация на решенията на [26], която отваря възможност за построяване на дуални гравитационни описания на модели на космологична инфлация от глоболен вид (т.е., модели в които инфлатона е глоболно състояние в силно-взаимодействащ сектор).

Калибровъчно-гравитационната дуалност позволява изследване на непертурбативния режим на определени калибровъчни теории на полето чрез (квази-)класични разглеждания в дуално гравитационно описание. Това прави достъпни за изучаване широк кръг въпроси, които са извън обхвата на пертурбативната теория на полето. Използвайки този метод, работа [27] построява дуален модел на Космологична Инфлация, дължаща се на композитен инфлатон във силно-взаимодействащ сектор, в режим на „ултра-бавно търкаляне”. Това е, по принцип, първият пресметаем модел с композитен инфлатон. В допълнение, режима на ултра-бавно търкаляне е от особено значение за аномалията, наблюдавана в спектъра на космичния микровълнов фон при нисък мултиполен момент. Въпреки това, този режим е твърде краткотраен, за да произведе достатъчно разширяване на Вселената. За да имаме цялостен инфлационен модел, е нужно преминаване към

инфлационен режим от тип „бавно търкаляне”. Работа [77] посочва потенциални начини за модифициране на гравитационното дуално решение на [27], така че да се получат дуални описания на инфлационни модели в режим на бавно-търкаляне. Работа [63] изследва детайлно една от тези модификации и показва че желаната деформация наистина съществува като решение на съответната система уравнения. С това се доказва съществуването на бавно-търкалящи инфлационни решения в рамките на тази конструкция, базираща се на калиборвъчно-гравитационната далност. Работа [102] изучава нов инфлационен режим, наречен „търкаляне с постоянна скорост”, който съдържа като частен случай ултра-бавното търкаляне. Намерен е широк клас нови решения, обобщаващи известните решения с ултра-бавно търкаляне. Също така е показано че новите решения (с постоянно, но не ултра-бавно, търкаляне) са съвместими със съвременните наблюдателни ограничения за стойностите на космологичните наблюдаеми величини. Това е първият известен клас инфлационни модели, който не е в режим на бавно търкаляне, но въпреки това е реалистичен. Поради тази причина, работа [4] отваря широко ново авеню в изучаването на космологията на ранната Вселена.

VI. Задача № 8 от работната програма

Участници: **В. Добрев, С. Стоименов**

Публикации: [36,46,49,51,53,61,62,69,79,81,86,106]

Общата задача е конструкцията на инвариантни дифференциални оператори за различни симетрийни обекти. Исторически подходът на Добрев произхожда от работата по такива оператори за конформната група в 4-мерно пространство-време. Подходът използва индукция на представянията от различни параболични подгрупи на конформната група. В работа [52] е направен кратък обзор на подхода и някои постижения.

Най-много досега е използван случаят, когато параболичната подгрупа е 11-мерна и изоморфна на групата на Поанкаре заедно подгрупата на дилатациите. Интересен е и случаят на 10-мерна параболична подгрупа, разгледан за пръв път в работа [46]. За случая са класифицирани приводимите индуцирани представяния и са класифицирани възможните инвариантни дифференциални оператори действащи между такива представяния.

Подобна задача е решена за алгебрата $su(4,4)$, която има конформни свойства но в 16-мерно пространство. Тук има повече индуцирани представяния, повече инвариантни дифференциални оператори, като резултатите са получени в предишни работи, а настоящата работа [48] е сумираща всички резултати.

Споменатият подход бе обобщен преди време от Добрев за едно-параметрична деформация на конформната алгебра в 4-мерно пространство-време. В работа [60] е направена заявка за нова многопараметрична деформация на конформната алгебра съгласувана с нова многопараметрична деформация на 4-мерно пространство-време на Минковски.

Споменатият подход бе обобщен преди време от Добрев и за суперсиметричния случай. Най-напред бе разгледана (заедно с В.Петкова) суперсиметричната алгебра в 4-мерно пространство-време като бе направена пълна класификация на унитарните представяния в положителна енергия (работа с над 270 цитата). След това Добрев реши подобна задача за суперсиметричната алгебра в 6-мерно пространство-време. От известно време Добрев работи заедно с Р.Б.Жанг първо, а напоследък с И.Салом по решаване на тази задача за супералгебрата $osp(1/2n, R)$. Общата класификация (започната с Жанг) бе постигната и изложена в работа [67]. Тук е дадена постановката и са разгледани характеристиките на тези представяния. Има и важни детайли, които са разгледани в работа [83] за $n=3$ и в работа [50] за $n=4$.

Най-накрая споменаваме работа [46], която може да се отнесе към задача 5 от работната програма. Тя е в изпълнение на програма на Добрев за конструиране на инвариантни оператори *boundary-to-bulk* в рамките на съответствието AdS/CFT. Това е една кратка работа, в която е предложено ново описание на обемащото (bulk) пространство като фактор-пространство на Секигучи $SO(q,2)/SO(q,1)$, което ще използваме по-нататък в случая на q -мерно пространство-време на Миковски и $(q+1)$ -мерно обемащо пространство.

В основата на многобройните приложения (теория на струните, двумерни фазови преходи, квантов ефект на Хол) на конформната инвариантност е геометричната дефиниция на конформните трансформации като локални координатни трансформации, които запазват ъглите между точките от пространство-времето. В работа [81] е намерена алгебрата на динамични симетрии на уравнението на Болцман, която е изоморфна на крайно-мерно представяне на конформната алгебра, и е наречена мета-конформна алгебра. Мета-конформни трансформации включват стандартните (орто)конформни трансформации, но в общия случай не запазват ъглите между точките.

В работи [36,62] е приложена чисто алгебрична процедура за намиране на физически релевантна форма на двуточковата функция ковариантна спрямо мета-конформна алгебра.

В работа [106] са намерени представяния на мета-конформната алгебра за $D > 1$ пространствени измерения като алгебри на динамични симетрии на уравнението на транспорта. Само за $D=2$ съществува безкрайно-мерно представяне на мета-конформната алгебра със структура – пряка сума на три Вирасоро алгебри и подалгебра - стандартната конформна алгебра.

VII. Задача № 9 от работната програма

Участници: **Л. Хаджииванов (и И.Тодоров за работа 52)**

Публикации: **[43,44,52,82]**

Резултатите, получени в работа [82], имат отношение към въпроса за „вътрешната“ симетрия, диктуваща т.нар. „правила на сливане“ на определени базови модели на двумерната конформна квантова теория на полето. Тези правила са своеобразни аналози на законите за събиране на заряди, съответстващи при по-високи размерности на пръстена от крайномерни представяния на компактна „калибровъчна“ група. В разгледания случай е показано, че естественото представяне на симетрия от типа на динамична квантова група може да се опише в термини на определена съвкупност от диаграми на Юнг. Работа [43,44], състояща се от две части, съдържа самосъгласувано описание на подхода, който води до горния резултат. В първата част е разгледана детайлно класическата теория на т.нар. модел на Вес-Зумино-Новиков-Уитен (WZNW, върху група на Ли $SU(n)$ и цяло положително ниво k) и произхода на симетрията на Поасон-Ли на неговите „кирални“ компоненти. Прилагайки принципа на каноничното квантуване, във втората част е получено естествено квантово-групово описание на съответната „обобщена калибровъчна“ симетрия. В него състоянията на унитарния WZNW модел разпъват „физическото пространство“ – интерпретация, произтичаща от аналогията с квантуване на калибровъчни теории в ковариантна калибровка. Една от причините за интереса към областта, съществено свързана със статистика на групата на плитките, е в нейното потенциално приложение към т.нар. топологични квантови компютри.

Работи [52] и [P4] проследяват подробно развитието както на идеята, така и на опитната проверка на известния мислен експеримент на Айнщайн-

Подолски-Розен (1935), преформулиран по-късно в термини на дискретни (спинови) променливи от Дейвид Бом. Възникналата "философска дискусия" между Н. Бор, А. Айнщайн и Е. Шрьодингер получава по-късно, благодарение на Джон Бел, проверяема физична формулировка. Нарушаването на неравенствата на Бел при квантови преплетени състояния отхвърля възможната класическа интерпретация със скрити параметри. В статията е предложен подобрен извод на теоретичната постановка, както и обзор на развитието на съответните експерименти, кулминиращи в прецизните опити на Ален Аспе. Значението на тази област на квантовата физика е подчертано от Р. Файнман, който обръща специално внимание върху възникващата възможност за създаване на квантов компютър.

VIII. Задача № 10 от работната програма

Участници: **Т. Попов**

Публикации: [80,107]

Основният резултат на работи [80,107] е доказването на хипотезата на Кроб и Тибон, която гласи, че алгебрата затворена от диагоналните елементи в матричната алгебра на регулярните функции върху квантовата група $GL_q(n)$ е дадена кубична алгебра, която се нарича квантова псевдо-плактична алгебра. Ключ за решаването на задачата е въвеждането на пред-плактичната алгебра, която може да бъде обяснена като операден вариант на квантовата псевдо-плактичната алгебра или като нейн дуален обект спрямо дуалността на Шур-Вейл. Пораждащите примитивни елементи на хопфовата пред-плактичната алгебра могат да се поставят във взаимно-еднозначно съответствие с алтерниращи пермутации (или „змии“ в терминологията на Арнолд). „Змиите“ от даден ред възникват като инварианти в теория на сингуларностите на Арнолд. Нещо повече, „непримитивните“ факторизуеми елементи на пред-плактичната алгебра също могат да се поставят в съответствие със „змии“. От комбинаторна гледна точка, змиите ще съответстват на обект, който предхожда диаграмите на Юнг, и възникват като граници на такива диаграми. Така една квантова функция на Шур индексирна с дадена диаграма на Юнг се разлага на сума от различни „змии“. Тези комбинаторни наблюдения отварят широко поле за изследване и въпроси за приложение на некомутативните функции към теорията на сингуларностите на Арнолд.

IX. Задача № 11 от работната програма

Участници: **Н. Стоилова**

Публикации: [34,35,37,74,84,105]

Работите са посветени на обобщени статистики в квантовата теория и математически апарат за тяхното изследване, а именно теорията на представянията на супералгебрите на Ли. Стандартната квантова механика разглежда два типа частици – бозони и фермиони и съответните квантови статистики – Бозе-Айнщайн и Ферми-Дирак статистики. Грийн обобщава тези статистики през 1953г., въвеждайки т.н. парафермионни и парабозонни статистики. Смесена система от парафермиони и парабозони е също свързана с математична структура: тя съответствува на супералгебрата на Ли $osp(2m+1|2n)$ и на нейно обобщение. В [34,74,105] е намерено решение на проблема, който е бил отворен за решаване от 1953г., именно построени са пространствата на Фок за смесена система от парабозони и парафермиони в явен вид. Мотивацията за тези работи е факта, че комбинирани системи от парабозони и парафермиони за ред на статистиката $p = 2$ са кандидати за частици на тъмната енергия и материя. Следствие от връзката парастатистики – супералгебрата на Ли $osp(2m + 1|2n)$ и нейното обобщение $pso(2m+1|2n)$ е, че парастатистическите пространства на Фок $V(p)$ съответстват на безкрайномерни неприводими представяния на $osp(2m+1|2n)$ и $pso(2m+1|2n)$, с младшо тегло $(-p/2, \dots, -p/2 \quad | \quad p/2, \dots, p/2)$ и за явната им конструкция е използвано разложението $osp(2m + 1|2n) \supset gl(m|n)$ и ковариантните тензорни представяния на $gl(m|n)$, построени преди това в явен вид. Приложеният метод даде също описание на представянията на $osp(2m + 1|2n)$ до представяния на $u(m|n)$ (или $gl(m|n)$). Характерът на $V(p)$ беше даден в термини на суперсиметрични функции на Шур. В [37] за $osp(2m + 1|2n)$ модулите $V(p)$ е намерена формулата за суперразмерностите им и е доказано съответствието $osp(2m + 1|2n) \sim so(m-n)$ по отношение суперразмерност – размерност на съответните неприводими модули. За разглеждане на комбинирана система от безброй много парабозона и парафермиона като първа стъпка е въведен нов, т.н. нечетен базис на Гелфанд-Цетлин за класа от ковариантни представяния на $gl(n|n)$. Базисът следва разложението на $gl(n|n)$ само по подалгебри, които са супералгебри на Ли, след което резултатите са разширени до клас от неприводими модули на безкрайномерната супералгебра на Ли $gl(\infty|\infty)$. Тези проблеми са решени в [35]. Изучени са (работа [84]) някои Ли супералгебрични обобщения на статистиката в квантовата механика, като в основата е заложено по-общото понятие за квантова система, при което не се изисква с необходимост операторите на

координатите и импулсите да удовлетворяват каноничните комутационни съотношения (ККС).

Въведено е важното понятие за Вигнерова квантова система: това са квантови системи, за които се изисква да са изпълнени условията за еквивалентност на уравненията на Хайзенберг и Хамилтон и всички други естествени за всяка квантова система аксиоми. Система от 2 частици, взаимодействащи с осцилаторен потенциал и когато относителните координати и импулси генерират супералгебрата на Ли $osp(3|2)$ е изследвана като Вигнерова квантова система. В този случай основният резултат е, че орбиталният ъглов момент може да приема не повече от три цели или полуцели стойности. Интересно е, че при определено представяне механичното движение на две точкови безспинови частици води до ъглов момент $1/2$. Това се явява всъщност спинът на съответната обединена система, резултат който не може да бъде получен в рамките на каноничната квантова механика.

Х. Задачи № 12 и № 15 от работната програма

Участници: **Н. Николов (№12,№15), Д. Недановски (№12)**

Публикации: **[28,50,83,88,110]**

В рамките на задача №12 е завършена работата по доразвиване на апарата на Николов-Стора-Тодоров в теория на пренормировките и адаптирането му към масивни модели. Въз основа на това е публикувана статия [28].

Подходът на Николов-Стора-Тодоров е първоначално развит в рамките на безмасовите модели [50], поради изключителната роля на хомогенността на корелационните функции там (пряко следствие от мащабната инвариантност). В масивни теории на полето, обаче се налага премащабиране и на масата, което е постигнато в работата [88] (виж също и [83]) по начин, който е съвместим с основния принципа за локалност (локална причинност) в квантовата теория на полето.

В рамките на задача №12 са и работите [88,83]. В тези работи е намерен общ подход към вертексни алгебри, излизащ извън рамките на глобално конформно инвариантните теории на полето. В този контекст, вертексните алгебри са наречени ОРЕ алгебри (алгебри на операторни произведения). Предимство на развитият подход е, че той допуска формулировка и над изкривено пространство-време, понеже в него специално е отделена ролята на транслационната симетрия.

В рамките на задача №15 са подготвени първите две части (виж. [3]) от книгата по „Лекции по квантова теория на полето и елементарните частици”, която ще бъде с общ обем от около 300 страници. Тези части отговарят на две, до известна степен, самостоятелни изложения на дисциплината, като първата част е за читатели (преди всичко неспециалисти, нефизици), които искат да придобият най-общо понятие за областта. Втората част е изложение на средно ниво, което е предназначено за студенти по физика специализиращи в областта на физика на високите енергии. Материалът е съпътстван с редица самостоятелно подготвени илюстрации. Технически трудности свързани с обработката на илюстрациите към книгата, възпрепятстваха приключването на книгата.

XI. Задача № 13 от работната програма

Участници: **И. Тодоров**

Публикации: [29,42,47,65,72,73,100,101,109]

Трудове [29,42,73] представляват задълбочен преглед с нови съществени акценти от един от неговите създатели на подхода на Николов-Стора-Тодоров към теория на ултравиолетовите пренормировки в конфигурационно пространство на Файнманови диаграми в квантовата теория на полето и дълбоките взаимовръзки с теория на числата. Основна роля тук играе релятивисткият принцип на причинността, който чрез т.н. причинна факторизация свежда процедурата на ултравиолетова преномировка на произволни Файнманови диаграми до пренормировка на примитивно разходящи се диаграми (т.е., такива без „припокриващи се“ разходимости). Демонстрирано е отсъствието на инфрачервени разходимости в безмасови пренормирани диаграми извън масовата повърхност. Подробно е разяснена ролята на хиперлогаритмите и стойностите на многократните зета-функции в пренормираните Файнманови амплитуди – област от значителен интерес за широк кръг специалисти – от теория на елементарните частици до теория на числата (виж също [47,72]).

Работи [100,109] са посветени на използване на иновативен подход основан на изключителните алгебри на Йордан за извеждане и изследване симетриите в стандартния модел на елементарните частици.

Работи [65,101] имат обзорен характер. Работа [65] е задълбочен анализ на приносите на двама класика – Галилео и Кеплер – и техния противоречива роля за формирането на основите на съвременната физика. Работа [101] е

обзор на забележителното наследство на наскоро починалия проф. Раймонд Стора - един от най-известните учени физици-теоретици на нашето съвремие.

XII. Задача № 14 от работната програма

Участници: **Л. Георгиев**

Работи: **[24,25,78]**

В работи [24,25] е изследвана зависимостта на коефициента на Зийбек (Seebeck) за Холовото състояние с $\nu_H = 5/2$ от температурата, потока на Ааронов-Бом и потенциала на гейта на едно-електронен транзистор, формиран от два квантови точкови контакта в силно корелиран двумерен електронен газ. Получените резултати показват, че профилът на коефициента на Зийбек е достатъчно чувствителен към неутралните степени на свобода и могат евентуално да бъдат използвани за експерименталното потвърждение за съществуването на неабелева брейд-статистика на квазичастиците.

В работа [78] се изследват термоелектричните характеристики на Z_k -симетрични парафермионни кулонови острови в контекста на физиката на квантовия ефект на Хол, в частност – неабелевите аниони в топологичното квантово пресмятане, чрез използване на методите на рационалната конформна квантова теория на полето.

Б. РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Б1. Основните резултати са докладвани на следните международни и национални конференции:

Б1.1. Международни конференции:

- (1) 3rd Caribbean Symposium on Cosmology, Gravitation, Nuclear and Astrophysics (STARS-2015), Havana, Cuba (Е. Нисимов, С. Пачева);
- (2) Karl Schwarzschild Meeting (KSM-2015), Frankfurt am Mein, Germany (Е. Нисимов, С. Пачева);
- (3) XI-th International Workshop "Lie Theory and Its Applications in Physics", Varna, Bulgaria - 12 доклада (И. Тодоров (*пленарен*), Е. Нисимов, С. Пачева, П. Божилов, Л. Ангелова, Л.Георгиев, Л. Хаджииванов, Н. Николов, Т. Попов, Н. Стоилова, С. Стоименов, А.Ганчев);

- (4) "Integrable Systems and Quantum Symmetries" - ISQS-23, Prague, Czech Republic (В. Петкова, *пленарен*);
- (5) "Supersymmetries and Quantum Symmetries" - SQS'2015, Dubna, Russian Federation - *3 пленарни доклада* (В. Добрев, В. Петкова, И. Тодоров);
- (6) 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union, Istanbul, Turkey (Н. Стоилова);
- (7) XX International Workshop on *Quantum Systems in Chemistry Physics and Biology*, September 14, 2015, Varna, Bulgaria (И. Тодоров);
- (8) Humboldt Kolleg "*Open Problems in Theoretical Physics: the Issue of Quantum Spacetime*", September 20, 2015, Corfu, Greece (И. Тодоров);
- (9) (Non-)Universal Properties of Neutron Stars, May 2015, Bremen, Germany (С. Язаджиев)
- (10) IX International Symposium "*Quantum Theory and Symmetries*", 13-18.7.2015, Yerevan, Armenia (В. Добрев)
- (11) International Conference on *p-Adic Mathematical Physics and Its Applications*, 7-12.9.2015, Belgrade, Serbia (В. Добрев)
- (12) International Workshop on *Noncommutative Field Theory and Gravity*, 21-27.9.2015, Corfu, Greece (В. Добрев)
- (13) "*Fourteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity – MG14*", 12-18 July 2015, Rome, Italy (П. Недкова)
- (14) International Conference "Particles, Strings and Cosmology" (PASCOS), Trieste, Italy, 29.06.2015-03.07.2015 (Л. Ангелова)
- (15) International Workshop „*Groups and Rings, Theory and Applications*“, Sofia Bulgaria, 2015 (Т. Попов).
- (16) I. Todorov, *Relativistic causality and position space renormalization* (10 pages), posted at the Raymond Stora Memorial meeting, CERN, December 4, 2015.
- (17) The 2015 European School of High-Energy Physics, Bansko, Bulgaria, 2 - 15 September 2015.: постер на тема „Non-Abelian T-Duality and string theory“, S. Mladenov, R. C. Rashkov, T.
- (18) „Models of gravity: Black Holes, Neutron Stars and the structure of space-time“, 4-7.10.2016 г. в Олденбург, Германия. – 3 доклада (Донева, Недкова, Язаджиев);
- (19) Annual NewCompStar Conference, 25-29 April 2016, Истанбул, Турция – 2 доклада (Донева, Язаджиев);
- (20) Jacob Bekenstein International Memorial Conference, July 2016, Mitzpe Ramon (Israel)– 2 доклада (Нисимов, Пачева);
- (21) Research Training Group "Models of gravity" Renewal Conference, 04-07 October 2016, Oldenburg, Germany – 3 доклада (Донева, Недкова, Язаджиев);

- (22) “String Phenomenology” Conference, June 2016, Ioannina (Greece); доклад Ангелова
- (23) Conference “String Ination after Planck”, September 2016, Liverpool (United Kingdom); пленарен доклад: Ангелова
- (24) Annual conference of COST action MP1405, Zakopane, 7-12.2.2016; доклад Добрев;
- (25) 24th Colloquium `Integrable Systems and Quantum Symmetries', Prague, 14-18.6.2016. пленарен доклад Добрев;
- (26) "Research Trimester on Multiple Zeta Values, Multiple Polylogarithms, and Quantum Field Theory" in ICMAT (Madrid) 2016, доклад Тодоров.
- (27) Workshop “Quantization, Dualities and Integrable Systems”, June, Istanbul 2016; доклад Попов;
- (28) V Postgraduate Meeting on Theoretical Physics, Oviedo, 2016: С.Младенов.
- (29) Quantum Structure of Spacetime and Gravity, Belgrade, 2016, С.Младенов.
- (30) Joint Meeting on Quantum Fields and Nonlinear Phenomena, 2016, Sinaia, Romania, poster, С.Младенов.
- (31) X-th International Symposium on Quantum Theory and Symmetries with XII-th International Workshop "Lie Theory and Its Applications in Physics", June 2017, Varna (Bulgaria) 12 доклада : Тодоров, Нисимов, Стоилова (пленарни), Ангелова, Вецов, С. Младенов , Николов, Недановски, Палев, Попов, Станишков, Стоименов.
- (32) “*String Pheno 2017*” Conference, July 2017, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia (USA); доклад : Ангелова;
- (33) XVII International Conference on Symmetry Methods in Physics, Yerevan, 9-15.7.2017. пленарен доклад Добрев;
- (34) Workshop 'Supersymmetries and Quantum Symmetries', Dubna, 31.7-5.8.2017. пленарен доклад Добрев;
- (35) NewCompStar Annual Conference 2017, Warsaw, Poland, 27-31.3.2017 – 2 доклада (Донева, Язаджиев);
- (36) BASIC 2017, February 2017–Bahamas Advanced Study Institute Conference, Stella Maris, Long Island (Bahamas) – 2 доклада (Нисимов, Пачева);
- (37) MATHYS9 - 9th Mathematical Physics Meeting: School and Conference on Modern Mathematical Physics, September 2017, Belgrade (Serbia) – 2 доклада (Добрев, Нисимов);
- (38) 11th International Conference on Clifford Algebras and Their Applications in Mathematical Physics (ICCA11), Ghent, Belgium, 7-11 August 2017; доклад Стоилова.

(39) „Quantum Physics and Gravity“ - Schroedinger Institute, Vienna, Austria. June 2017., доклад (Рашков).

(40) 19th international conference Geometry, Integrability and Quantization, 2-7 юни, Варна, 2017 – 2 доклада (Вецов, Донева);

Б1.2. Национални конференции:

(1) Трети национален конгрес по физически науки с участие на български учени от чужбина, 29.09.-02.10.2016, София; 15 доклада : Вецов, Добрев, Донева, Младенов, Недановски, Николов, Нисимов, Пачева, Петкова, Станишков, Стоилов, Стоилова, Стоименов, Христов, Язаджиев,

(2) Matey Mateev Symposium in commemoration of 75th Anniversary (ММ-15), Sofia University, Sofia, Bulgaria - 6 доклада (И. Тодоров, Е.Нисимов, В. Добрев, Р.Рашков, Л. Ангелова, Ц.Вецов).

(3) Сто години физика на пространство времето, Физически факултет на СУ, София, ноември 2015 г.: „„Представяния на групата на Поанкаре“ - Ц. Вецов.

(4) Двудневен теоретичен семинар проведен изцяло от участниците в проекта, декември 2015 г., Пловдивски университет: „Въведение в теорията на суперструните“ - Ц. Вецов, С. Младенов.

Б1.3. Участие на млади учени в международни форуми:

д-р Цветан Вецов и докторант Стефан Младенов взеха участие в :

(1) *Belgrade 2015 – Supergravity, CERN – SEENET-MTP PhD Training Program, June 21-28, 2015.*

(2) *The 2015 European School of High-Energy Physics, Bansko, Bulgaria, 2 - 15 September 2015.*

(3) *Humboldt Kolleg, Open Problems in Theoretical Physics: the Issue of Quantum Space-Time, Corfu, Greece, 18-22 September, 2015.*

(4) *Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity, Corfu, Greece, 21 - 27 September, 2015.*

Б2. Лекции и доклади по покана в чуждестранни университети и акад. центрове:

(1) I. Todorov, *Quantum entanglement*, Lecture at Koc University, Istanbul, Turkey, March 24, 2015.

(2) Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva (Israel) - 4 доклада (Е. Нисимов, С. Пачева);

- (3) Institut de Physique Theorique, Saclay (France) (В. Петкова);
- (4) Department of Applied Mathematics, Computer Science and Statistics, University of Ghent, Ghent (Belgium) (Н. Стоилова);
- (5) Theoretical Astrophysics, Department of Physics, University of Tuebingen, Germany (С. Язаджиев)
- (6) Department of Mathematics, University of Tuebingen, Germany (С. Язаджиев)
- (7) Theoretical Astrophysics, Department of Physics, University of Tuebingen, Germany (Д. Донева)
- (8) Center for Research & Development in Mathematics and Applications, University of Aveiro, Portugal (С. Язаджиев)
- (9) Institute for Theoretical Physics, University of Leipzig, Germany (С. Язаджиев)
- (10) Семинар към Математическия департамент на Университета на Женева, (Н. Николов)
- (11) Institute colloquium talk, Vienna University, March 2015: - Н. Dimov, R. C. Rashkov.
- (12) Institute for theoretical Physics, Vienna University of Technology, : (R.C. Rashkov, 3 доклада)
- (13) NORDITA, Stockholm, Sweden (R.C. Rashkov, 2 доклада)
- (14) Department of Physics, University of Swansea, UK, 06.02.2015 (Л. Ангелова)
- (15) Theory Group, National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania, 11.12.2015 (Л. Ангелова)
- (16) University of Witwatersrand, Wits, January 2016, Johannesburg (South Africa);
- (17) University of Pretoria, February 2016, Pretoria (South Africa), *colloquium*;
- (18) University of Michigan, May 2017, Ann Arbor, Michigan (USA);
- (19) University of Cincinnati, May 2017, Cincinnati, Ohio (USA);
- (20) William & Mary College, July 2017, Williamsburg, Virginia (USA).
- (21) Koç University - Science Department, Istanbul, Turkey (Т. Попов)
- (22) V.K.Dobrev, “*Group-theoretical methods with applications to CFT*”, course of 3 lectures, October 2015, SISSA, Trieste, Italy.
- (23) ESI, Vienna, R.C. Rashkov, June 2017.
- (24) Department of Physics, Oldenburg University, Germany - Д. Донева;
- (25) Nis University & SEENET Colloquium - R. C. Rashkov.
- (26) Т. Попов, лекции по “*Математични Методи на Физиката*” в African University of Science and Technology, Abuja, Nigeria + един защитил дипломант на тема "Elementary Scattering Processes".

Б3. Семинарни доклади в България

(27) ИЯИЯЕ-БАН, София - множество доклади (И. Тодоров, Е. Нисимов, С. Пачева, Т. Попов, В. Добрев, П. Божилов, М. Станишков, Н. Стоилова, Л. Хаджииванов).

(28) Институт по математика и информатика – БАН (Т. Попов)

Б4. Защитени дисертации по тематиката на Договора:

(1) **Пламен Божилов** – защитена дисертация за получаване на научната степен „доктор на науките“ на тема "*P-Branes Dynamics, AdS/CFT and Correlation Functions*".

(2) **Людмил Хаджииванов** – защитена дисертация за получаване на научната степен „доктор на науките“ на тема „*Двумерна квантова теория на полето и квантови групи като обобщени калибровъчни симетрии*“

(3) **Недялка Стоилова** - защитена дисертация за получаване на научната степен „доктор на науките“ на тема "*Представяния на базисни класически супералгебри на Ли и обобщени квантови статистики*"

(4) **Мариян Станишков** - защитена дисертация за получаване на научната степен „доктор на науките“ на тема "*Симетрии в двумерни конформни теории на полето и свързани с тях интегрируеми модели*"

(5) **Димитар Недановски** - защитена дисертация за получаване на научната степен „доктор“ на тема "*Суперконформни вертексни алгебри в четимерно пространство-време*"

Б5. Международно Сътрудничество

(1) Prof. Eduardo Guendelman (Dept. Physics, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel)

(2) Prof. Ramon Herrera (Instituto de Física, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile)

(3) Prof. Pedro Labrana (Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío-Bío, Concepcion, Chile)

(4) Prof. Changrim Ahn (Ewha Woman's University, Seoul, Rep. of Korea)

(5) Prof. Paolo Furlan (Dipartimento di Fisica dell'Università di Trieste, Trieste, Italy)

(6) Prof. Joris van der Jeugt (Department of Applied Mathematics, Computer Science and Statistics, University of Ghent, Ghent, Belgium)

(7) Prof. Kostas Kokkotas (Theoretical Astrophysics, Department of Physics, University of Tuebingen, Germany)

(8) Prof. Jutta Kunz (Institut für Physik, Universität Oldenburg, Oldenburg, Germany)

- (9) Dr. Shohreh Abdolrahimi (Theoretical Physics Institute, University of Alberta, Edmonton, Canada)
- (10) Prof. Michel Dubois-Violette (Laboratoire de Physique Théorique, Orsay, France)
- (11) Prof. Tekin Dereli (Koç University, Istanbul, Turkey)
- (12) Prof. P. Suranyi (University of Cincinnati, Ohio, USA)
- (13) Prof. L.C.R. Wijewardhana (University of Cincinnati, Ohio, USA)
- (14) Prof. Patrick Moylan, (Penn State University, USA)
- (15) Prof. Lorian Bonora (SISSA, Trieste, Italy)
- (16) Dr. Alessio Marrani (Padova University, Italy)
- (17) Prof. Naruhiko Aizawa (Osaka Prefecture University, Japan)
- (18) Dr. Igor Salom (Institute of Physics, Belgrade)
- (19) Prof. Konstantin Zarembo (NORDITA – Stockholm, Sweden).
- (20) Prof. Daniel Grumiller (ITP, Vienna University of Technology, Austria)
- (21) Prof. Anton Rebhan (ITP, Vienna University of Technology, Austria)
- (22) Prof. Piotr Cruściel (Institute for Gravitational Physics, Vienna University)
- (23) Prof. Klaus Fredenhagen (Universität Hamburg, II. Institut für Theoretische Physik, Hamburg, Germany)
- (24) Prof. Anastasios Petkou (Aristotle University, Thessaloniki, Greece)
- (25) Prof. N. Stergioulas (Aristotle University, Thessaloniki, Greece)
- (26) Prof. T. Sotiriou (University of Nottingham, Nottingham, Great Britain)
- (27) Dr. G. Pappas (University of Lisbon, Lisbon, Portugal)
- (28) Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

В. ЗНАЧИМОСТ НА ОСНОВНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Научният проект по настоящия Договор е съсредоточен изцяло върху фундаменталните научни изследвания, вследствие на което главната стойност на получените основни резултати се състои изключително в натрупването на нови знания за фундаменталните природни закони и структурата на материята в енергийно-размерни мащаби от космологически до субатомни.

Нашите резултати допринасят за дългосрочната програма на международната общност от учени в областта на физиката на елементарните частици при високи енергии, астрофизиката и космологията, търсещи отговори на такива важни концептуални научни проблеми като природата на "тъмната материя" и "тъмната енергия" във Вселената, съществуването на допълнителни измерения на пространство-времето, суперсиметрия, астрофизически и

микроскопични черни дупки, космически пространствено-времеви „портали“ ("червееви дупки" ("wormholes")).

По-конкретно, значимостта на основните резултати се състои в:

(i) Принос към по-дълбокото и по-точно изучаване на свойствата на еволюцията на Вселената, на разгадаване мистерията на "тъмната енергия" и "тъмната материя" - нейните два основни градивни елемента (95 %); по-дълбоко разбиране на същността на стандартния модел на елементарните частици и по-конкретно основните причини за възникването на неговата квинтесенция - спонтанното нарушение на калибровъчните симетрии.

(ii) Принос към по-дълбокото разбиране на структурата и свойствата на релятивистките звезди в общата теория на относителността и модифицираната гравитация, както и на излъчването на гравитационни вълни от тях.

(iii) Принос към по-детайлното разбиране на компактните обекти с фотонна сфера и природата пространствено-времевите вселенски "портали" (wormholes), чието предполагаемо експериментално откритие е една от главните парадигми в съвременната теория на гравитацията и астрофизиката.

(iv) Принос към по-дълбокото разбиране на структурата, свойствата и устойчивостта на черните дупки в общата теория на относителността и модифицираните теории на гравитацията.

(v) Принос към изучаването на космологичната еволюция на ранната Вселена. По-точно, резултатите са важна стъпка към по-обстойно разбиране на това какви механизми могат да доведат до период на инфлационно разширение и какви инфлационни режими са съвместими със съвременните наблюдателни данни.

(vi) Принос за по-дълбокото разбиране на физическата същност на знаменитата гравитационно-калибровъчнополева или холографска дуалност; крачка напред в рамките на усилията на голям брой елитни школи и учени по света в областта на съвременната теория на струните да се намери математически самосъгласуван и последователен извод, от най-основните принципи на теоретичната и математическа физика, на динамиката на гравитационно-калибровъчната дуалност. Окончателната формулировка на гравитационно-калибровъчната (холографската) дуалност от "първи

принципи" може да се окаже революция във физиката сравнима с революциите произтекли от откритието на теорията на относителността и квантовата механика в началото на миналия век.

(vii) Принос към детайлното изследване на ролята на ентропията на сплитане в холографските теории. Резултатите откриват нова неподозирана дълбока връзка между локалните и глобални характеристики в гравитационно-калибровъчнополевата дуалност, от една страна, и йерархии от интегрируеми (точно решаеми) системи от нелинейни еволюционни уравнения, от друга страна.

(viii) Принос за разкриване на дълбоки връзки между базисни концепции и обекти в теорията на елементарните частици (квантовата теория на полето), от една страна, и съвременни активно развивани области на фундаменталната математика като теория на числата, от друга страна. Това води не само до взаимно обогатяване с нови идеи и концепции в двете науки, но е и важен тласък и мотивация за нови развития в самата фундаментална математика.

(ix) Принос към по-дълбокото и систематично изучаване на различни симетрични обекти (конформни алгебри и супералгебри на Ли, вкл. безкрайномерни), които намират нарастващи приложения в различни области на съвременната физика чрез различни модели на инвариантни диференциални уравнения, квантови осцилатори и др.

(x) Потенциално приложение на квантово-груповите симетрии, характерни за физически системи в ниски пространствено-времеви измерения, към теоретичните основи на квантовите компютри.

В заключение, за да илюстрираме кардиналното значение на фундаменталните теоретични изследвания в науката, нека споменем само две революционни открития във физиката през последните години: (а) откритието в ЦЕРН на неуловимия до скоро скаларен бозон на Хигс, и (б) експерименталното засичане на гравитационни вълни. Колкото и това да са грандиозни и впечатляващи достижения на гениална изобретателност и находчивост на физиците-експериментатори и на високите технологии, в края на краищата това са именно блестящи потвърждения на предсказания на физици-теоретици от преди 50, и респективно 100 години!

Г. УСТОЙЧИВОСТ НА ДЕЙНОСТИТЕ СЛЕД ПРИКЛЮЧВАНЕ НА ПРОЕКТА

Както научните резултати от успешното изпълнение на настоящия проект, така и настоящите и бъдещи творчески планове на членовете на колектива естествено се вписват в контекста на кардиналните задачи на съвременната **теория на елементарните частици при (свръх)-високи енергии, гравитацията и космологията** за десетилетия напред в бъдещето. Главна мотивация за това са споменатите по-горе епохални научни открития в последните години - скаларният Хигсов бозон («божествената» частица) и гравитационните вълни. Основните усилия на всички учени в тази област, работещи в условията на интензивно и тясно сътрудничество в рамките на големи международни колаборации и научни мрежи, обединяващи десетки академични институции от всички краища на света, вкл. колектива от настоящия проект, са насочени към множество приоритетни направления във фундаменталната наука:

(1) Детайлно разбиране на механизмите на „свръхвеликото” обединение на всички фундаментални взаимодействия в Природата (силни и слаби ядрени, електромагнитни и гравитационни) в рамките на струнната теория, в частност:

(а) квантова гравитация и природа на вакуума;

(б) квантова природа на сингулярностите на пространство-времето във физиката на черните дупки, пространствено-времените «портали» (“wormholes”), глобална топология на Вселената;

(в) наличие и природа на допълнителни измерения на пространство-времето;

(г) съвременни нови космологични сценарии от тип „мембранни вселени”.

(2) Свързаната със струнната теория качествено нова физика отвъд енергиите и мащабите на стандартния модел на елементарните частици и “concordance” модела на стандартната космология, в частност:

(а) проблем за йерархията на енергетичните мащаби;

(б) масивни неутрина;

(в) квантова хромодинамика - “confinement” на кварките, кварк-глюонна плазма;

(г) проблем за „тъмната” материя и „тъмната” енергия в еволюцията на Вселената.

(3) Приложения на струнната теория във ядрената физика и физиката на кондензираната материя – описание с помощта на знаменитите струнни дуалности на стълкновения на релативистични тежки йони, ефекта на Хол, нови нестандартни механизми на свръхпроводимост.

Без съмнение, гореприведените стратегически идеи представляват естествена среда както за ползотворно бъдещо дългосрочно сътрудничество между членовете на настоящия екип, така и за установяване на нови творчески взаимодействия на национално и международно ниво за решаване с обединени усилия на предизвикателствата на съвременната физика, доказателства за което представляват настоящата и приключилите успешно предходни наши колаборации, а също така и нашето участие в пет наскоро приключили или текущи в момента големи европейски научни мрежи в рамките на европейската програма COST.