

## Приложение 1

### Нови парадигми за фундаменталната структура на материята Описание на проекта и научната програма

#### 1. Състояние на научните изследвания в България в съответното тематично направление (до 1 страница)

Основната мотивация на настоящия интердисциплинарен и междуинституционален проект идва от съвременната струнна теория като единна теория на взаимодействия между елементарните частици при свръхвисоки енергии. Двата основни колоса, на които се крепи струнната теория са квантовата теория на полето и релятивистката гравитация и космология (Айнщайновата теория на относителността и нейните съвременни обобщения), които от своя страна са тясно взаимоотнообвързани с изследванията на предния фронт на почти всички клонове на съвременната математика (алгебрична и диференциална геометрия, топология, функционален анализ, теория на групите, теория на числата и др.).

Старшите членове от колектива на настоящия проект са водещи български учени с международно признание в областта на теоретичната и математическа физика. Те имат съществен принос в няколко активно развивани в световен мащаб научни направления като конформни квантови полени теории в две и повече размерности на пространство-времето, в изучаването на непертурбативните свойства на струнната теория на фундаменталните взаимодействия при свръхвисоки енергии – калибровъчно-гравитационна дуалност и интегрируеми структури, математическите структури в струнната теория, следствията на последната в космологията и астрофизиката, ролята на конформната симетрия във физиката на кондензираните среди, алгебричните аспекти и геометричната структура на интегрируемите динамични системи.

Трудовете (повече от 1500 на брой) на членовете от колектива по целия спектър проблеми свързани с тематиката на настоящия проект са публикувани предимно във водещите в света международни научни списания с висок импакт фактор в областта на физиката и математиката. Резултатите са докладвани (някои в пленарни доклади) на стотина авторитетни международни конференции и са цитирани повече от 12000 пъти в трудовете на чуждестранни учени, в това число – от водещи световни експерти.

#### 2. Актуалност на научната проблематика в България и Европа (до 1 страница)

Най-значителното явление в развитието на струнната теория през последните 15-16 години е концепцията/хипотезата за „холографска“ дуалност между калибровъчни полени теории и гравитация (*gauge/gravity duality*). В този контекст струнната теория при силна връзка се оказва дуално еквивалентна на слабо свързана полева теория и обратно, което означава, че калибровъчно-гравитационната „холография“ е изключително важен инструмент за разбиране на физиката на квантовите калибровъчни системи при силна константа на връзка, където теорията на пертурбациите не е приложима. Особено забележителни са новите развития - дълбоката връзка на струнната динамика с *интегрируемите* системи (солитони), приложенията ѝ за изучаване на квантовата хромодинамика (силно свързани кварки, стълкновения на ултрарелятивистки тежки йони, кварк-глюонна плазма), релятивистката хидродинамика (динамика на флуиди като динамика на хоризонти на черни дупки) и физиката на кондензираните среди („холографски“ свръхпроводници, квантов ефект на Хол). Математическите аспекти са една важна спойка на настоящия интердисциплинарен колектив. Това отразява световната тенденция на използване на най-съвременните достижения на математиката в квантовата теория на полето и особено в струнната теория. Обратно, развитието на модерните клонове на математиката непрекъснато получава свежи идеи от развитието на струнната теория. Тази световна тенденция е налице у нас отдавна; налице е и в момента чрез участниците в проекта.

## Приложение 1

Последните развития в квантовата теория на полето и, особено, в струнната теория доведоха до разкритието на неподозирани дълбоки връзки със съвременната теория на информацията, което превърна последната в кардинално нова фундаментална научна област, наречена „релятивистка квантова информация“, с огромен потенциал за физиката и технологиите на бъдещето. Един от основните обекти, който възниква при изследванията на квантовата теория в постмодерния ѝ период и отразяващ присъщите ѝ нелокалности, е така нареченото сплитане (*entanglement*) на квантовите състояния. Такива състояния се наблюдават в много широк спектър от физични модели, възникващи в най-разнообразни области на физиката. Изследването на възможни релятивистки ефекти, касаещи сплетените състояния могат да имат потенциални приложения в най-различни области на физиката, включващи физиката на кондензираните среди, високоенергетичните процеси в атомната и ядрената физика, във физиката на елементарните частици, гравитацията и космологията. Сплетените състояния биха могли да служат като естествено обяснение на мистериозния факт, че пространствено-времени многообразия с хоризонти притежават физическа ентропия. Към такива пространствено-времени многообразия принадлежат черните дупки. Наред с тези авангардни изследвания, квантовата теория е и апаратът за изучаване на актуални проблеми на физиката на елементарните частици, като вътрешната спинова структура на нуклона при високи енергии.

### **3. Описание на базовата организация ИЯИЯЕ и партниращата организация СУ-ФЗФ (до 2 страници)**

**Институтът за ядрени изследвания и ядрена енергетика (ИЯИЯЕ) при БАН** е основан през 1972 г. Той е водещият научен институт в България в областта на фундаменталните и приложни изследвания във физиката на елементарните частици, ядрената физика, физиката на високите енергии, ядрената енергетика, радиохимията, радиоекологията, мониторинга на околната среда, ядреното приборостроене и редица други направления, свързани с приложенията на ядрената физика и нейните методи. В института работят около 270 души, от които 135 са научни работници, работещи в 7 научни направления, обединени в 16 лаборатории, 2 научно-експериментални бази и 8 общоинститутски отдела. Колективи от сътрудници на ИЯИЯЕ работят съвместно с учени от водещи научни центрове като ЦЕРН, ОИЯИ-Дубна, Обединеният изследователски център на Европейската комисия, лаборатории и университети от цял свят. Участвали са в проекти по Пета, Шеста и в момента по Седма рамкова програма. ИЯИЯЕ е търсен и уважаван партньор в големи проекти, финансирани от Европейската комисия. По броя на сключените и действащи европейски проекти Институтът се нарежда на едно от първите места в БАН. Успешното интегриране на учените от ИЯИЯЕ в международното изследователско пространство се дължи както на тяхната компетентност, така и на адекватната поддръжка от страна на института. Съществува бърза интернет връзка, както и добри възможности за числени пресмятания – наред с модерните персонални компютри, осигурен е достъп до компютърен кластер и до мрежата GRID. Институтът има и необходимия административен капацитет да обслужва множество местни и международни изследователски проекти. Голяма част от учените, които ще работят по предлагания проект, са сътрудници на Лаборатория „Теория на елементарните частици“ в ИЯИЯЕ. Тя е безспорен лидер в България в теоретичните изследвания в областта на физиката на елементарните частици при високи и свръхвисоки енергии. Интелектуалният капацитет на Лабораторията и инфраструктурата на ИЯИЯЕ са гаранция за успешното изпълнение на работната програма по предлагания проект.

**Софийският университет “Св. Климент Охридски”** е първото българско висше училище. Днес Софийският университет е най-големият и престижен образователен и научен център в страната. Университетът обучава студенти в трите образователни степени

## Приложение 1

и извършва научно-изследователска дейност в областта на природо-математическите, обществените и хуманитарни науки. В структурата му са включени 16 Факултета, 3 Департамента, както и многобройни научни центрове и лаборатории. В Софийския университет работят голяма част от най-добрите български специалисти във всички области на природо-математическите и хуманитарните науки. По брой преподаватели и студенти, научно-теоретични и практически постижения, национално влияние, международни контакти, библиотечно-информационно обслужване, материално-техническа база и възможности, както и по реализация на абсолвентите си той е сравним с най-добрите университети в Европа и се явява един от водещите в Югоизточна Европа. Интелектуалният потенциал на хората от катедра „Теоретична физика“ и инфраструктурата на Физическия факултет са достатъчна гаранция за изпълнението на програмата по този проект.

### **4. Описание на работната програма по проекта (до 15 страници)**

Настоящият проект е замислен като широкообхватен и многопрофилен, предлагащ фундаментални научни изследвания в широк диапазон в съвременните области на теоретичната физика. Проектът е ориентиран към приоритетна област „3. Нови материали и технологии, в т.ч. изследвания в областта на химията, физиката и техническите науки“, и по-точно - фундаментални изследвания във физиката на елементарните частици и астрофизиката с ударение върху съвременните аспекти в квантовата теория на полето и релятивистката гравитация в контекста на струнната теория.

Няколко са главните му цели:

(А) Съществено разширение на досегашните познания за характера на фундаменталните сили в природата и структурата на материята, както в света на елементарните частици, така и в галактически мащаби, чието строго научно описание се крепи на съвременните квантова теория на полето, релятивистката гравитация и редица клонове на предния фронт на математиката.

(Б) Принос към решаване на кардиналните проблеми на съвременната физика с глобално мирово значение - проблемите за „суперсиметрия“, „допълнителни пространствено-времеви измерения“, „тъмна материя“ и „тъмна енергия“ във Вселената.

(В) Освен чисто научните, важна цел е развитието на млади специалисти. Проектът е достатъчно фокусиран да действа като плодотворна образователна база за млади учени и да даде принос към подготовката на висококвалифицирани специалисти за професионална им реализация в такива важни иновативни области на науката и технологиите на бъдещето като "релятивистка квантова информатика" и "нови енергийни източници, базирани на субядрени и релятивистко-гравитационни процеси".

#### **4.1 Научни задачи**

Поради широкопрофилния характер на планираните изследвания се предвижда тяхното изпълнение да бъде организирано в 4 работни групи, функциониращи в тясно взаимодействие и обмен на експертиза.

##### **4.1.1 Работна група „Дуалност между калибровъчни квантови теории на полето и гравитацията“**

Концептуално-новите идеи на калибровъчно-гравитационната дуалност водят до следните въпроси в центъра на вниманието на научната общност: Как са свързани основните характеристики на двете принципно различни теории, дефинирани в пространства с различни измерения? Как да се построи гравитационно дуално описание на дадена калибровъчна теория, която има феноменологично значение? Основен интерес представлява примерът на Квантовата

## Приложение 1

хромодинамика (QCD), в която е невъзможно аналитичното извеждане на спектъра на мезоните и адроните със стандартните методи на теория на полето. Доколко е възможно да се използва дуалността в обратна посока, т.е., да се изучава силно-взаимодействаща гравитационна система чрез дуална слабо-взаимодействаща калибровъчна теория? Прогрес в тази посока би могъл да революционализира разбирането ни за черните дупки, за които днес се знае, че са широко разпространени във вселената. Важно за приложенията е и изучаването на холографски модели на полеви теории, допускащи динамично нарушение на симетрии, като например киралната симетрия. Тази тема е от значение и за разбирането на това как се генерира масата на елементарните частици в Стандартния Модел. Друг тип важни въпроси, които за момента могат да се изучават само с холографски методи са свойствата на кварк-глюонната плазма и на високо-температурните свръхпроводници.

Двумерните конформни теории на полета (КТП) са сред основния апарат на струнните теории. Въпреки това остава открит въпросът за реалната приложимост на тези теории, основани на теория на представянията на безкрайномерни алгебри, към детайлното описание на струни върху изкривени пространства като  $AdS_5$  (5-мерно пространство на анти-де Ситер). В тази връзка е важно развитието на КТП за алгебри от по-висок ранг, както и техните суперсиметрични аналози.

Изброените по-горе важни въпроси мотивират няколко основни цели в тази работна група:

а) Да се намерят и изследват струнни решения холографски дуални на калибровъчни оператори. Изследването включва намиране на аномални размерности и корелационни функции на дуални теории в 4, 3 и 2 измерения. За провеждането му ще бъдат развити някои нови методи и подходи за пресмятане на холографските характеристики на теориите;

б) Изследване на холографски дуални теории в присъствието на топологични дефекти (от тип вортекс и др.), както и калибровъчни теории притежаващи граница.

в) Качествено и количествено изследване на т.нар.  $S$ -дуалност свързваща теории с обратно-пропорционални константи на връзката посредством двумерни конформни теории, т. нар. мембранно инженерство и струнна теория.

г) Да се развият методи за намиране и изследване на гравитационни решения дуални на спонтанно-нарушена кирална симетрия. Особено интересни от феноменологична гледна точка са такива решения с (поне) два динамично-генерирани мащаба. Такива решения могат също да играят важна роля в построяването на модели на космологична инфлация, произвеждащи непренебрежими реликтови гравитационни вълни.

От тук следват следните конкретни изследователски задачи:

(1) Пресмятане на корелационни функции в калибровъчни теории при силна константа на връзката посредством холографското съответствие

(2) Развиване на метод(и) за пресмятане на холографски характеристики като аномални размерности и корелационни функции базирани на интегрируеми модели.

(3) Изследване на холографската дуалност за случаите на калибровъчни теории с граница и топологични дефекти, вкл. пресмятане на холографската ентропия на заплетени състояния, изследване на закодиране на информацията за теорията в пространството с по-висока размерност в теорията с по-ниска размерност.

(4) Изучаване на дуалността в 3- и 4-мерна теории на Янг-Милс вложени в пространства с по-висока размерност от гледна точка на двумерните конформни теории.

(5) Развитие и приложение на (супер)конформни теории към описание на вертексни оператори и техните корелатори.

(6) Изследване на връзката между модулаторната инвариантност на двумерните теории и преобразованието силна/слаба константа на връзката в производящия функционал на Некрасов.

(7) Развиване на систематичен метод за изучаване на стабилността на гравитационни решения дуални на спонтанно-нарушена кирална симетрия.

## Приложение 1

(8) Построяване на модели на инфлационна космология, даващи непренебрежими гравитационни вълни, чрез използването на гравитационни дуални решения с два динамични мащаба.

Струнната теория е замислена като всеобемаша теория, (“*theory of everything*”), и затова включва в себе си елементи и на нерелативистичната квантова механика. Така естествено възникна направлението “нерелативистка холография”, в което симетрията е групата на Шрьодингер - максималната група на симетрия на уравнението на Шрьодингер. Ролята на групата на Шрьодингер в нерелативистката холография има и естествен математически смисъл – или като контракция на конформната група в групата на Шрьодингер, или като влагане на групата на Шрьодингер в конформната група в по-висока размерност. Последният подход дава и пряка връзка на нерелативистката холография с теорията на Айнщайн, тъй като свойствата на групата на Шрьодингер се кодират в метриката на съответното изкривено пространство. Това се използва за връзка на черни дупки на Кер-*AdS* с нерелативистичната квантова механика, за разглеждане на нерелативистка конформна теория на полето, на съответствие “*AdS*/студени атоми”, развити са суперсиметрични варианти на *II*B струна с Шрьодингер-симетрия, разгледани са суперсиметрични нерелативистки геометрии в *M*-теорията, и др.

### **4.1.2 Работна група „Физика на черните дупки и пространствено-времевите портали - термодинамика, ентропия и квантово сплитане; гравитация и суперсиметрия“**

През последните години теорията на черните дупки претърпява бързо развитие и достигна неочаквани резултати. Конструират се многомерни решения (фонови геометрии), притежаващи хоризонт на събитията, които проявяват качествено нови свойства в сравнение с известните черни дупки в обичайното 4-мерно пространство-време. В пет измерения се наблюдава възможност за разнообразна топология на хоризонта и се променя представата за достатъчен набор от физически данни, които определят напълно даден черен обект.

Основната идея тук е да се изследват квантови полета в присъствие на хоризонти и космологични хоризонти, за да се намери матрицата на плътността и от там да се изчисли ентропията на сплетените състояния, като се сравни с ентропията, пресметната чрез методите на квази-квантовата гравитация.

Други не по-малко важни гравитационни обекти са т.н. пространствено-времеви портали (“wormholes”) свързващи „накъсо“ две или повече вселени с различна пространствено-времева геометрия или пък свързващи „накъсо“ две много разделени области на една и съща вселена с нетривиална топология. В някои решения тип “wormholes” пространство-времето съдържа затворени времениподобни криви, което означава „пътуване назад във времето“ – един от най-грандиозните неразрешени до днес парадокси в историята на науката. От теоретико-информационна гледна точка съществуването на затворени времениподобни криви би довело до нарушение на тезата на Чърч-Тюринг.

В настоящия проект ще разглеждаме един широк клас от физически интересни пространствено-времеви портали - т.н. “thin-shell wormholes”, чиито „гърла“ (или „тунели“) между различните вселени се реализират от специален вид материя, наречена „светоподобни мембрани“. Както е известно, светоподобните мембрани са от фундаментален интерес в общата теория на относителността, където те описват импулсивни светоподобни сигнали пораждани от катастрофически астофизични събития . Те играят съществена роля при редица други важни космологични и астрофизически явления , в това число – в „мембранната парадигма” във физиката на черните дупки и в мембранния подход към проблема с гравитационните доменни стени. Неотдавна светоподобните мембрани започнаха да играят важна роля и в контекста на съвременната струнна теория на фундаменталните сили в природата. Тук е съществено да се отбележи, че за всеки статичен наблюдател в една определена вселена в глобалното пространствено-

## Приложение 1

времево многообразие с един или повече светоподобни мембранни портали, съответният портал към съседната вселена изглежда точно като хоризонт на черна дупка. Това дава основание да се приложат аналогични на споменатите по-горе подходи за изследване на термодинамичните свойства, ентропията и квантовото сплитане в случая на светоподобни "thin-shell wormholes".

Друга физически важна проблематика са ударните гравитационни вълни преди всичко поради тяхната ключова роля в описанието на импулсивни ултрарелативистки сигнали в общата теория на относителността, във високоенергетичното разсейване на материята при Планкови енергетични мащаби и при стълкновения на ултрарелативистки тежки йони. Членове на колектива вече имат интересни резултати в тази област – нов тип електровакуумна гравитационна ударна вълна „удържаща“ (confining) електронатоварена материя на крайно разстояние от вълновия ѝ фронт.

Една от основните парадигми на съвременната физика на елементарните частици и космологията е спонтанното нарушение на суперсиметрията – фундаментална симетрия обединяваща гравитационните елементи на материята с цял спин (бозони) и полуцял спин (фермиони). Членове на колектива вече имат интересни резултати и в тази област – предложен е качествено нов механизъм за динамично спонтанно нарушение на суперсиметрията в контекста на супергравитацията, при което е реализиран прототип на очакваните физически значими свойства на материята в днешната епоха на еволюция на Вселената – много малка наблюдаема космологична константа и едновременно с това – много голяма маса на гравитиното – суперсиметричен партньор на гравитона. Понататъшните изследвания по тази тематика, особено предвид голямата конкуренция в международен мащаб, изискват нетривиална концентрация на усилията и експертизата на членовете на колектива.

Съществува възможност теоретичните разглеждания да бъдат подкрепени и от експериментални данни в близко бъдеще, тъй като сред задачите на големия адронен колайдер (LHC) в ЦЕРН се включва както откриването на допълнителни измерения в пространство-времето, така и наблюдаването на микроскопични черни дупки и пространствено-времеви портали.

Основните научни задачи на тази работна група могат компактно да се формулират така:

(а) Аналитично конструиране на решения, описващи черни лещи, а така също изследване на техните свойства, излъчване на Хокинг и термодинамика.

(б) Получаване спектъра на квазинормални моди на различни физически важни и интересни решения описващи черни дупки и на базата на получените резултати да бъдат направени изводи за стабилността на изучаваните обекти. Изучаване на връзката на квазинормалните моди с квантовите свойства на пространство-времето.

(в) Изучаване на сплетени квантови състояния, появяващи се при квантова динамика на скаларни, векторни, спинорни и полета на Янг–Милс в нетривиално пространство-време – в околност на черни дупки, в космологични модели и във време-пространства със светоподобни мембранни портали.

(г) Изследване на потенциалните приложения на светоподобната мембранна материя към съвременните космологични сценарии от тип "мембранни вселени".

(д) Изследване на нови типове ударни гравитационни вълни, вкл. стълкновения между такива вълни и възможни процеси на раждане и аниhilация на двойки частици, аналогични на механизма на Швингер.

(е) Разработване и изследване на кардинално нови механизми за динамично спонтанно нарушение на суперсиметрията съответстващи на съвременните представи за строежа и еволюцията на Вселената.

### 4.1.3 Работна група „Квантова теория на полето и квантови компютри“

## Приложение 1

Изследванията ще бъдат концентрирани в изучаването на различни (пространство-времеви и вътрешни) симетрии и статистики, естествено възникващи в съвременната квантова теория на полето и на общи теоретични проблеми като квантуване и пренормировки. Тази област отваря интересни възможности за практически приложения, например в (топологичните) квантови компютри. Подобни структури възникват и в подхода на Кон и Краймер към теорията на пренормировките.

Основните усилия ще бъдат насочени към окончателно определяне на брейд-статистиката на експериментално наблюдаваното Холово състояние с фактор на запълване  $\nu_H = 5/2$ , което е най-добрият кандидат за физическа реализация на топологичен квантов компютър. За целта ще бъдат използвани методите на конформната квантова теория на полето за определяне на проводимостта и коефициента на Зийбек (Seebeck) в режим на последователно тунелиращи електрони (sequential tunneling) в геометрия на едно-електронен транзистор. Изследванията ще покажат дали това Холово състояние се намира в класа на универсалност на Пфафовия модел, анти-Пфафовия модел или модела 331. Във втория етап ще бъдат използвани методите на квантовата теория на информацията за изследване на алгоритмите за корекция на грешки в топологичните квантови компютри, реализирани на базата на стабилизаторни кодове (stabilizer codes), торичен код на Китаев и повърхнинни кодове (surface codes). Изследванията ще установят праговете за коригиране на грешки за абелеви аниони при наличие на загуба на информация.

Задача: Да се пресметне зависимостта на коефициента на Зийбек за Холовото състояние с  $\nu_H = 5/2$  от температурата, потока на Ахаронов-Бом и потенциала на гейта на едно-електронен транзистор, формиран от два квантови точкови контакта.

В квантовата теория на информацията се изучават квантови системи, състоящи се от вериги от взаимодействащи кубитове (qubits) (частици със спин 1/2). Такива системи ще бъдат разгледани и предложени като комуникационни канали за пренос на квантови състояния. В този смисъл ще бъде изследван въпросът за пренос на перфектни състояния.

Определени физични проблеми, свързани с обобщени статистики, водят до интересни алгебрични връзки между симетрични (квантово-групови) и комбинаторни обекти. При квантуването на  $SU(n)_k$  модела на Вес-Зумино-Новиков-Уитен (WZNW) естествено възниква (асоциативната) алгебра на т.нар. нулеви моди, отговарящи за „вътрешната“ симетрия на модела, която е от квантово-групов тип. Когато параметърът на деформация  $q$  не е корен от единицата, Фоковото представяне на тази алгебра задава модел (т.е. пряка сума от всички неприводими представяния, с единична кратност) на  $U_q(sl_n)$ . В случая на WZNW модела,  $q^{2(k+n)} = 1$ , и структурата на Фоковото представяне е сложна комбинаторна задача, която ще бъде атакувана.

Причинният подход на Епщайн и Глазер е най-строгий и концептуално завършен подход за построяване на пертурбативни модели на взаимодействащи квантови полета. Доста известни модели, като конформно инвариантните суперсиметрични модели не са формулирани в този подход. Ще разгледаме опростения безмасов модел на Вес-Зумино на самодействащо кирално суперсиметрично поле, а впоследствие – силно актуалния модел на  $N=4$  суперсиметрични калибровъчни полета по метода на Епщайн-Глазер. На втория етап планираме да построим модели на Баталин-Вилковски в каузалния подход в съчетание с операторна реализация. Друг аспект са методите за изчисляване на Файнманови диаграми в конфигурационно пространство за безмасови теории. Специален интерес в последните години играе пресмятането на ренормализационния инвариант на Файнмановите диаграми, наречен резидуум. На първия етап ще бъдат развити методи за пресмятане на резидууми на примитивно разходящи диаграми. На втория етап в проекта ще работим върху методи за пресмятане на резидууми на непримитивно разходящите диаграми.

### **4.1.4 Работна група „Математически аспекти – групово-теоретични и геометрични подходи в квантовата теория на полето и струнната теория“**

## Приложение 1

В момента челният фронт на групово-теоретични подходи се изразява, както в развитие на теория на представянията на различните симетрични обекти, така и в непрекъснато разширяване на спектъра на тези обекти, които се разглеждат. В теория на представянията важни задачи са явното описание на представянията на известните симетрични обекти, особено на супералгебрите и на квантовите групи, на операторите сплитащи тези представяния, на връзката на теория на представянията с проблемите на интегрируемостта, и т.н. Тези задачи са тясно свързани с приложения в теория на струните и могат да бъдат формулирани както следва:

(i) Явно намиране на характеристиките на суперконформната алгебра, особено за случая на  $N=4$ , където се разглежда суперсиметричната калибровъчна теория на Янг-Милс, която е интегрируема;

(ii) Описание на сплитащите диференциални оператори, особено в точките на холоморфност на представянията на т.н. евклидови групи на Йордан, от които засега е изучена подробно само конформната група.

Естествената връзка на хамилтониана на една квантова система със супералгебрите на Ли обуславя важния факт, че пространството на състоянията е тяхно неприводимо представяне. Засега са конструирани и изследвани твърде прости унитарни представяния (от Фоковски тип) на супералгебри на Ли. Тук планираме да построим други класове от унитарни представяния и да изучим физичните свойства на съответните системи – спектър на енергията, на операторите на координатите и импулсите, класически граници на решенията, вкл. и за деформирания случай.

Тъй като парастатистическите Фокови пространства са свързани с комбинаторни алгебри, чрез теоремата за хомотопен пренос на Кадеишвили пръстенът на кохомологиите на алгебрата на парастатистическите оператори на раждане се обогатява с висши произведения и придобива структурата на хомотопна (комутативна асоциативна) алгебра. Ще бъдат атакувани задачите за намиране на явни формули за висшите произведения в хомотопната алгебра и за използване на кристалната граница на квантовата деформация на тази конструкция за извеждане на комбинаторна алгебра на (самоспрегнати) Юнгови таблици.

### 4.1.5 Методология

Интердисциплинарният характер на предлаганите изследвания определя и голямото разнообразие и обхват на арсенала от мощни методи и подходи от предния фронт на съвременната теоретична физика и математика: непerturbативни подходи в квантовата теория на полето; теория на пренормировките на ултравиолетови разходимости; непerturbативни методи в струнната теория; съвременни математични концепции и подходи в общата теория на относителността; методи от теория на интегрируемите системи (теория на солитоните) и хамилтоновите динамични системи с връзки; методи на диференциалната геометрия и топологията; алгебрична геометрия; методи от теория на групите - теория на представянията, вкл. представяния на безкрайномерни алгебри на Ли; абстрактна алгебра и теория на числата; методи от теорията на специалните функции.

По-конкретно, методологията на изследванията в проекта включва следното:

(а) Конструирането на точните аналитични решения за черни обекти в многомерно пространство-време ще се извършва с помощта на методи за генериране на точни решения, развити от С. Язаджиев и методи от теорията на интегрируемите системи. За случаите, когато аналитични решения не могат да се конструират, полевите уравнения ще се решават числено.

(б) За изследване на квазинормалните моди ще бъдат използвани основно директни методи за интегриране на времево независимите вълнови уравнения за пертурбациите на полетата.

(в) При третиране на системи от гравитация и калибровъчно-полева материя, взаимодействащи самосъгласувано със светоподобна мембранна материя, ще се използват



## Приложение 1

методи от теорията на динамични системи с връзки за изследване на протяжни обекти с репараметризационна инвариантност върху мировия им обем.

(г) Сплетените състояния и ентропията ще се изследват с методите и техниките на локалната квантова теория на полето в изкривено пространство-време.

(д) При изследванията на калибровъчно-гравитационната дуалност ще бъдат използвани методите, развити от членове на колектива, а така също и от водещи учени в областта, включващи методи от теория на струните, интегрируеми системи, алгебрична и диференциална геометрия, групи и алгебри на Ли и техните представяния, техники и методи от калибровъчните теории и от двумерните конформни модели.

(е) За пресмятане на характеристиките на суперконформната алгебра ще бъдат използвани най-последни достижения на теория на представянията, вкл. развити от членове на колектива.

### 4.2 Видове дейности

Основните видове дейности на колектива ще бъдат по няколко главни направления:

(А) Изследователска работа на експертно ниво по поставените научни задачи, подробно описани по-горе, в рамките както на отделните работни групи, така и възползвайки се от вече установените тесни и плодотворни сътрудничества с учени от авторитетни университети и други академични институции в чужбина;

(Б) Подготовка и публикуване на получените резултати при изследванията съгласно работната програма в престижни рецензируеми международни списания с импакт-фактор;

(В) Подготовка и изнасяне на доклади, вкл. поканени и пленарни, представящи постигнатите резултати по проекта на авторитетни международни научни форуми – конференции, работни съвещания и школи за млади учени;

(Г) Подготовка и публикуване в пълен текст на докладите на международните конференции в сборниците от трудове;

(Д) Изнасяне на семинарни доклади за получените резултати, както и за текущия напредък по научните задачи на проекта, на регулярни научни семинари в ИИИЯЕ и други сродни институти на БАН, във физическия факултет на СУ „св. Кл. Охридски“ и в други сродни академични институции, което допълнително ще допринесе за развитието на младите специалисти в колектива;

(Е) Подготовка и изнасяне на курсове лекции за магистри и докторанти по съвременните аспекти в квантовата теория на полето, релативистката гравитация и техния математически апарат, с акцент върху проблемите и достиженията в настоящия проект и с оглед на тяхното приложение във физиката на високите енергии и релативистката квантова информатика. Предвижда се изучаването и резултатите от изследванията да послужат за подготовка на уводни материали и курсове позволяващи навлизане в областта на млади учени на работно ниво.

(Ж) Организиране на вече придобилото значителен международен авторитет поредно 11-то Международно работно съвещание (школа за млади учени) „Теория на Ли и нейните приложения във физиката“, Варна, юни 2015 год.

### 4.3 Очаквани резултати

Резултатите от планираните фундаментални научни изследвания ще бъдат принос към дългосрочната програма на международната общност на учените от областта на физиката на елементарните частици и високите енергии, астрофизиците и космолозите за търсене на *отговори на такива важни концептуални научни*

## Приложение 1

**проблеми** като природата на "тъмната материя" и "тъмната енергия" във Вселената, наличието на допълнителни измерения на пространство-времето, суперсиметрията, микроскопични черни дупки и пространствено-времени портали, решаване на вездесъщия „информационен парадокс“, в овладяване на мощните енергийни процеси на субядрено ниво. В частност, очакваме приноси към строгото доказателство на валидността на хипотезата за холографска дуалност между гравитация и квантови калибровъчни теории, която от своя страна, особено чрез новото фундаментално понятие за холографска ентропия на сплитане (*“holographic entanglement entropy”*), оказва огромно въздействие върху развитието на релятивистката квантова информатика. Пълното доказателство на хипотезата за калибровъчно-гравитационната дуалност по своето въздействие върху всички области на физиката, далеч надхвърлящи контекста на физика на високите енергии, ще бъде аналогична на революцията във физиката от началото на миналия век със създаването на теорията на относителността и квантовата механика.

По-кокретно, очакваме следните по-съществени резултати:

- (1) Нови класове точни решения, описващи въртящи се черни дупки с различна топология, "мембранни" вселени с пространствено-времени портали в повече от 4 измерения и нови типове ударни гравитационни вълни.
- (2) Нови физически значими механизми за динамично спонтанно нарушение на суперсиметрията – теоретична обосновка на съвременните модели за строежа и еволюцията на Вселената.
- (3) Спектър на квазинормалните моди на статични асимптотически не-плоски черни дупки и определяне на тяхната стабилност
- (4) Спектър и други характеристики на квантовото излъчване на Хокинг за асимптотически не-плоски черни дупки, задълбочаване на разбирането на връзката на сплетените състояния с ентропията на черните дупки и проблема за "загуба на информация"
- (5) Получаване на нови корелационни функции в калибровъчните теории с различна суперсиметрия при силна константа на връзката
- (6) Изучаване на холографското съответствие в пространства от не анти-Де Ситеров тип.
- (7) Изучаване на холографското съответствие свързано със (супер-)алгебри на Шрьодингер
- (8) Получаване на корелационни функции в системи с граници и пресмятане на основни характеристики като “холографска ентропия на сплитане”
- (9) Получаване на явни формули за характеристиките на супер-конформната алгебра за случая на суперсиметрична теория на Янг-Милс
- (10) Изучаването на вериги от взаимодействащи кубитове (*qubits*) ще доведе до предлагане на комуникационни канали за пренос на (перфектни) квантови състояния

### 4.4 Потенциал за бъдещо развитие на научната група, изпълняваща проекта

Изследванията свързани с проекта ще разширят досегашните познания с нови съществени резултати в описаните направления. Натрупаният професионален опит и получените резултати ще бъдат използвани в бъдещите фундаментални научни изследвания на групата, тъй като темите от проекта в областите на квантовата теория на полето, релятивистката гравитация и фундаменталната математика ще бъдат актуални и през следващото десетилетие.

В тази връзка, за да илюстрираме кардиналното значение на фундаменталните теоретични изследвания в науката, нека подчертаем, че неотдавнашното откритие в

## Приложение 1

ЦЕРН на неуловимия до скоро скаларен бозон на Хигс – колкото и това да е грандиозно и впечатляващо достижение на гениална изобретателност и находчивост на физиците-експериментатори и на високите технологии, в края на краищата е именно едно блестящо потвърждение на предсказания на физици-теоретици от преди близо 50 години!

Друг важен аспект, засягащ по-нататъшното развитие на групата, е свързан с факта, че настоящият проект ще даде на по-младите членове на научния екип ценен международен опит в науката, който е от изключителна важност за тяхното бъдещо развитие като научни работници. След завършването на проекта младите учени ще са придобили умения да се адаптират към високо конкурентна и творческа среда, типична за европейското и световно научно пространство.

Важно следствие от успешното завършване на проекта ще бъде затвърдяването на плодотворното сътрудничество на научния екип с водещи учени и групи в света работещи в сходни научни области.

Успешното осъществяване на проекта със сигурност ще повиши интереса сред студентите към тематиката на научните изследвания в колектива, което ще ни позволи да привлечем най-талантливите от тях да изберат професионална кариера във фундаменталните области на физиката и математиката, където напоследък се наблюдава опасен отлив на младо попълнение с риск за срив на генетичната връзка между научните поколения и загуба на завоюваните позиции и международен престиж на българската школа в областта на теоретичната физика и фундаменталната математика.

Младите членове на колектива ще развият своя научен потенциал и педагогически способности да обучават бъдещи учени. С привличането, обучението и развитието на нови научни кадри проектът ще бъде ценен принос в основната мисия на СУ "св. Климент Охридски" и ИЯИЯЕ-БАН.

### **4.5 Потенциал за трансфер на знания и приложимост на резултатите**

**4.5.1.** Нека напомним тук за широко дискутираните астрономически наблюдения от последните години, вкл. изследвания на над 200 000 галактики, които потвърждават, че Вселената се разширява ускорено – през 2011 год. година Нобеловата награда по физика бе присъдена за експериментално потвърждение на това ускорение. Но неговата причина - неизвестната загадъчна „тъмна енергия” все още очаква своето теоретично обяснение.

Нека също да напомним, че стандартният модел на фундаменталните взаимодействия между елементарните частици при високи енергии, макар и до сега с блестящи експериментални потвърждения на своите предсказания, описва само около 4% от материята в известната ни Вселена, и поставя още значителен брой нерешени проблеми за нейната фундаментална структура – в това число т.н. велико обединение на силите в Природата, суперсиметрията, въпроса „защо гравитацията е толкова слаба“.

Главната ценност на очакваните нови резултати е да се придобият нови знания за структурата и поведението на материята на ултрамикроскопични и на галактически разстояния. Тези резултати ще бъдат съществен принос към усилията на световната общност на учените в областта на физиката на елементарните частици и високите енергии, астрофизиката и космологията към разгадаване „мистерията“ около кардиналните проблеми на съвременната физика с глобално мироведно значение - „суперсиметрия“, „допълнителни пространствено-времени измерения“, черни дупки и пространствено-времени-портали („пътуване във времето“), „тъмна материя“ и „тъмна енергия“ във Вселената.

### **4.5.2 Трансфер на знания – приложение в педагогическата сфера**

## Приложение 1

Релативистката квантова информатика е една от най-важните области на науката и технологиите на бъдещето. Тъй като (преносът на) информацията е физически процес на взаимодействие между детектори и физически системи, то съвременната информационна теория не само трябва да описва квантови детектори, но и такива движещи се с релативистки скорости близки до скоростта на светлината и още по-общо – в изкривено пространство-време в резултат на гравитационните ефекти. От тук става очевидна изключителната актуалност на построяването на съвременни курсове на конкурентно европейско ниво за магистри и докторанти, отчитащи последните достижения в областта на квантовата теория на полето и релативистката гравитация.

По-конкретно планираме следните курсове за студенти от магистърски програми и докторанти:

- 1) Курс по холографска дуалност между струни и калибровъчни теории
- 2) Курс по суперсиметрични калибровъчни теории и теория на Зайберг-Уитън
- 3) Курсове по математичните методи използвани в планираните изследвания
- 4) Курсове по квантова информация, квантово смятане и квантова логика

### 5. План за разпространение на резултатите (до 2 страници)

Настоящите изследвания ще се проведат в рамките на широко международно сътрудничество със световноизвестни и водещи институти и университети от цял свят, което представлява отлична естествена среда за широкото разпространение на резултатите на настоящия проект. По-конкретно, предвижда се част от участниците в проекта да посетят утвърдени чуждестранни групи, работещи в сходни области. В рамките на тези посещения те ще изнесат научни доклади представящи научните резултати по проекта и ще бъде осъществен ценен обмен на експертиза. Подобни изяви са от ключово значение не само за издигане авторитета на българската наука по света, но са и съществени елементи в изграждането на международна репутация и известност на младите ни учени.

Непълен списък на активните или неотдавна приключили международни сътрудничества на членовете на колектива в рамките на двустранни или многостранни научни съглашения, както на европейско ниво:

(a) COST Action MP-1210 “The String Theory Universe” (2013-2017);

(б) COST Action MP-1304 “Exploring Fundamental Physics with Compact Stars” (2013-2017);

така и на институционално и/или междудържавно равнище:

(1) *Austria* – Erwin Schrödinger Institute for Mathematical Physics (ESI), Vienna; Institut für Hochenergiephysik der Universität Wien;

(2) *Belgium* – University of Ghent;

(3) *France* – C.E.A. Saclay (Gif-sur-Yvette), Institut des Hautes Etudes Scientifiques (Bures-sur-Yvette); Université de Paris-Sud (Orsay), Ecole Polytechnique (Palaiseau), L.A.P.P. (Annecy); Université Paul Sabatier (Toulouse); Université Henri Poincaré (Nancy); Institut de Recherche Mathématique Avancée CNRS et Université de Strasbourg; Centre de Physique Théorique (Marseille);

(4) *Germany* – Institut für Theoretische Physik der Universität Göttingen; Technische Universität Clausthal; Max-Planck Institut für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig; Institut für Theoretische Physik der Justus-Liebig-Universität, Giessen; Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg; Eberhard Karls Universität Tübingen, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

(5) *Greece* - Aristotle University of Thessaloniki;

(6) *Ireland* – Dublin Institute of Technology;

(7) *Israel* – Ben-Gurion University (Beer-Sheva);

## Приложение 1

- (8) *Italy* – I.C.T.P. and S.I.S.S.A. (Trieste), University of Trieste; Rome University “Tor Vergata” & INFN;
- (9) *Japan* – Osaka Prefecture University;
- (10) *Republic of Korea* - Ewha University (Seoul);
- (11) *Russia* – J.I.N.R. (Dubna);
- (12) *Switzerland* - Theory Group of C.E.R.N. (Geneva); University of Geneva;
- (13) *United Kingdom* – Imperial College, London;
- (14) *United States of America* – Pennsylvania State University (Abington).

Очаква се всички получени в рамките на проекта резултати да бъдат публикувани в най-авторитетните рецензируеми международни списания с импакт-фактор такива като *Physical Review D*, *Physical Review Letters*, *Journal of High Energy Physics*, *Nuclear Physics B*, *Physics Letters B*, *Communications in Mathematical Physics*, *Journal of Mathematical Physics*, *International Journal of Modern Physics A*, *Classical and Quantum Gravity*, *General Relativity and Gravitation*, и/или в сборници трудове на международни научни мероприятия.

Друга важна възможност за разпространение на резултатите от изследванията по темата на проекта е тяхното докладване на престижни международни научни събития (конференции, работни семинари, школи). Именно тук финансовата подкрепа от фонда на проекта ще бъде от решаващо значение. Освен това, членове от нашия екип имат значителен опит в организирането на многобройни международни конференции, работни семинари и школи в областта на квантовата теория на полето, математическата физика, групово-теоретичните методи, включително и по квантови групи, суперструни, супергравитация, интегрируеми системи, които винаги са били на много високо ниво и са били посещавани от голям брой световноизвестни специалисти. Очакваме същото високо научно ниво да се запази при предвидената за провеждане през м.юни 2015 г. в гр. Варна международна конференция и школа по тематиката на настоящия проект, където в организационния комитет ще влязат значителен брой членове на този колектив.

### 6. Управление на проекта (до 3 страници)

Предлаганият проект ще има високоефективно управление и организационна структура подобни на тези, които вече успешно са функционирали при предишни проекти с ФНИ и други (международни) сътрудничества с участие на почти всички членове на настоящия колектив.

Членовете на проекта имат богат опит в различни научно-организационни дейности; те са били организатори на множество международни конференции, членове са на постоянни комитети на съществуващи европейски мрежи и на научните комитети на международни конференции.

Организацията по изпълнение на проекта ще включва:

**(А) Управителен съвет**, който ще бъде отговорен за научната стратегия на проекта, за организирането на конференции в предложените области за изследвания и за вземане на важни решения по отношение на изпълнение на проекта във финансовата му част.

Ръководител на проекта: член-кор. на БАН, проф. д-р физ. науки Валентина Петкова (ИЯИЯЕ-БАН);

Координатор на екипа от ИЯИЯЕ-БАН: член-кор. на БАН, проф. д-р физ. науки Емил Нисимов;

Координатори на екипа от Физ.Ф-тет на СУ: проф. д-р физ. науки Стойчо Язаджиев и проф. д-р физ. науки Радослав Рашков;

Координатор на екипа отговорен за организиране на международни мероприятия по тематиката на проекта: проф. д-р физ. науки Владимир Добрев (ИЯИЯЕ-БАН);

Техн. секретар: Вирджиния Досева (ИЯИЯЕ-БАН)

## Приложение 1

**(Б) Срещи на участниците на проекта.** Освен редовните работни срещи на членовете на всяка от 5-те работни групи, планира се веднъж на 2 или 3 месеца всички участници в проекта да провеждат общи срещи, където да се обсъждат текущите проблеми при изпълнение на конкретните задачи, вкл. да се съгласуват сътрудничеството и взаимодействието между отделните работни групи.

**(В) Седмични семинари:** Партньорите на проекта имат отдавна функциониращи редовни научни семинари, които се планира да бъдат разширени за всички участници и на които да се докладват получените до момента резултати по проекта.

**(Г) Лекционни курсове:** Планираме четенето на лекционни курсове за магистри и докторанти във физическия факултет и факултета по математика и информатика на Софийския университет, а също така в изграждащия се понастоящем нов изследователски университет към БАН. Целта им е обучение на студенти и млади учени на най-високо ниво, като бъдат въвеждани в предния фронт на научните изследвания в предлаганите в проекта области.

**(Д) При посещения на видни чуждестранни учени** в организациите-участници се планира да бъдат организирани неформални срещи, които биха дали възможност за преки контакти между гостите и студентите и младите учени.

**(Е) Интернет-страница:** планира се поддръжка на интернет-страница с редовни новини информиращи партньорите за семинари, лекционни курсове, защита на докторски дисертации и други събития и дейности свързани с изпълнението на проекта.

**(Ж) Международно работно съвещание “Теория на Ли и нейните приложения във физиката”:** В. Добрев планира да организира 11-то Международно работно съвещание “Теория на Ли и нейните приложения във физиката” през юни 2015 г. Тази серия международни научни мероприятия вече е придобила значителна популярност в много от водещите в науката страни по света. Целта е студентите и младите учени да са в пряк контакт с видни представители на международната научна общност в предложените области за научни изследвания. Наред с другите ползи от едно такова авторитетно международно мероприятие е организирането на постерна сесия за младите учени.

**(З)** Планира се провеждането на **регулярни неформални семинари** на Управителния съвет един или два пъти месечно, на които ще бъде обсъждан напредъка в дейността на всеки един от членовете на колектива, както и възникналите проблеми в хода на работа. На тези семинари ще бъдат решавани и текущи организационни въпроси като командировки, участие в конференции на членове на колектива, управление на финансовите средства и др.