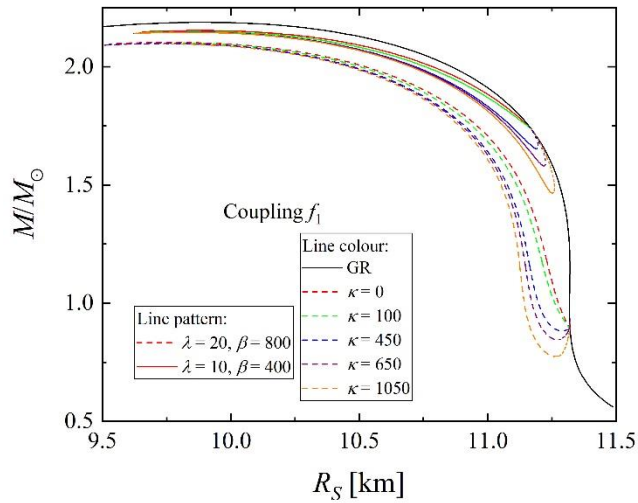


Група „Mathematical Physics and Astrophysics“, Водещ изследовател: Чл.-кор. проф. дфн Стойчо Язаджиев.

Научните дейности по проекта могат да се систематизират по три основни научни направления

Първото направление е съпоставянето на теоретичните предсказания с бъдещите наблюдения на гравитационни вълни в търсене на гравитационно-вълнови отпечатъци на нови фундаментални скаларни полета. За тази цел се изследват равновесни конфигурации на скаларизирани черни дупки и неутронни звезди в скаларно-тензорни теории с механизъм за скаларизация. Изследват се квазинормални моди на скаларизирани черни дупки и гравитационни вълни от сливания на черни дупки в скаларно-тензорни теории с механизъм за скаларизация.

Една от основните области на изследване на групата са черните дупки и неутронните звезди в скаларно-тензорни теории с механизъм за скаларизация и гравитационните вълни, излъчвани от такива обекти. На този етап от проекта групата работи активно в няколко направления по тези проблеми. Първо, механизъмът за нелинейна скаларизация на неутронни звезди в скаларна гравитация на Гаус-Боне. Ефектът от нелинейната скаларизация на черни дупки и неутронни звезди е новооткрит ефект, който позволява съвместното съществуване на линейно стабилни решения в обща теория на относителността и стабилни скаларизирани решения. В този случай решението в общата теория на относителността (неутронна звезда или черна дупка) е линейно стабилно за даден набор от параметри (или централни плътности на енергията), но може да се появи нелинейна нестабилност (например в случай на пертурбация с висока амплитуда), което позволява формирането на скаларизиран компактен обект. За дадения набор от параметри тези два клона могат да съществуват едновременно без да има гладка връзка между тях. Това е предпоставка за значителен наблюдателен отпечатък в случай на преход от скаларизирано към нескаларизирано решение или обратното. В рамките на проекта вече е показано съществуването на ефектна на нелинейна скаларизация за неутронни звезди в скаларна Гаус-Боне гравитация.

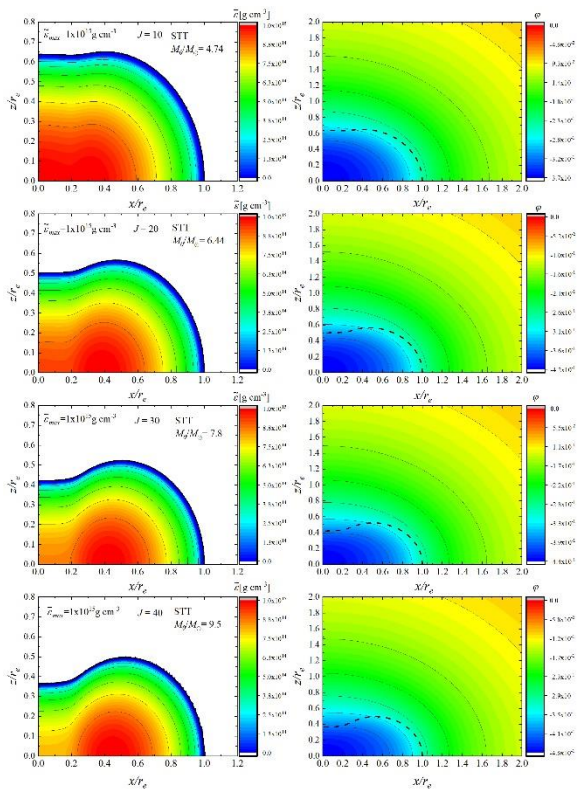


Фигура 1: Отношение на масата на радиуса за неутронни звезди за дадена функция на свързване и различни набори от параметри в теорията. С увеличаването на параметъра капа решенията преминават от спонтанна към нелинейна скаларизация. Решенията с нелинейна скаларизация имат маси под точката на бифуркация (точката, в която скаларизираният клон се отделя от клона на общата теория на

относителността). Пунктираните линии са нестабилни клонове, които никога не се осъществяват, следователно няма връзка между клона на нелинейната скаларизация и този на общата теория на относителността.

Другото активно изучавано направление в момента е сливането на двойни неутронни звезди в скаларно-тензорните теории и останката от сливането им. По време на фазата на сливане и след сливането се излъчва значително количество гравитационни вълни, които потенциално могат да носят отпечатъка на скаларното поле и да позволят скаларно-тензорната теория да бъде разграничена от общата теория на относителността.

Симулациите в общата теория на относителността на сливащи се неутронни звезди предполагат, че в първите няколко милисекунди остатъкът от сливането ще се върти бързо и диференциално с максимум на ъгловата скорост отместен



от центъра. Ако се използва закон за въртене, който позволява равновесна неутронна звезда с такъв ротационен профил, тези модели могат да се използват за изследване на остатъка от сливането – неговата стабилност и излъчване на гравитационни вълни, заобикаляйки тежките числени симулации на самото сливане.

Такива модели с реалистичен диференциален закон на въртене в скаларно-тензорната теория вече бяха конструирани от нас от началото на проекта и в момента се провежда изследване на тяхната стабилност.

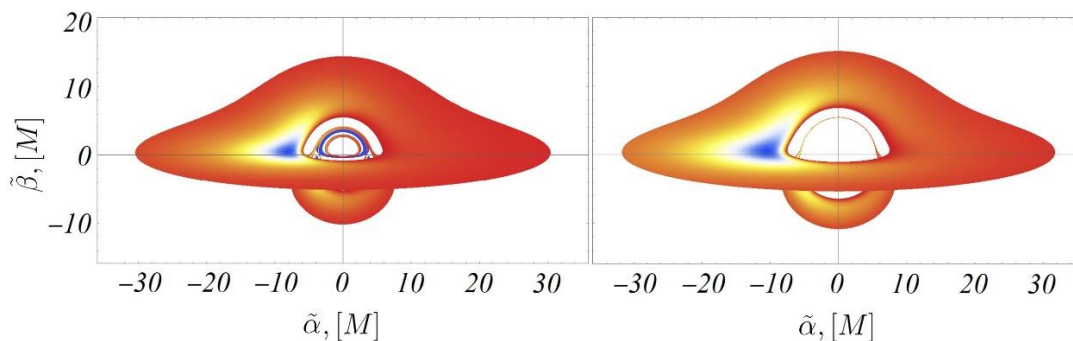
Успоредно с това се изучава сливането на двойни неутронни звезди и излъчването на гравитационни вълни по време на сливането в скаларно-тензорната теория.

Фигура 2: Профили на бързо и диференциално въртящи се неутронни звезди в скаларно-тензорни теории (представена е една четвърт от звездата). Лявата колона е разпределението на плътността на енергията, а дясната – разпределението на скаларното поле. Моделите са за един и същ набор от параметри на теорията с ъглов импулс J , нарастващ на всеки ред. Видимо е как формата на звездата се променя от квазисферична в квазиторoidalна с увеличаване на J .

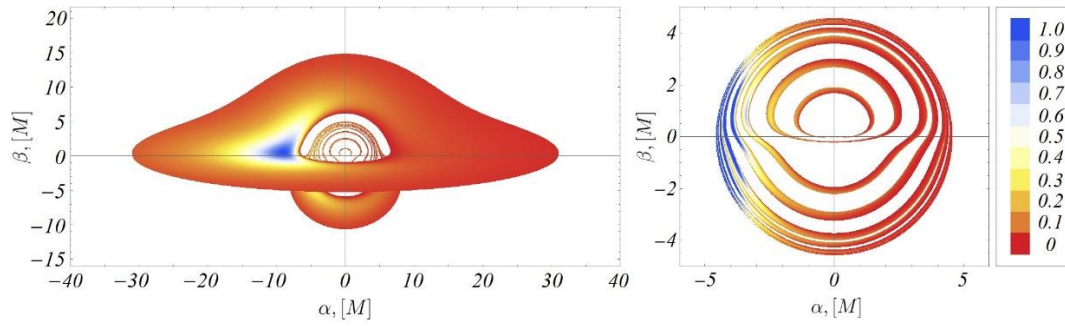
Второто направление е изследване на поляризираните изображения на акреционните дискове около черни дупки и други компактни обекти в рамките на скаларно-тензорните теории на гравитацията и съпоставяне с наблюденията от колаборацията *ngEHT* в търсене на ясни електромагнитни отпечатъци на нови фундаментални скаларни полета. За тази цел се изследват поляризирани изображения на скаларизирани черни дупки и на нетопологични и топологични солитони в скаларно-тензорните теории.

Релативистките изображения на акреционните дискове носят богата информация за свойствата на съответния компактен обект и измерването с достатъчна точност на тяхната морфология, яркост и поляризация може да послужи за откриването на отклонения от общата теория на относителността или за съществуването на нови екзотични компактни обекти. Това е една от задачите на колаборацията ngEHT (Next Generation Event Horizon Telescope), която с помощта на глобална мрежа от радиотелескопи наскоро наблюдава за първи път сянката на компактен обект в центъра на нашата галактика.

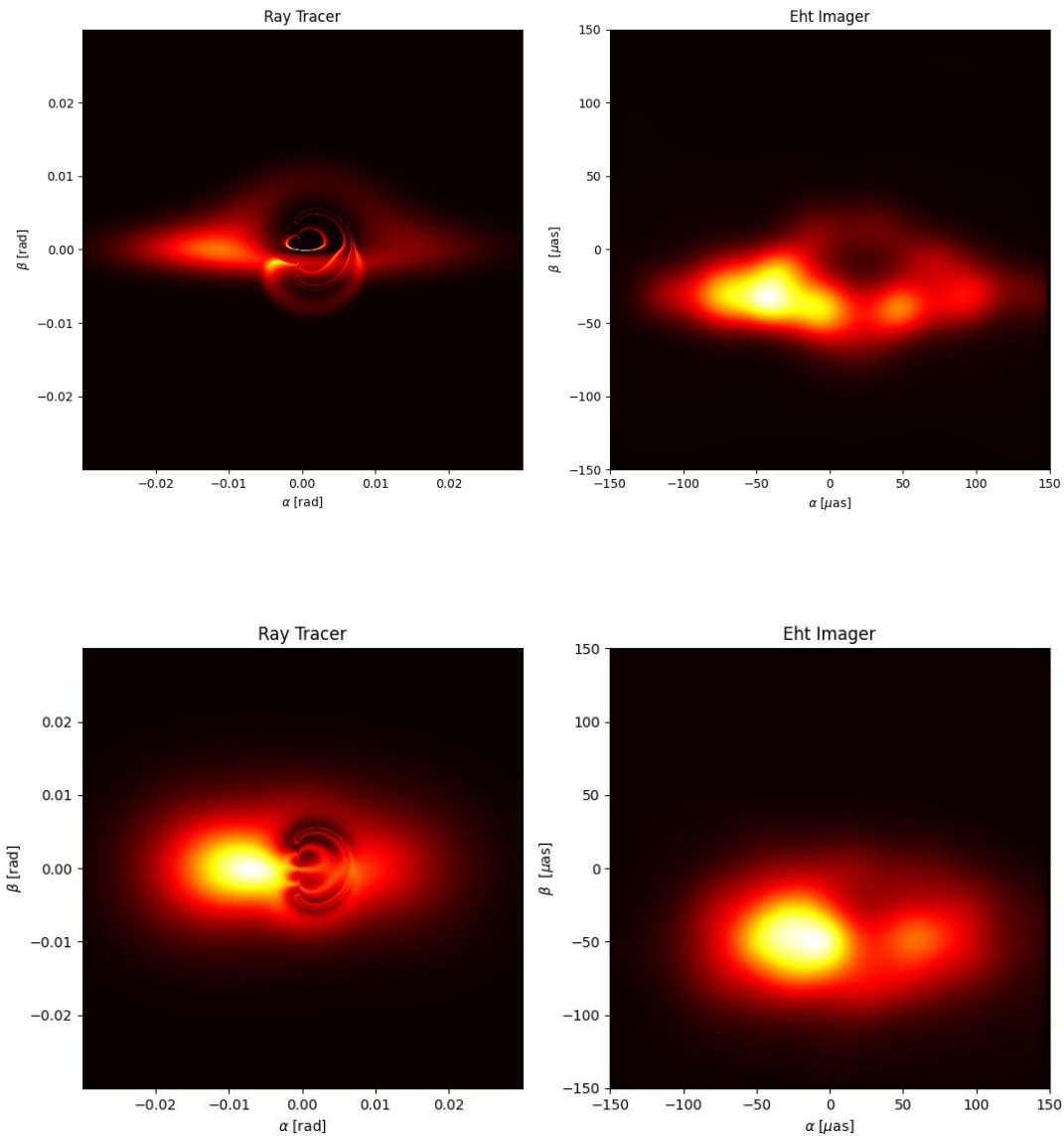
Структурата на образите при компактни обекти, които се описват от модифицирани теории на гравитацията е възможно да се различава съществено от тази на черните дупки в рамките на ОТО. В частност при разглеждането на екзотични компактни обекти мотивирани от ефективни теории на квантовата гравитация се наблюдава формирането на серия от ярки пръстени в центъра на релативисткия образ на диска, които отсъстват при черната дупка на Кер. Този феномен беше открит и изследван от нашата група като едни от първите в областта.



Фигура 3. Образ на тънък диск около гола сингулярност на Janis-Newman-Winicour (ляво) съпоставен с черна дупка на Шварцшилд. При голата сингулярност се формира серия от ярки пръстени в центъра на диска, които могат да послужат за нейното експериментално детектиране.



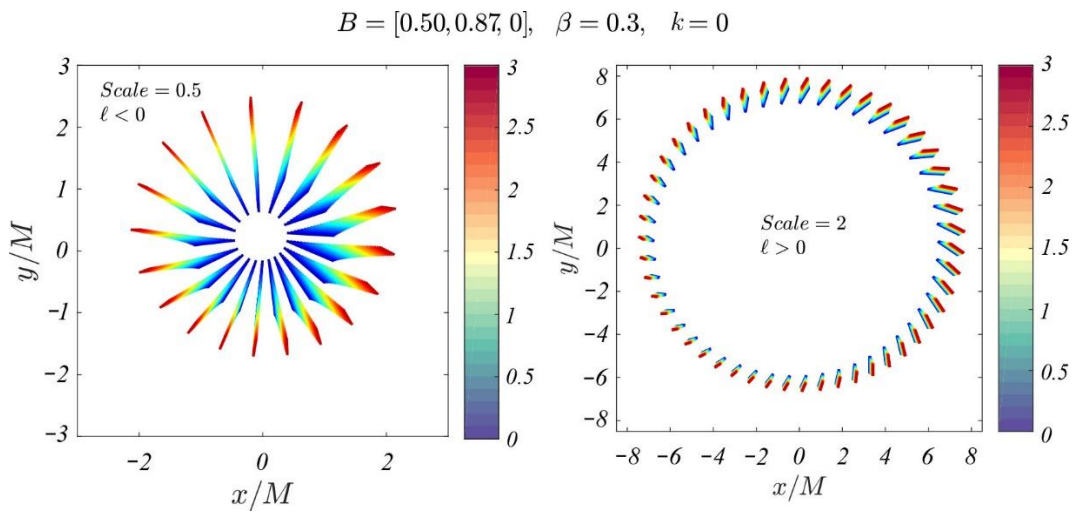
Фигура 4. Образ на тънък диск около гола сингулярност в теорията на Einstein-Gauss-Bonnet. Наблюдава се друг тип структура от вложени ярки пръстени в центъра на изображението, която отсъства при черните дупки.



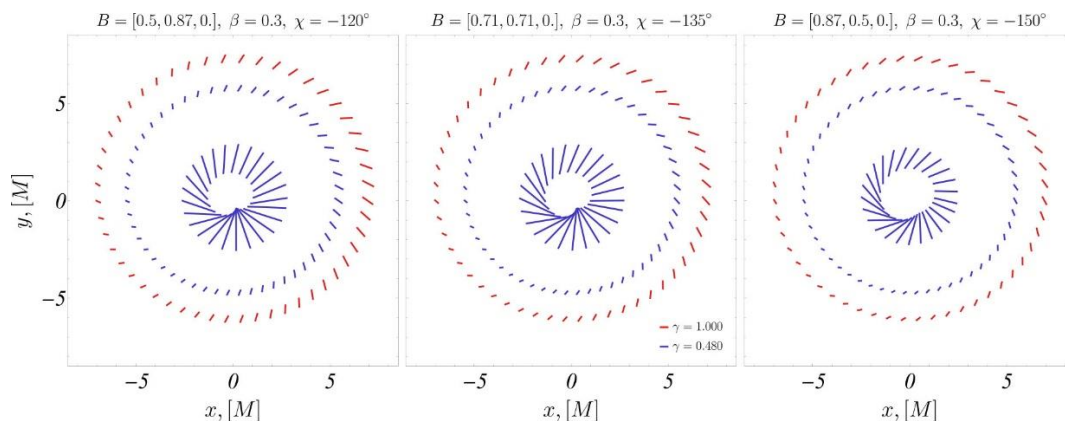
Фигура 5. Образ на дебел диск около тунел в пространство-времето. Пръстеновидната структура в центъра на образа се наблюдава при различни модели на акреция и астрофизически условия. Това показва, че тя представлява характеристика на пространство-времето и може да послужи като експериментален метод за откриване на екзотични компактни обекти.

Друг канал за извличане на информация за свойствата на компактните обекти е изследването на поляризацията на електромагнитното излъчване от акреционните дискове. Нейното направление и интензитет създават

специфични наблюдателни структури, като ние показахме за първи път, че те могат да послужат за експерименталното откриване на тунели в пространство-времето или голи сингулярности. Групата работи активно по разширяване и задълбочаване на тези изследвания като търси нови феноменологични проявления, които биха довели до наблюдаеми ефекти в границите на настоящите възможности на *ngEHT*.



Фигура 6. Поляризиран образ на най-вътрешната стабилна кръгова орбита за тунел в пространство-времето. Поради възможността за преминаване на светлина от другия край на тунела се формира втори поляризиран образ с многократно по-висок интензитет и характеристичен наклон на вектора на поляризация. Тази структура отсъства при черните дупки и може да бъде използвана за откриването на компактни обекти с нетривиална топология.



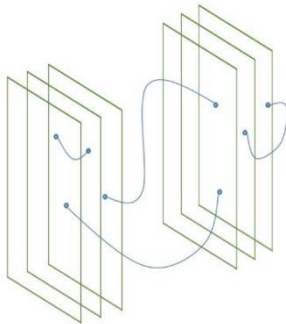
Фигура 7. Поляризиран образ на най-вътрешната стабилна кръгова орбита за гола сингулярност на Janis-Newman-Winicour (син контур) и черна дупка на Шварцшилд (червен контур). При този тип компактни обекти също формира втори поляризиран образ, който отсъства при черните дупки, поради наличието на регион с отблъскващо гравитационно поле в околност на сингулярността. Свойствата на вторичния образ се отличават от тези при тунелите в пространство-времето и могат да послужат като наблюдателна характеристика на такъв тип голи сингулярности.

...

Третото направление е разработването на холографско описание на конкретни силно свързани системи като динамиката на пространство-времето в близост до хоризонта на черните дупки, която е тясно свързана с излъчването на гравитационни вълни от черни дупки. За тази цел се изследват двойственост между калибровъчни теории и гравитация и интегрални структури в холографско съответствие.

...

1) Теория на струните



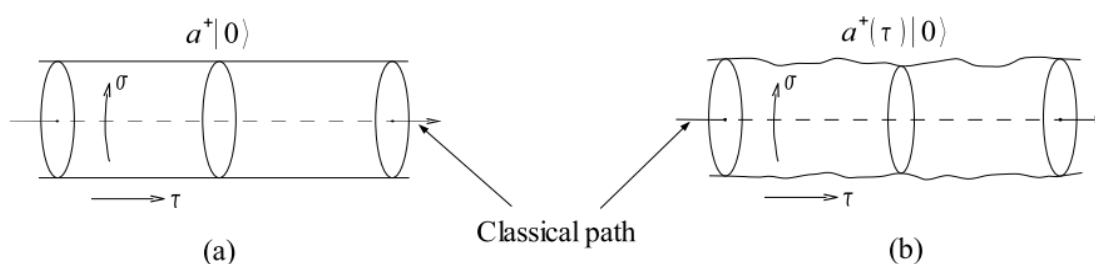
Фигура 8.
Конфигурация от струни и мембрани, моделиращи ефект на Хигс за придаване на маса на частиците.

концептуална рамка.

Резюме: Теорията на струните е удивително постижение на съвременната теоретична физика имаща потенциала да разреши съществуващите противоречия между общата теория на относителността и квантовата физика. Струнната теория разглежда елементарните частици като квантови вибрации на едномерни струни, нещо, което води до дълбоко преосмисляне на нашите разбирания на свойствата на пространството, времето и материята на фундаментално ниво. Нейните нетривиални математически подходи са ключовият апарат за описанието на всичките четири познати фундаментални сили в природата, включително и гравитацията, в една обща

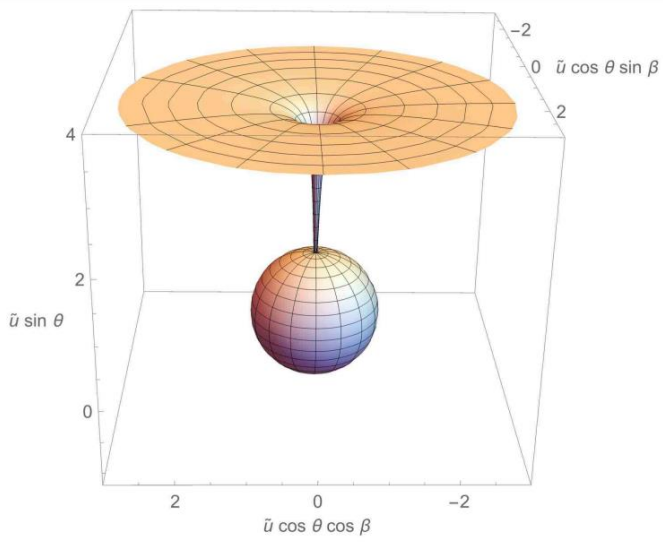
Цел на изследванията: Постигане на ефективна ниско-енергетична граница на теорията на суперструните и М-теорията и реализиране на реалистичен стандартен модел на елементарните частици.

Постигнати научни резултати: резултатите в това направление са постигнати от проф. дфзн Радослав Рашков, който в поредица от научни статии разглежда свойствата на вакуумна полева теория на струните, полева теория на струните в присъствие на В-поле, D-брани в присъствие В-поле, некомутативност и нетопологичност в теория на струните, и ниско-енергетичната граница на теория на струните.

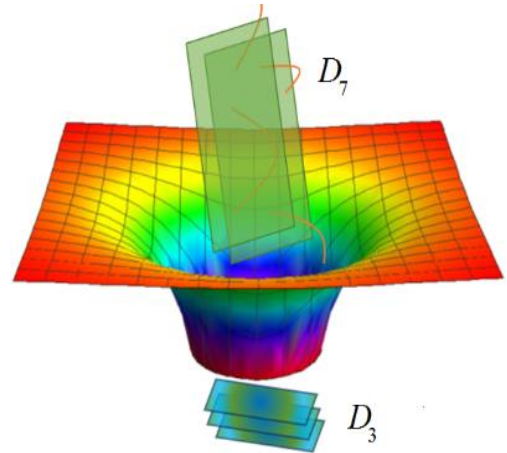


Фигура 9. Квантова динамика на струни в некомутативна геометрия с магнитно фоново В-поле.

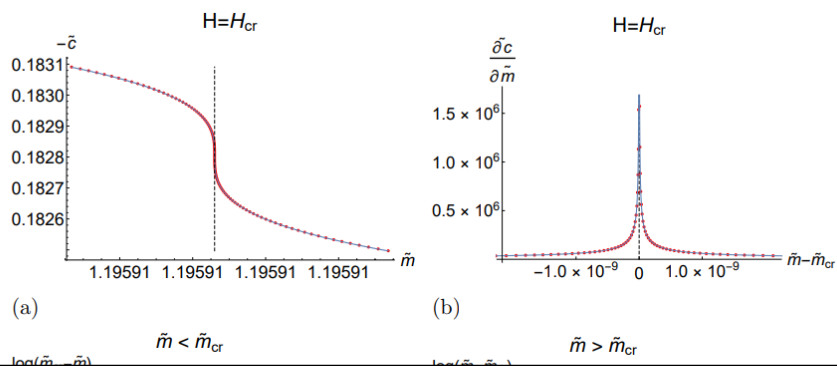
Настоящи изследвания: Очакваните нови резултати в това направление са свързани с конструирането на реалистични струнни модели на квантовата хромодинамика чрез моделиране на конфигурации от D-брани с частично или пълно нарушаване на суперсиметрията по модел на Хигс. По този начин се стремим да възпроизведем непертурбативно свойствата на частиците от стандартния модел. В това направление работят основно доц. д-р Цветан Вецов и проф. дфзн Радослав Рашков.



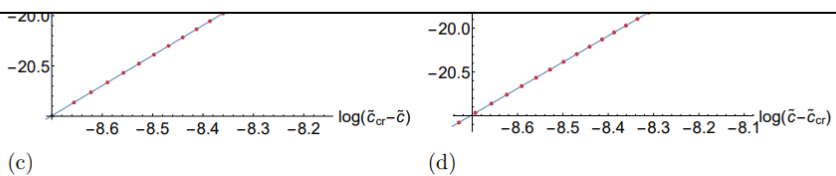
Фигура 10. М-теория с текстури. Влагане на черна дупка в пространство на Минковски с червеева дупка от D3-брани.



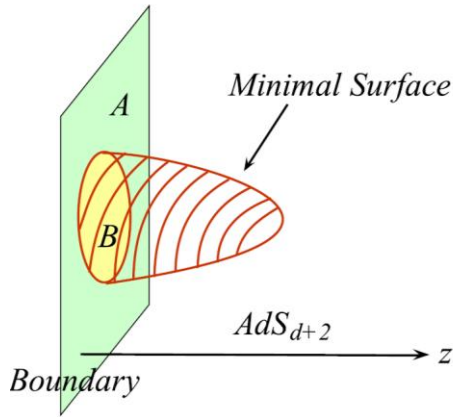
Фигура 11. D-бранен модел на квантова хромодинамика с мезони от кварки и антикварки.



Фигура 12. Фазови преходи в суперсиметрични системи от D-брани и масата на кварките.



2) Супергравитация и холография



Фигура 13. Реализация на холографския принцип за реконструиране на геометрията на пространство-времето от данните на асимптотичната квантовополева теория.

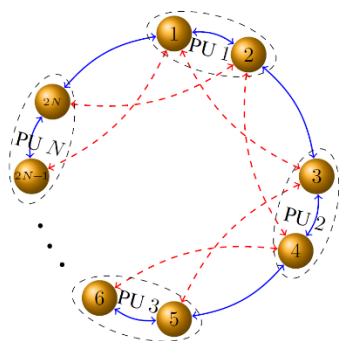
Резюме: В стремежа си да обединим познатите фундаментални сили в природата сме открили една изключително красива симетрия, свързваща бозоните и фермионите в една обща математическа рамка. Това е суперсиметрията. Приложена към модели в гравитацията възниква друга уникална по рода си теория наречена супергравитация. Удивителен е фактът, че супергравитацията се явява една от нискоенергетичните граници на теорията на суперструните. Последното позволява включването на супергравитационните модели в контекста на най-забележителното откритие на теорията на

струните, а именно принципа на холографското съответствие. Според него гравитацията и квантовополевите явления се реализират като две различни, но еквивалентни по същество описания на една и съща физическа система. Последното изразява по същество т. нар. холографска дуалност и ни позволява за пръв път да започнем изучаването на сложни системи с нови мощни непerturbативни методи и по този начин да задминем успехите на физиката на миналия век.

Цел на изследванията: Да се анализират свойствата на важни холографски модели от двете страни на холографската дуалност и да се идентифицира точният холографски речник между операторите от дуалната квантовата теория и полетата от гравитационната струнна теория. С това се установява еднозначна еквивалентност на двете описания и се предоставя възможност да се извършват изчисления дори в режим на силно свързване на някоя от двете теории.

Постигнати научни резултати: Изследванията в това направление отново са поставени първоначално от проф. дфзн Радослав Рашков заедно с доц. д-р Христо Димов и доц. д-р Веселин Филев, а на по-късен

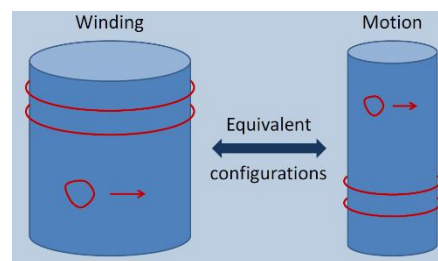
етап в изследванията се включват и други членове на групата като доц. д-р Цветан Вецов, д-р Мирослав Радомиров. В това отношение, в серия от научни публикации са изследвани свойствата на холографската дуалност между струнни и калибровъчни теории в следните различни аспекти:



Фигура 14. Спинова верижка от взаимодействащи помежду си осцилатори с висши производни.

- Дуалност между струнни модели и системи със спинови верижки.
- Пулсиращи, пръчковидни и въртящи се струнни решения в контекста на холографското съответствие и тяхното квазикласическо квантуване.
- Семикласически анализ и дисперсионни отношения на магنونни и шипковидни решения в различни супергравитационни фонове геометрии.
- Квазикласически анализ на холографската дуалност в некомутиративни пространства.
- Изследване на ароматни суперсиметрични полени теории във външно магнитно поле.
- Холографска магнитна катализа и нарушаване на киралната симетрия.

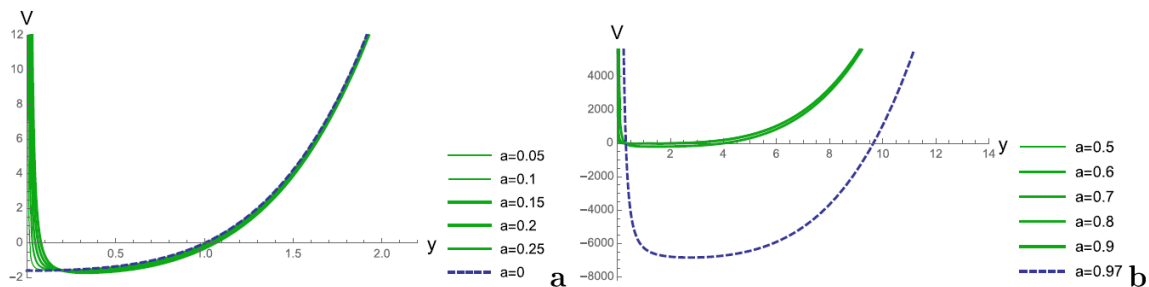
- Три- и четири-точкови корелационни функции на оператори в холографски системи.
- Холография на системи с висши спинове.
- Холографски системи с дефекти.
- Солитонни решения в теория на струните и холографията.
- Холография с нерелативистка симетрия на Шрьодингер.
- Генериране на точни решения в супергравитацията чрез абелеви и неабелеви TsT трансформации на съществуващи фонове.



Фигура 15. Визуализация на струни върху геометрии свързани с T-дуалност

Настоящи изследвания: Настоящите изследвания в това направление са свързани с тестване и изследване на свойствата на холографското

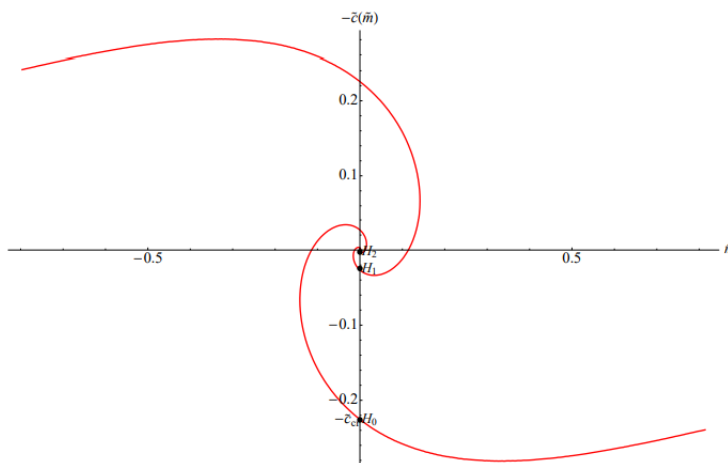
съответствие със струни в присъствие на черни дупки при крайна температура. Върху този проблем са фокусирани основно усилията на проф. Радослав Рашков и доц. д-р Христо Димов.



Фигура 16. Ефективен потенциал на пулсиращи струни в пространство на Кер-анти-де-Ситер.

3) Интегруеми системи и модели с точни решения

Резюме: Интегрируемите модели са специален клас динамични системи, които проявяват висока степен на структурираност и регулярност. Обикновено имат ниска комплексност и се подават на аналитично описание. От друга страна, прогресивното разрастване на комплексността на динамични системи при тяхната еволюция отчита включването или възникването на допълнителни взаимодействия и/или нелинейности, като по този начин динамиката става по-сложна и непредвидима. В този контекст специфичната динамиката може да породи хаос и недетерминистичност, дори и първоначалната система да е точно решаема.



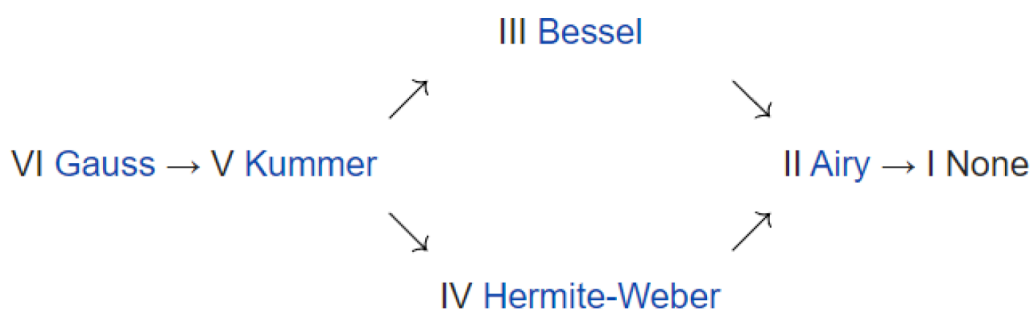
Фигура 17. Откриване на ефекта на холографската магнитна катализа от проф. дфзн Радослав Рашков и доц. д-р Веселин Филев.

Цел на изследванията: Разбиране на свойствата и режимите на интегрируемите модели в контекста на холографското съответствие.

Постигнати научни резултати: Както получените резултати могат да се разделят на две основни групи:

А) Изомонодромични деформации на точно решаеми струнии модели:

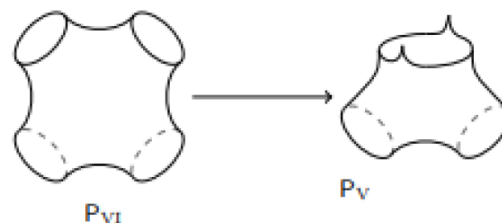
Резюме: Изомонодромните деформации са метод за изследване на системи от обикновени диференциални уравнения, при които се добавя фиктивна сингулярност, генерираща ефективен хамилтонов поток. Това позволява преобразуването на оригиналната гранична задача в начална задача за ново нелинейно уравнение от класа на Пенлеве и по този начин могат да се използва цял нов клас от методи за изследване на свойствата на разглежданата система.



Фигура 18. Схематична изомонодромична връзка между обикновени диференциални уравнения и нелинейните уравнения на Пенлеве.

Научни резултати: Работният екип тук се състои от проф. дфзн. Р. Рашков, доц. д-р Ц. Вецов, гл. ас. д-р М. Радомиров и докторант Васил Аврамов:

- Получени са изомонодромичните деформации и Хамилтоновия поток на струнни уравнения тип Хойн в пространства на Сасаки-Айнщайн.
- Намерени са асоцираните нелинейни уравнения на Пенлеве.
- Разгледани са различни случаи на сливане на сингулярности както на оригиналните уравнения на Хойн, така и на нелинейните уравнения на Пенлеве.
- Направена е хипотезата, че свойствата на дуалната квантова теория се определят от топологията на монодромичните многообразия на Пенлеве.
-



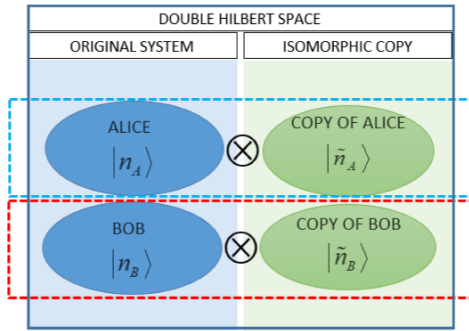
Фигура 19. Сливане на сингулярности при уравнение на Хойн и съответстващите им нелинейни уравнения на Пенлеве.

Б) Комплексност на холографски черни дупки

Резюме: Комплексността на дадена система е универсален инструмент за

изучаване на поведението на такива обекти без значение от техните режими на свързване. В този контекст комплексността на системата съдържа информация за появата на хаотичните режими в една система и може да се използва за тяхното детектиране.

Научни резултати: Работен екип: проф. дфзн. Р. Рашков, доц. д-р Ц. Вецов, гл. ас. д-р М. Радомиров и докторант Васил Аврамов:



предложен иновативен подход към проблема.

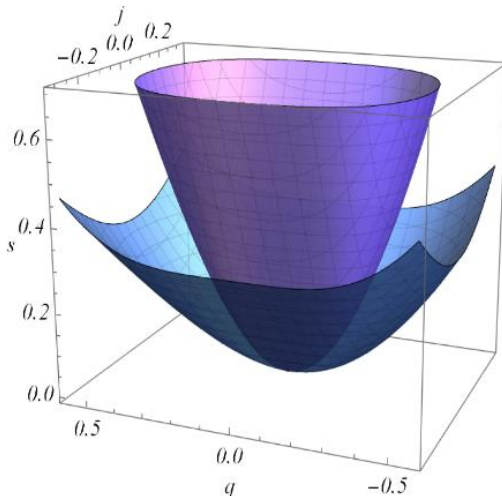
Фигура 20. Схема на метода на удвоеното термално квантово състояние, което се използва за пресмятане на квантовата сплетеност и комплексност в холографски системи.

- Намерена е холографската комплексност на тримерна черна дупка и нейната дулна квантовополева теория. С нейна помощ са ограничени параметрите на двете теории.
- Намерена е връзка между комплексността на Крилов и верижка на Тода, която е интегрируем модел, като е предложен иновативен подход към проблема.
- Намерена е връзка между комплексността на Крилов и трансцендентни уравнения на Пенлеве, като това допълва известните връзки между ортогонални полиноми и предлага нов подход към известните вече резултати.

Настоящи изследвания: Работен екип: проф. дфзн. Р. Рашков, доц. д-р Ц. Вецов, гл. ас. д-р М. Радомиров и докторант Васил Аврамов. Настоящите разглеждания на комплексността са свързани със следните три ниши:

- Комплексност на Крилов, хаос и приложения в холографията и теорията на струните.
- Холографска комплексност на тримерни черни дупки на Гаус-Боне и хаос.
- Пресмятане на секторите на Стокс при изомонодромични трансформации, уравнения на Пенлеве и хаос.

4) Информационни пространства и информационна геометрия



Фигура 21. Екстремален хоризонт на черна дупка на Кер-Нюман (синя повърхнина) и топлинен капацитет на системата при фиксирани ъглов момент и заряд (виолетова повърхнина).

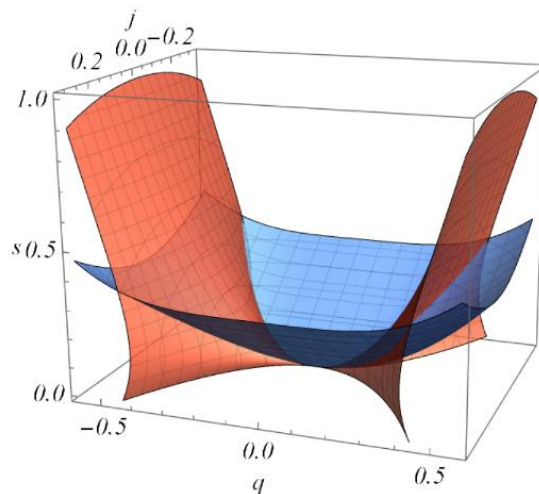
Резюме: Връзката между информация и материя е една от най-интригуващите и предизвикващи удивление парадигми на съвременната теоретична и експериментална физика. От една страна всяка физическа система закодира определени свойства в себе си, които я определят напълно, а от друга страна тези свойства определят информационното съдържание или липсата на такова на системата. Задачата на информационната теория, и в частност на информационната геометрия, е да разгледа с подходящ математически апарат кодирането и декодирането на свойствата на квантовите и класическите системи по

възможно най-оптимален начин, без да изгубим съществена информация за системата. За целта, в този случай се разглеждат цели параметрични пространства на една система, наречени информационни, така че да се обхванат максимално най-много модели едновременно и с това да се определят най-подходящите за дадена цел от тях. В този контекст информационната геометрия се явява един от най-мощните инструменти за анализ на моделно ниво на различни физически системи, като на квантово ниво, така и на чисто статистическо ниво, особено когато сложността на системите е съществена.

Цел на изследванията: анализ на информационните пространства на холографски, квантови и класически системи с методите на диференциалната геометрия, статистическата физика, теорията на вероятностите и теорията на информацията.

Постигнати научни резултати:

Научният екип от групата по струни, с водещ принос на проф. д-р Радослав Рашков, са първите, които показват валидността на холографското съответствие за теории с нерелативистка симетрия чрез методите на информационната геометрия. Освен това, екипът е и първият, който прилага концепцията за термодинамична дължина, за да изследва свойствата на холографски дуалните системи.



Фигура 22. Екстремален хоризонт на черна дупка на Кер-Нюман (синя повърхнина) и топлинен капацитет на системата при фиксирани ъглова скорост и заряд (оранжева повърхнина).

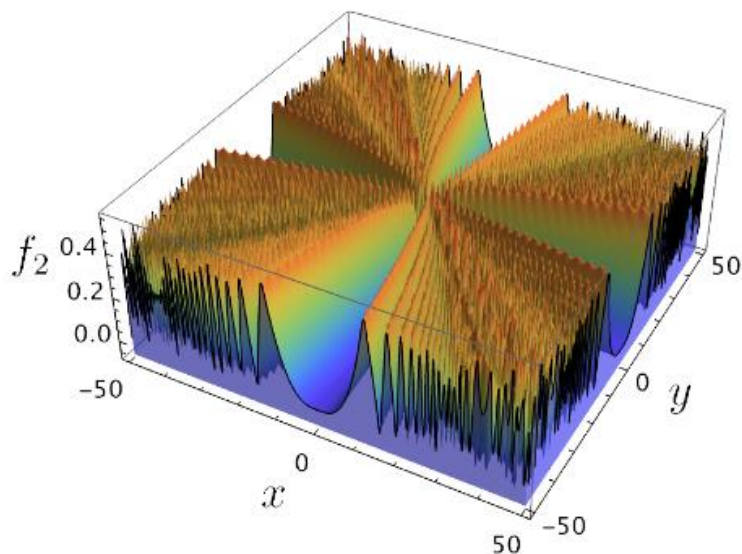
Настоящи изследвания: провеждат се редица изследвания в следните направления:

- Информационна геометрия на холографски черни дупки в термодинамично равновесие и неравновесие.
- Геометрично изследване на термодинамични процеси в холографски системи като топлинни машини.
- Изследване на квантови и термални флуктуации на черни дупки.

5) Математически аспекти и математически апарат

Резюме: В процеса на научните изследвания на реални или абстрактни системи, освен известния математически апарат, често се налага да създаваме нови методи и техники за смятане. Намирането на такива методи само по себе си е предизвикателна и трудна задача и често води

до приложения на разработените методи извън първоначално определената им цел.



Фигура 21. Пространството от решения на диофантови уравнения за проблема с развитието на цели числа в кубици и методът Монте Карло за тяхното намиране, разработен от доц. д-р Цветан Вецов и д-р Боян Лазов.

Постигнати научни резултати: В това направление проф. дфзн. Радослав Рашков е намерил множество нови и нетривиални математически свойства на интегрируемите системи. В друго подобно отношение доц. д-р Цветан Вецов спомага за създаването на един от най-мощните оптимизационни Монте Карло методи. Също така, доц. д-р Веселин Филев е първият, които разработва дискретни числени методи за тестване на холографския принцип чрез компютърни симулации.